

**ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Безменнікова Людмила Миколаївна

УДК 621.314.222.6:681.518.54

**ДІАГНОСТУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ
РОБОТИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СІЛЬСЬКИХ
СПОЖИВЧИХ ПІДСТАНЦІЙ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Мелітополь – 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Таврійському державному агротехнологічному університеті.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор **Овчаров Володимир Васильович**, Таврійський державний агротехнологічний університет, завідувач кафедри теоретичної і загальної електротехніки.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Лупіков Валерій Сергійович**, Харківський національний технічний університет (ХПТ), завідувач кафедри електричних апаратів;

кандидат технічних наук, доцент **Каплун Віктор Володимирович**, Національний аграрний університет, доцент кафедри електропостачання.

Захист відбудеться 18 січня 2008 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 18.819.01 в Таврійському державному агротехнологічному університеті за адресою: 72312, м. Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Таврійського державного агротехнологічного університету за адресою: 72312, м. Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18.

Автореферат розісланий 11 грудня 2007 року.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

В.Т. Діордієв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Досвід експлуатації силового електрообладнання в агропромисловому комплексі свідчить про значну аварійність трансформаторів споживчих підстанцій, що завдає сільськогосподарському виробництву додаткових збитків через припинення роботи цілого ряду технологічно зв'язаного обладнання, недодану продукцію та незаплановані ремонти. Щорічно в агропромисловому комплексі з ладу виходять 8 -10 % силових трансформаторів. Причинами такого стану є специфічні умови роботи силових трансформаторів споживчих підстанцій, до яких зокрема відносяться несиметричне навантаження фаз, сезонний графік навантаження, коливання температури навколишнього середовища, велика протяжність ліній електропередач та економічні умови, у зв'язку з якими майже 70 % силового обладнання виробило свій ресурс.

Існуючі форми обслуговування силових трансформаторів в агропромисловому комплексі не забезпечують достатню їх експлуатаційну надійність, так як не передбачають аналіз поточного технічного стану трансформаторів. Тому дослідження, які спрямовані на аналіз режимів роботи силових трансформаторів в експлуатаційних умовах агропромислового комплексу, розробку методів функціонального їх діагностування та обґрунтування параметрів діагностування, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Роботу виконано відповідно до плану наукових досліджень Таврійської державної агротехнічної академії на 2002 – 2007 роки за науково-технічною програмою № 1 “Розробка наукових систем, технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України” (державний реєстраційний номер 0102U000678); за підпрограмою 1.10 “Розробка методів і засобів технічного сервісу електрообладнання і економії енергоресурсів”; за темою 1.10.5 “Діагностування експлуатаційних режимів роботи силових трансформаторів сільських споживчих трансформаторних підстанцій”.

Мета і задачі дослідження

Мета дослідження: підвищення експлуатаційних показників роботи силових трансформаторів сільських споживчих трансформаторних підстанцій шляхом об'єктивного функціонального їх діагностування на базі математичної моделі процесів нагріву трансформаторів.

Задачі дослідження:

1. Дослідити процес нагріву силового трансформатора при симетричному струмовому перевантаженні.
2. Дослідити процес нагріву силового трансформатора при несиметричному струмовому перевантаженні.
3. Дослідити процес нагріву силового трансформатора під дією надструмів.
4. Розробити математичну модель функціонального діагностування силового трансформатора.

5. Розробити пристрій функціонального діагностування силового трансформатора.

Об'єкт дослідження – процеси нагріву та теплової витрати ресурсу ізоляції обмоток силового трансформатора в експлуатаційних умовах.

Предмет дослідження – закономірності процесів нагріву і теплової витрати ресурсу ізоляції обмоток силового трансформатора під дією експлуатаційних факторів.

Методи дослідження. Процеси нагріву трансформатора досліджувалися з використанням теплових схем заміщення, операторного методу рішення диференціальних рівнянь, матричного обчислення. Визначення температур обмоток в експериментальних дослідженнях проводилося непрямим методом шляхом вимірювання їх активного опору. Розрахунки теоретичних залежностей та обробка експериментальних даних проводилися математично-статистичними методами із використанням пакету програм «Microsoft Office» та програмного забезпечення «Maple 9,5».

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Одержала подальший розвиток теорія нагріву силового трансформатора як гетерогенної системи порівняно з номінальним режимом роботи при симетричних і несиметричних перевантаженнях і дії надструмів, які характерні для специфічних умов агропромислового комплексу.
2. Вперше одержані математичні залежності визначення еквівалентних параметрів теплової схеми заміщення силового трансформатора з використанням дослідів холостого ходу і короткого замикання.
3. Розроблена модель функціонального діагностування режимів роботи силового трансформатора з урахуванням експлуатаційних впливів, які характерні для специфічних умов агропромислового комплексу.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Розроблена мікропроцесорна система функціонального діагностування силового трансформатора сільських споживчих підстанцій.
2. Розроблено пристрій функціонального діагностування силового трансформатора в експлуатаційних умовах.
3. Розроблена методика практичного визначення параметрів діагностичної моделі.

Особистий внесок здобувача

Розроблена методика визначення еквівалентних теплових провідностей теплової схеми заміщення силового трансформатора за результатами дослідів холостого ходу і короткого замикання [1].

Проведено аналіз теплових процесів в силовому трансформаторі при симетричному струмовому перевантаженні та одержана залежність температури обмоток у функції температури масла і кратності сили струму [2].

Проведено аналіз процесу нагріву силового трансформатора під дією надструмів, розроблена математична модель теплової витрати ресурсу ізоляції обмоток силового трансформатора після дії надструмів [3].

Розроблено блок-схему пристрою функціонального діагностування експлуатаційних режимів роботи силового трансформатора та технічні вимоги до нього [5].

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційної роботи представлені і схвалені на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів і студентів Таврійського державного агротехнологічного університету (м. Мелітополь, 2003 – 2007 р.), міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 2006 р.), науково-технічної конференції «Проблеми енергосурсозбереження в технологічних процесах АПК» (м. Мелітополь, 2007 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (АР Крим, с.м.т. Миколаївка, 2007 р.), науково-технічному семінарі на базі кафедри «Електричні апарати» Харківського національного технічного університету (ХПТ) (м. Харків, 2007 р.).

Публікації

Результати дисертації опубліковані у 8 статтях в наукових фахових виданнях у період з 2004 року по 2007 рік.

Структура й обсяг дисертації

Дисертаційна робота викладена на 163 сторінках машинописного тексту, ілюстрована 30 рисунками, 8 таблицями і складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 129 найменувань та 5 додатків на 45 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

ВСТУП

Обґрунтовано актуальність обраної теми досліджень, її новизна та практична цінність для агропромислового комплексу, показано підстави і вихідні дані для розробки теми, необхідність проведення запланованих досліджень, наведено загальну характеристику роботи.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розглянуто і проаналізовано специфічні умови експлуатації трансформаторів споживчих підстанцій в агропромисловому комплексі (АПК).

Аналіз стану силового обладнання та причин пошкоджень трансформаторів в АПК на прикладі Мелітопольського РЕМ показав, що 8 – 10 % трансформаторів щорічно виходять з ладу, 70% трансформаторів від загальної кількості виробило свій встановлений стандарт ресурс. Згідно зі статистичними даними основна причина виходу з ладу трансформаторів є пошкодження обмоток.

Розкрито механізм розвитку пошкоджень обмоток силових трансформаторів під дією експлуатаційних впливів. Визначено, що стан обмоток залежить від стану ізоляції, який в свою чергу залежить від температури обмоток трансформатора при його функціонуванні.

Сьогодні накопичено значний досвід застосування методів розрахунку і дослідження теплового стану силових трансформаторів. Вагомий внесок у розвиток теорії теплових процесів зроблено вченими Л. М. Шніцером, Р. Зодербергом, І.Ф. Филипповим, О.М. Залесьським, Г.О. Кукенковим, М.І. Булгаковим, В.В. Боднаром та іншими вченими. Існуючі методи оцінки теплового стану трансформаторів базуються на теплових схемах заміщення, які не розділяють обмотку на три фази і не враховують несиметричне навантаження фаз.

Аналіз науково-технічної вітчизняної і закордонної літератури показав, що праці, які безпосередньо присвячені нагріву силових трансформаторів при несиметричному перевантаженні фаз, діагностуванню таких режимів роботи силових трансформаторів сільських споживчих трансформаторних підстанцій, відсутні.

Аналіз пристроїв і технічних систем функціонального діагностування показав, що вони розраховані для застосування в трансформаторах потужністю 200 МВ·А і вище, а велика кількість параметрів, які контролюються даними системами, економічно не доцільна для трансформаторів сільських споживчих підстанцій.

Сформульована наукова гіпотеза: якщо за параметри функціонального діагностування взяти температуру верхніх шарів трансформаторного масла і кратності сил струмів в фазах, то можна одержати об'єктивну інформацію щодо нагріву обмоток силового трансформатора.

Тому необхідні дослідження процесів нагріву силового трансформатора під дією експлуатаційних впливів для встановлення залежності температури обмоток в функції температури масла і кратностей сил струмів в фазах та розробки пристроїв функціонального діагностування трансформаторів.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ НАГРІВУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ СИМЕТРИЧНОМУ ПЕРЕВАНТАЖЕННІ

Для дослідження теплових процесів в силовому трансформаторі при симетричному перевантаженні були записані диференційні рівняння теплового балансу трансформатора. При цьому силовий трансформатор в тепловому відношенні розглядався як гетерогенна система трьох однорідних тіл: обмотки (тіло 1), магнітопровода (тіло 2), масла (тіло 3). Теплова схема заміщення силового транс-

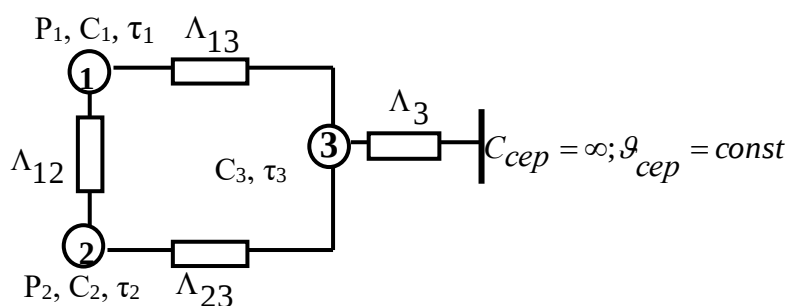


Рис. 1. Теплова схема заміщення силового трансформатора як системи трьох тіл.

форматора в тепловому відношенні розглядався як гетерогенна система трьох однорідних тіл: обмотки (тіло 1), магнітопровода (тіло 2), масла (тіло 3). Теплова схема заміщення силового транс-

форматора для вказаного варіанту представлена на рис.1.

На тепловій схемі введені наступні позначення:

- τ_1, τ_2, τ_3 — середні перевищення температур тіл 1, 2, 3 над температурою навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$;
 C_1, C_2, C_3 і $C_{сер}$ — теплоємності тіл 1, 2, 3 та навколишнього середовища, $\text{Дж}/^{\circ}\text{C}$;
 $\Lambda_{12}, \Lambda_{13}, \Lambda_{23}$ і Λ_3 — еквівалентні теплові провідності між тілами 1, 2, 3 та між тілом 3 і навколишнім середовищем, $\text{Вт}/^{\circ}\text{C}$;
 P_1, P_2 — втрати активної потужності в тілах 1, 2, Вт ;
 $\vartheta_{сер}$ — температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$.

Було зроблено такі припущення: теплоємності, еквівалентні теплові провідності не змінюються при зміні температури, теплоємність навколишнього середовища дорівнює нескінченності, а температура навколишнього середовища постійна.

Система диференціальних рівнянь теплового балансу трансформатора для кожного тіла має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} C_1 \cdot \frac{d\tau_1}{dt} + \Lambda_{12} \cdot (\tau_1 - \tau_2) + \Lambda_{13} \cdot (\tau_1 - \tau_3) &= P_{10} \cdot k^2 \cdot (1 + \alpha \cdot \tau_1); \\ C_2 \cdot \frac{d\tau_2}{dt} + \Lambda_{23} \cdot (\tau_2 - \tau_3) + \Lambda_{12} \cdot (\tau_1 - \tau_2) &= P_2; \\ C_3 \cdot \frac{d\tau_3}{dt} + \Lambda_3 \cdot \tau_3 - \Lambda_{13} \cdot (\tau_1 - \tau_3) - \Lambda_{23} \cdot (\tau_2 - \tau_3) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де k — кратність сили струму;

P_{10} — втрати активної потужності в обмотці при номінальному навантаженні та при температурі обмотки, яка дорівнює температурі навколишнього середовища, Вт ;

α — температурний коефіцієнт опору матеріалу обмоток, $1/^{\circ}\text{C}$;

t — поточний час, с .

Для подальших досліджень теплових процесів була розроблена і обґрунтована методика визначення еквівалентних теплових провідностей між тілами за результатами дослідів холостого ходу і короткого замикання.

Еквівалентні теплові провідності визначалися в результаті рішення системи рівнянь теплового балансу, яка складена для дослідів холостого ходу і короткого замикання:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= \Lambda_{12} \cdot (\tau_{1xx} - \tau_{2xx}) + \Lambda_{13} \cdot (\tau_{1xx} - \tau_{3xx}); \\ P_{2H} &= -\Lambda_{12} \cdot (\tau_{1xx} - \tau_{2xx}) + \Lambda_{23} \cdot (\tau_{2xx} - \tau_{3xx}); \\ 0 &= -\Lambda_{13} \cdot (\tau_{1xx} - \tau_{3xx}) - \Lambda_{23} \cdot (\tau_{2xx} - \tau_{3xx}) + \Lambda_3 \cdot \tau_{3xx}; \\ P_{1H} &= \Lambda_{12} \cdot (\tau_{1xx} - \tau_{2xx}) + \Lambda_{13} \cdot (\tau_{1xx} - \tau_{3xx}), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

- де P_{2H} – номінальні втрати активної потужності в магнітопроводі в досліді холостого ходу, $Вт$;
- $\tau_{1xx}, \tau_{2xx}, \tau_{3xx}$ – перевищення температур відповідно обмотки, магнітопровода, масла над температурою навколишнього середовища в досліді холостого ходу, $^{\circ}C$;
- $\tau_{1кз}, \tau_{2кз}, \tau_{3кз}$ – перевищення температур відповідно обмотки, магнітопровода, масла над температурою навколишнього середовища в досліді короткого замикання, $^{\circ}C$.

Рівняння для визначення еквівалентних теплових провідностей мають вигляд:

$$\Lambda_{12} = -\frac{(\tau_{1xx} - \tau_{3xx}) \cdot P_{1H}}{(\tau_{1xx} - \tau_{2xx}) \cdot (\tau_{1кз} - \tau_{3кз}) - (\tau_{1xx} - \tau_{3xx}) \cdot (\tau_{1кз} - \tau_{2кз})}. \quad (3)$$

$$\Lambda_{13} = \frac{(\tau_{1xx} - \tau_{2xx}) \cdot P_{1H}}{(\tau_{1xx} - \tau_{2xx}) \cdot (\tau_{1кз} - \tau_{3кз}) - (\tau_{1xx} - \tau_{3xx}) \cdot (\tau_{1кз} - \tau_{2кз})}. \quad (4)$$

$$\Lambda_{23} = \frac{P_{2H}}{(\tau_{2xx} - \tau_{3xx})} - \frac{(\tau_{1xx} - \tau_{3xx}) \cdot (\tau_{1xx} - \tau_{2xx}) \cdot P_{1H}}{(\tau_{2xx} - \tau_{3xx}) \cdot ((\tau_{1xx} - \tau_{2xx}) \cdot (\tau_{1кз} - \tau_{3кз}) - (\tau_{1xx} - \tau_{3xx}) \cdot (\tau_{1кз} - \tau_{2кз}))}. \quad (5)$$

$$\Lambda_3 = \frac{P_{2H}}{\tau_{3xx}}. \quad (6)$$

За результатами дослідів холостого ходу, короткого замикання та після розв'язання рівнянь (3 - 6) було отримано значення еквівалентних теплових провідностей для силового трансформатора ТМ - 160/10: $\Lambda_{12} = 40,1 \text{ Вт}/^{\circ}C$; $\Lambda_{13} = 130 \text{ Вт}/^{\circ}C$; $\Lambda_{23} = 52 \text{ Вт}/^{\circ}C$; $\Lambda_3 = 100 \text{ Вт}/^{\circ}C$.

Розв'язання системи рівнянь (1) відносно τ_1, τ_2, τ_3 операторним методом дозволило одержати рівняння нагріву обмотки, магнітопровода і масла:

$$\begin{aligned} \tau_1(t) = & \frac{R_1}{R} + \frac{L_1 \cdot p_1^2 + T_1 \cdot p_1 + R_1}{p_1 \cdot (3 \cdot K \cdot p_1^2 + 2 \cdot L \cdot p_1 + T)} \cdot e^{p_1 t} + \frac{L_1 \cdot p_2^2 + T_1 \cdot p_2 + R_1}{p_2 \cdot (3 \cdot K \cdot p_2^2 + 2 \cdot L \cdot p_2 + T)} \cdot e^{p_2 t} + \\ & + \frac{L_1 \cdot p_3^2 + T_1 \cdot p_3 + R_1}{p_3 \cdot (3 \cdot K \cdot p_3^2 + 2 \cdot L \cdot p_3 + T)} \cdot e^{p_3 t}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tau_2(t) = & \frac{R_2}{R} + \frac{L_2 \cdot p_1^2 + T_2 \cdot p_1 + R_2}{p_1 \cdot (3 \cdot K \cdot p_1^2 + 2 \cdot L \cdot p_1 + T)} \cdot e^{p_1 t} + \frac{L_2 \cdot p_2^2 + T_2 \cdot p_2 + R_2}{p_2 \cdot (3 \cdot K \cdot p_2^2 + 2 \cdot L \cdot p_2 + T)} \cdot e^{p_2 t} + \\ & + \frac{L_2 \cdot p_3^2 + T_2 \cdot p_3 + R_2}{p_3 \cdot (3 \cdot K \cdot p_3^2 + 2 \cdot L \cdot p_3 + T)} \cdot e^{p_3 t}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\tau_3(t) = \frac{R_3}{R} + \frac{T_3 \cdot p_1 + R_3}{p_1 \cdot (3 \cdot K \cdot p_1^2 + 2 \cdot L \cdot p_1 + T)} \cdot e^{p_1 t} + \frac{T_3 \cdot p_2 + R_3}{p_2 \cdot (3 \cdot K \cdot p_2^2 + 2 \cdot L \cdot p_2 + T)} \cdot e^{p_2 t} + \frac{T_3 \cdot p_3 + R_3}{p_3 \cdot (3 \cdot K \cdot p_3^2 + 2 \cdot L \cdot p_3 + T)} \cdot e^{p_3 t}, \quad (9)$$

де $K, L, T, R, L_1, T_1, R_1, L_2, T_2, R_2, L_3, T_3, R_3$ – коефіцієнти, які залежать від параметрів теплової схеми заміщення силового трансформатора (теплоємностей тіл і еквівалентних теплових провідностей між тілами) та величини втрат активних потужностей в обмотці і магнітопроводі;

p_1, p_2, p_3 – корні характеристичного рівняння, $1/c$.

З рівнянь (7) і (9) були отримані рівняння нагріву обмотки і масла при симетричному перевантаженні:

$$\tau_1(t) = \tau'_{1y} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T'}}\right) + \tau''_{1y} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T''}}\right) + \tau'''_{1y} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T'''}}\right); \quad (10)$$

$$\tau_1(t) = \tau'_{3y} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T'}}\right) + \tau''_{3y} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T''}}\right) + \tau'''_{3y} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T'''}}\right), \quad (11)$$

де $\tau'_{1y}, \tau''_{1y}, \tau'''_{1y}, \tau'_{3y}, \tau''_{3y}, \tau'''_{3y}$ – усталені значення парціальних перевищень температур обмотки і масла над температурою навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$;

T', T'', T''' – парціальні постійні часу нагріву, c .

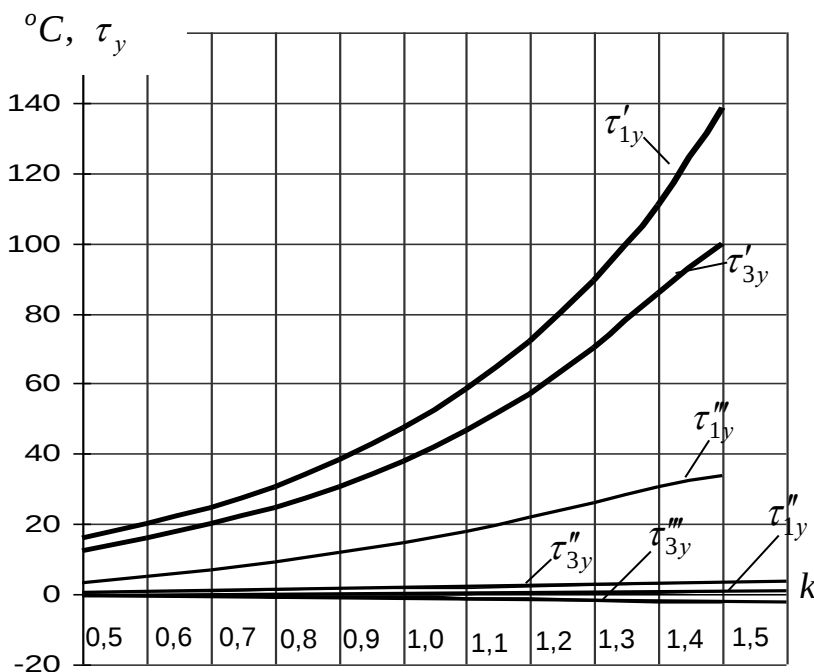


Рис. 2. Залежність зміни усталених парціальних складових перевищень температур обмоток, масла при різних кратностях сил струму для досліджуваного трансформатора.

Результати дослідження зміни усталених парціальних складових перевищень температур обмотки і масла при кратностях сил струму від 0,5 до 1,5 (рис. 2) показали, що усталені значення парціальних складових перевищень температур $\tau'_{3y}, \tau''_{3y}, \tau'''_{1y}$ зі зміною кратності сили струму змінюються незначно. Усталені значення парціальних складових $\tau'''_{1y}, \tau''_{1y}, \tau'''_{3y}, \tau''_{3y}$ настають швидко, тому рівняння нагріву обмотки і масла можна

навести в наступному вигляді:

$$\tau_1 = \tau_{1y} - \tau'_{1y} \cdot e^{-\frac{t}{T'}}; \quad (12)$$

$$\tau_3 = \tau_{3y} - \tau'_{3y} \cdot e^{-\frac{t}{T'}}, \quad (13)$$

де τ_{1y}, τ_{3y} – загальні усталені перевищення температур відповідно обмотки, масла над температурою навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$.

Обґрунтовано, що процес нагріву силового трансформатора при симетричному перевантаженні може бути описаний спрощеними рівняннями нагріву обмотки і масла відповідно (12), (13). При цьому похибка не перевершує 5 %.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ НАГРІВУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НЕСИМЕТРИЧНОМУ ПЕРЕВАНТАЖЕННІ ФАЗ

Для дослідження теплових процесів в силовому трансформаторі при несиметричному перевантаженні були записані диференційні рівняння теплового балансу трансформатора. При цьому силовий трансформатор в тепловому відношенні розглядався як гетерогенна система п'яти однорідних тіл: обмотки фази «А» (тіло 1), обмотки фази «В» (тіло 2), обмотки фази «С» (тіло 3), магнітопровода (тіло 4), масла (тіло 5). На тепловій схемі заміщення введені наступні позначення:

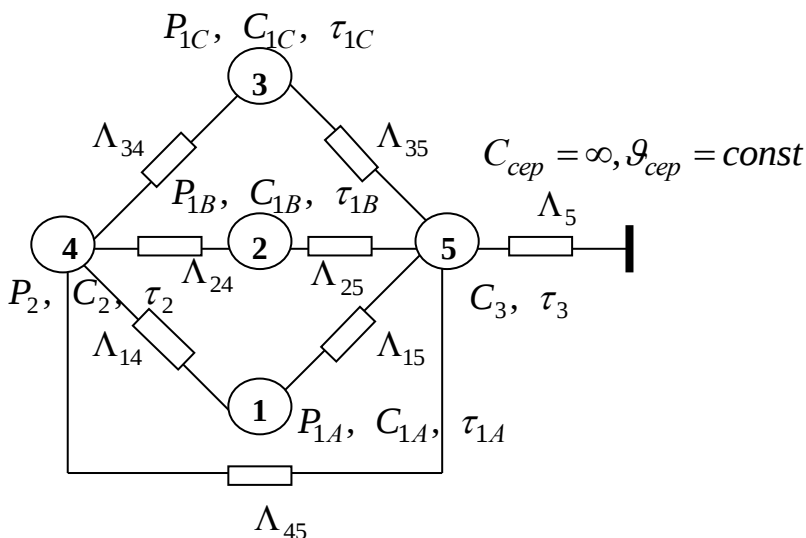


Рис. 3. Теплова схема заміщення силового трансформатора як системи п'яти тіл.

тепловому відношенні розглядався як гетерогенна система п'яти однорідних тіл: обмотки фази «А» (тіло 1), обмотки фази «В» (тіло 2), обмотки фази «С» (тіло 3), магнітопровода (тіло 4), масла (тіло 5). На тепловій схемі заміщення введені наступні позначення:

$\tau_{1A}, \tau_{1B}, \tau_{1C}$ – середні перевищення температур тіл 1, 2, 3 над температурою навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$;

$\Lambda_{14}, \Lambda_{15}$ – еквівалентні теплові провідності між тілами 1, 4, 5, $\text{Вт}/^{\circ}\text{C}$;

$\Lambda_{24}, \Lambda_{25}$ – еквівалентні теплові провідності між тілами 2, 4, 5, $\text{Вт}/^{\circ}\text{C}$;

$\Lambda_{34}, \Lambda_{35}$ – еквівалентні теплові провідності між тілами 3, 4, 5, $\text{Вт}/^{\circ}\text{C}$;

Λ_{45} і Λ_5 – еквівалентні теплові провідності між тілами 4, 5 та між тілом 5 і навколишнім середовищем, $\text{Вт}/^{\circ}\text{C}$;

C_{1A}, C_{1B}, C_{1C} – теплоємності тіл 1, 2, 3, $\text{Дж}/^{\circ}\text{C}$;

P_{1A}, P_{1B}, P_{1C} – втрати активної потужності в тілах 1, 2, 3, Вт .

Рівняння теплового балансу для даної схеми мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
C_{1A} \cdot \frac{d\tau_{1A}}{dt} + \Lambda_{14} \cdot (\tau_{1A} - \tau_2) + \Lambda_{15} \cdot (\tau_{1A} - \tau_3) &= P_{10A} \cdot k_A^2 (1 + \alpha \cdot \tau_{1A}); \\
C_{1B} \cdot \frac{d\tau_{1B}}{dt} + \Lambda_{24} \cdot (\tau_{1B} - \tau_2) + \Lambda_{25} \cdot (\tau_{1B} - \tau_3) &= P_{10B} \cdot k_B^2 (1 + \alpha \cdot \tau_{1B}); \\
C_{1C} \cdot \frac{d\tau_{1C}}{dt} + \Lambda_{34} \cdot (\tau_{1C} - \tau_2) + \Lambda_{35} \cdot (\tau_{1C} - \tau_3) &= P_{10C} \cdot k_C^2 (1 + \alpha \cdot \tau_{1C}); \\
C_2 \cdot \frac{d\tau_2}{dt} + \Lambda_{14} \cdot (\tau_{1A} - \tau_2) + \Lambda_{24} \cdot (\tau_{1B} - \tau_2) + \Lambda_{34} \cdot (\tau_{1C} - \tau_2) + \\
+ \Lambda_{45} \cdot (\tau_2 - \tau_3) &= P_2; \\
C_3 \cdot \frac{d\tau_3}{dt} + \Lambda_5 \cdot \tau_3 - \Lambda_{15} \cdot (\tau_{1A} - \tau_3) - \Lambda_{25} \cdot (\tau_{1B} - \tau_3) - \Lambda_{35} \cdot (\tau_{1C} - \tau_3) - \\
- \Lambda_{45} \cdot (\tau_2 - \tau_3) &= 0,
\end{aligned} \right\} \quad (14)$$

де k_A, k_B, k_C – кратності сил струмів в фазах «А», «В», «С»;
 $P_{10A}, P_{10B}, P_{10C}$ – втрати активної потужності в тілах 1, 2, 3 при температурах обмоток фаз, які дорівнюють температурі навколишнього середовища, Вт.

Розв'язання даної системи рівнянь операторним методом дозволило одержати, в кінцевому результаті, рівняння перевищення температури обмоток і масла над температурою навколишнього середовища:

$$\begin{aligned}
\tau_A(t) &= \tau'_{Ay} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'}}) + \tau''_{Ay} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T''}}) + \tau'''_{Ay} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'''}}) + \\
&+ \tau''''_{Ay} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T''''}}) + \tau'''''_{Ay} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'''''}}),
\end{aligned} \quad (15)$$

де $\tau'_{Ay}, \tau''_{Ay}, \tau'''_{Ay}, \tau''''_{Ay}, \tau'''''_{Ay}$ – усталені значення парціальних складових перевищення температури обмотки фази «А» над температурою навколишнього середовища, °C;

$T', T'', T''', T'''', T'''''$ – парціальні постійні часу нагріву, с.

$$\begin{aligned}
\tau_B(t) &= \tau'_{By} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'}}) + \tau''_{By} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T''}}) + \tau'''_{By} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'''}}) + \\
&+ \tau''''_{By} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T''''}}) + \tau'''''_{By} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'''''}}),
\end{aligned} \quad (16)$$

де $\tau'_{By}, \tau''_{By}, \tau'''_{By}, \tau''''_{By}, \tau'''''_{By}$ – усталені значення парціальних складових перевищення температури обмотки фази «В» над температурою навколишнього середовища, °C.

$$\begin{aligned}\tau_C(t) = & \tau'_{Cy} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'}}) + \tau''_{Cy} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T''}}) + \tau'''_{Cy} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'''}}) + \\ & + \tau''''_{Cy} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T''''}}) + \tau'''''_{Cy} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'''''}}),\end{aligned}\quad (17)$$

де τ'_{1Cy} , τ''_{1Cy} , τ'''_{1Cy} , τ''''_{1Cy} , τ'''''_{1Cy} - усталені значення парціальних складових перевищення температури обмотки фази «С» над температурою навколишнього середовища, °С.

$$\begin{aligned}\tau_3(t) = & \tau'_{3y} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'}}) + \tau''_{3y} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T''}}) + \tau'''_{3y} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'''}}) + \\ & + \tau''''_{3y} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T''''}}) + \tau'''''_{3y} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'''''}}),\end{aligned}\quad (18)$$

де τ'_{3y} , τ''_{3y} , τ'''_{3y} , τ''''_{3y} , τ'''''_{3y} - усталені значення парціальних складових перевищення температури масла над температурою навколишнього середовища, °С.

З урахуванням тих самих умов, що й при записі рівнянь (12) та (13), були отримані спрощенні рівняння нагріву обмоток фаз і масла:

$$\tau_{1A} = \tau_{1Ay} - \tau'_{1Ay} \cdot e^{-\frac{t}{T'}}; \quad (19)$$

$$\tau_{1B} = \tau_{1By} - \tau'_{1By} \cdot e^{-\frac{t}{T'}}; \quad (20)$$

$$\tau_{1C} = \tau_{1Cy} - \tau'_{1Cy} \cdot e^{-\frac{t}{T'}}; \quad (21)$$

$$\tau_3 = \tau_{3y} - \tau'_{3y} \cdot e^{-\frac{t}{T'}}, \quad (22)$$

де τ_{1Ay} , τ_{1By} , τ_{1Cy} , τ_{3y} - загальні усталені значення перевищення температури обмоток відповідно фаз «А», «В», «С», масла над температурою навколишнього середовища, °С.

При нагріванні між обмотками фаз та маслом виникають перепади температур ($\Delta\tau$), які визначаються наступним чином:

$$\Delta\tau_A = (\tau_{1Ay} - \tau_{3y}) - (\tau'_{1Ay} - \tau'_{3y}) \cdot e^{-\frac{t}{T'}}; \quad (23)$$

$$\Delta\tau_B = (\tau_{1By} - \tau_{3y}) - (\tau'_{1By} - \tau'_{3y}) \cdot e^{-\frac{t}{T'}}; \quad (24)$$

$$\Delta\tau_C = (\tau_{1Cy} - \tau_{3y}) - (\tau'_{1Cy} - \tau'_{3y}) \cdot e^{-\frac{t}{T'}}. \quad (25)$$

Після запису аналітичних виразів величин τ_{1Ay} , τ_{1By} , τ_{1Cy} , τ_{3y} , τ'_{1Ay} , τ'_{1By} , τ'_{1Cy} , τ'_{3y} , T' у функції кратностей сил струмів в фазах трансформатора та після їх апроксимації методом найменших квадратів були отримані наступні рівняння перепадів температур і першої парціальної постійної часу:

$$\Delta \tau_A = (A_1 \cdot k_A + A_2 \cdot (k_B + k_C) - A_3) - (A_4 \cdot k_A + A_5 \cdot (k_B + k_C) - A_6) \cdot e^{-\frac{t}{T'}}; \quad (26)$$

$$\Delta \tau_B = (A_1 \cdot k_B + A_2 \cdot (k_A + k_C) - A_3) - (A_4 \cdot k_B + A_5 \cdot (k_A + k_C) - A_6) \cdot e^{-\frac{t}{T'}}; \quad (27)$$

$$\Delta \tau_C = (A_1 \cdot k_C + A_2 \cdot (k_B + k_A) - A_3) - (A_4 \cdot k_C + A_5 \cdot (k_B + k_A) - A_6) \cdot e^{-\frac{t}{T'}}; \quad (28)$$

$$T' = D_1 + D_2 \cdot (k_A + k_B + k_C), \quad (29)$$

де $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ – коефіцієнти, $^{\circ}\text{C}$;

D_1, D_2 – коефіцієнти, с .

Поточні температури обмоток фаз трансформатора наступні:

$$\vartheta_A = \vartheta_M + \Delta \tau_A; \quad (30)$$

$$\vartheta_B = \vartheta_M + \Delta \tau_B; \quad (31)$$

$$\vartheta_C = \vartheta_M + \Delta \tau_C, \quad (32)$$

де ϑ_M – температура масла, $^{\circ}\text{C}$.

Обґрунтовано, що процес нагріву силового трансформатора при несиметричному перевантаженні може бути описаний спрощеними рівняннями (19), (20), (21), (22). При цьому похибка не перевищує 2,4%.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАГРІВУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІД ДІЄЮ НАДСТРУМІВ

У випадку дії надструмів процес нагріву силового трансформатора розглянуто починаючи з гарячого стану. Так як перехідний процес при дії надструмів швидкоплинний і відбувається за адіабатичним законом, то диференціальне рівняння теплового балансу має вигляд:

$$C_1 \cdot d\tau_1 = P_{10} \cdot (1 + \alpha \cdot \tau_1) \cdot dt, \quad (33)$$

де τ_1 – поточне перевищення температури обмоток над температурою навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$.

Після розв'язання цього рівняння був одержаний вираз для максимального значення перевищення температури обмоток над температурою навколишнього середовища в кінці дії надструму при $\alpha = 0,0041/^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_{1\max} = (250 + \tau_{1H}) \cdot e^{K_H} - 250, \quad (34)$$

де K_H – критерій нагріву обмоток силового трансформатора при дії надструму.

Критерій нагріву визначається наступним чином:

$$K_H = \gamma \cdot \Pi_I, \quad (35)$$

де γ – конструкційний коефіцієнт, $1/(A^2 \cdot \text{с})$;

Π_I – імпульс квадрату надструму, $A^2 \cdot \text{с}$.

Конструкційний коефіцієнт:

$$\gamma = \frac{3 \cdot \alpha \cdot r_H}{C_1}, \quad (36)$$

де r_H - активний опір однієї фази приведенного трансформатора при початковій номінальній температурі обмотки, Ом.

Імпульс квадрату надструму:

$$II_I = I_H^2 \cdot k^2 \cdot t_{cm}, \quad (37)$$

де t_{cm} - час дії надструму, с.

Для досліджуваного трансформатора конструкційний коефіцієнт дорівнює $3 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/(A^2 \cdot c)$ при імпульсі квадрату надструму, який дорівнює $2352 A^2 \cdot c$, критерій нагріву дорівнює 0,007.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Обґрунтовано параметри функціонального діагностування експлуатаційних режимів роботи силового трансформатора, за які обрано температуру масла і сили струмів у фазах.

За результатами теоретичних досліджень розроблена математична модель функціонального діагностування експлуатаційних режимів роботи силового трансформатора, за якою визначається поточна температура найбільш нагрітої точки обмотки фаз на i – й ділянці:

$$\begin{aligned} \vartheta_{Ai} = & \vartheta_{mi} + \Delta\tau_{Ay(i)} + (\Delta\tau'_{Ay(i-1)} - \Delta\tau'_{Ay(i)} + (250 + \Delta\tau_{Ay(i-1)}) \times \\ & \times e^{\gamma \cdot II_{IAi}} - 250) \cdot e^{\frac{\Delta t}{T'}} + 13; \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_{Bi} = & \vartheta_{mi} + \Delta\tau_{By(i)} + (\Delta\tau'_{By(i-1)} - \Delta\tau'_{By(i)} + (250 + \Delta\tau_{By(i-1)}) \times \\ & \times e^{\gamma \cdot II_{IBi}} - 250) \cdot e^{\frac{\Delta t}{T'}} + 13; \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_{Ci} = & \vartheta_{mi} + \Delta\tau_{Cy(i)} + (\Delta\tau'_{Cy(i-1)} - \Delta\tau'_{Cy(i)} + (250 + \Delta\tau_{Cy(i-1)}) \times \\ & \times e^{\gamma \cdot II_{ICi}} - 250) \cdot e^{\frac{\Delta t}{T'}} + 13, \end{aligned} \quad (40)$$

де ϑ_{mi} - поточна температура масла, °C;
 $\Delta\tau_{Ay(i)}, \Delta\tau_{By(i)}, \Delta\tau_{Cy(i)}$ - усталені значення перепадів температур обмоток відповідно фаз «А», «В», «С» на i – й ділянці, °C;
 $\Delta\tau'_{Ay(i)}, \Delta\tau'_{By(i)}, \Delta\tau'_{Cy(i)}$ - усталені значення перших парціальних складових перепадів температур обмоток відповідно фаз «А», «В», «С» на i – й ділянці, °C;
 $\Delta\tau'_{Ay(i-1)}, \Delta\tau'_{By(i-1)}, \Delta\tau'_{Cy(i-1)}$ - усталені значення перших парціальних складових перепадів температур обмоток відповідно фаз «А», «В», «С» на $(i-1)$ ділянці, °C;

γ

- коефіцієнт, що характеризує конструкційні параметри трансформатора, $1/(A^2 \cdot c)$;

$\Pi_{IA_i}, \Pi_{IB_i}, \Pi_{IC_i}$ - імпульс квадрату надструму відповідно в фазах «А», «В», «С» на i -ій ділянці, $A^2 \cdot c$.

Структурна схема моделі функціонального діагностування силового трансформатора наведена на рис. 4.



Рис. 4. Структурна схема моделі функціонального діагностування.

Для перевірки адекватності математичної моделі функціонального діагностування проводилися експериментальні дослідження на діючому силовому трансформаторі ТМ - 160 / 10 - 0,4 при несиметричному навантаженні фаз. В процесі дослідження проводилися вимірювання сили струму у фазах трансформатора, температури верхніх шарів масла, температури навколишнього середовища, активних опорів обмоток фаз при різних

значеннях сили струму у фазах через годину після зміни навантаження. Температури обмоток визначались через значення активних опорів обмоток фаз трансформатора, що вимірювались. На рис. 5, 6, 7, 8 показано точками експериментальні значення температур.

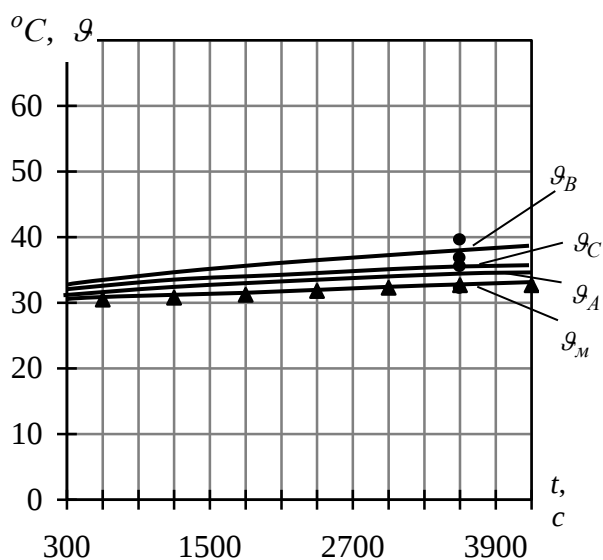


Рис. 5. Теоретичні залежності і експериментальні значення температур обмоток фаз і масла при $k_A = 0,2$; $k_B = 0,65$; $k_C = 0,3$; $\theta_{cep} = 30^\circ C$.

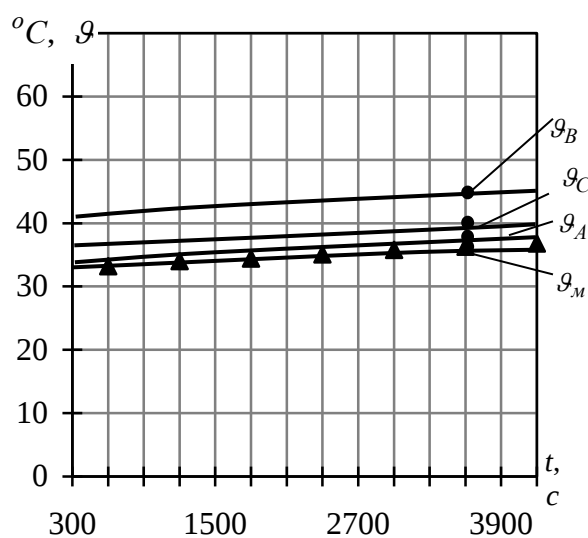


Рис. 6. Теоретичні залежності і експериментальні значення температур обмоток фаз і масла при $k_A = 0,21$; $k_B = 0,78$; $k_C = 0,46$; $\theta_{cep} = 30^\circ C$.

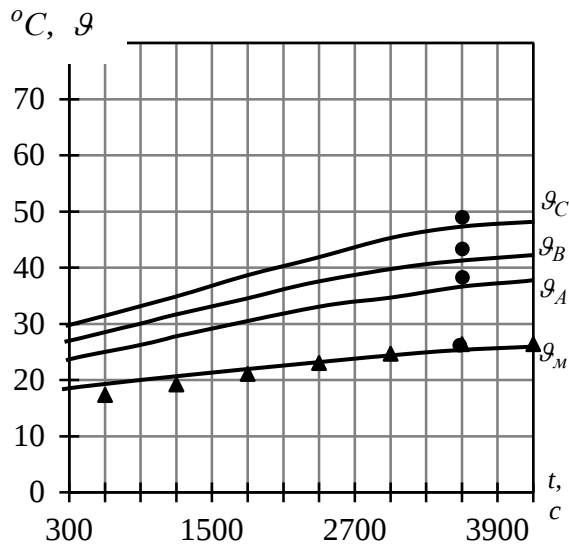


Рис. 7. Теоретичні залежності і експериментальні значення температур обмоток фаз і масла при $k_A = 0,82$; $k_B = 1,0$; $k_C = 1,15$; $\vartheta_{сер} = 16^\circ C$.

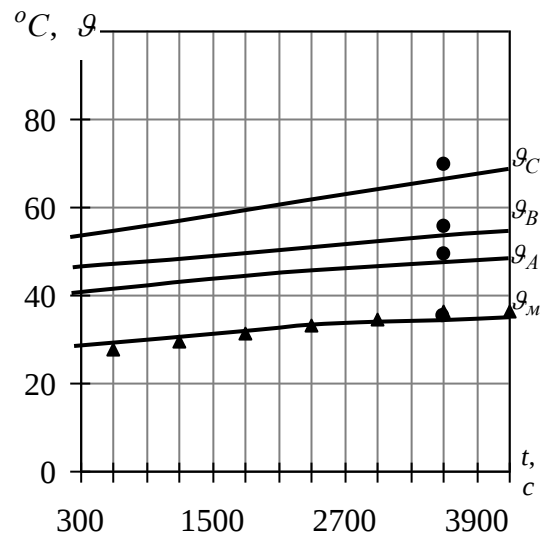


Рис. 8. Теоретичні залежності і експериментальні значення температур обмоток фаз і масла при $k_A = 0,82$; $k_B = 1,0$; $k_C = 1,08$; $\vartheta_{сер} = 16^\circ C$.

Порівняння теоретичних та експериментальних залежностей $\vartheta_A = f(t, k_A, k_B, k_C)$; $\vartheta_B = f(t, k_A, k_B, k_C)$; $\vartheta_C = f(t, k_A, k_B, k_C)$; $\vartheta_M = f(t, k_A, k_B, k_C)$ для силового трансформатора ТМ -160/10, поданих на рис. 5, 6 при температурі навколишнього середовища $30^\circ C$ і на рис. 7, 8 при температурі навколишнього середовища $16^\circ C$, показує, що отримані результати експериментальних досліджень підтверджують справедливості математичних моделей функціонального діагностування. Максимальна відносна похибка визначення температури обмоток для досліджуваного силового трансформатора не перевищує 5 % при різних значеннях кратностей сил струму.

РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

За результатами теоретичних і експериментальних досліджень розроблені технічні вимоги до пристрою функціонального діагностування експлуатаційних режимів роботи силового трансформатора.

Пристрій діагностування режимів роботи передбачає:

- вимірювання сили струму в фазах трансформатора та температури масла;
- розрахунок температур обмоток фаз, сумарного зношення ізоляції кожної фази трансформатора;
- формування та передачу вихідного сигналу у випадку перебільшення температур обмоток фаз допустимого значення;
- накопичення, зберігання даних про тепловий стан силового трансформатора;
- налагоджування пристрою для будь-яких типів трансформаторів.

Блок-схема пристрою діагностування режимів роботи силового трансформатора наведена на рис. 9.

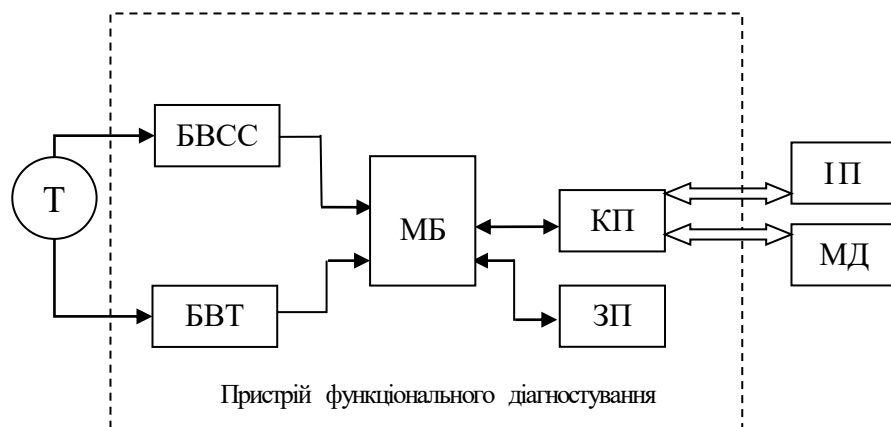


Рис. 9. Блок-схема пристрою діагностування:

Т- силовий трансформатор; БВСС- блок вимірювання сили струму навантаження; БВТ- блок вимірювання температури масла; МБ- мікроконтролер; ЗП- запам'ятовуючий пристрій; КП- комутаційний порт; МД-блок обміну даними; ІП-інтерфейсний пристрій.

Розроблено принципову електричну схему пристрою діагностування. Алгоритм функціонування пристрою визначається програмним управлінням мікроконтролера, так як він є основним його елементом. Програмне забезпечення дозволяє контролювати тепловий стан силового трансформатора, формувати попереджувальний

сигнал у разі перебільшення температур обмоток фаз допустимого значення та передавати його на диспетчерський пункт з використанням GSM/GPRS - модема. Управління модемом здійснюється за допомогою АТ – команд.

Проведено оцінку кількісних показників надійності пристрою діагностування: ймовірність безвідмовної роботи пристрою 0,986, середній час безвідмовної роботи дорівнює 80450,5 год.

Виробничі випробування пристрою діагностування режимів роботи силового трансформатора на підстанціях Приморського РЕМ Запорізької області та Тячівського РЕМ Закарпатської області показали, що під час дослідів відмов трансформаторів та елементів блоків пристрою діагностування не було. Річний економічний ефект на одну трансформаторну підстанцію склав 2300 грн., термін окупності капіталовкладень дорівнює 1 року.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень для вирішення науково-технічного завдання, що полягає в обґрунтуванні методу та розробці технічного засобу функціонального діагностування експлуатаційних режимів роботи силових трансформаторів сільських споживчих підстанцій з метою підвищення їх експлуатаційних показників. На базі отриманих результатів дослідження зроблені наступні висновки:

1. Теоретично обґрунтовано необхідність розгляду теплових процесів в силовому трансформаторі як в гетерогенній системі, що складається з трьох тіл при симетричному перевантаженні та п'яти тіл при несиметричному перевантаженні.
2. Запропонована методика визначення еквівалентних теплових провідностей між тілами теплової схеми заміщення та навколишнім середовищем на базі експериментальних даних, що отримані в досліді холостого ходу та короткого

замикання. Для досліджуваного трансформатору теплові провідності дорівнюють: між обмоткою та маслом – $130 \text{ Bm}/^{\circ}\text{C}$, між обмоткою та магнітопроводом – $40,1 \text{ Bm}/^{\circ}\text{C}$, між магнітопроводом та маслом – $52 \text{ Bm}/^{\circ}\text{C}$, між маслом та навколишнім середовищем – $100 \text{ Bm}/^{\circ}\text{C}$.

3. Отримані рівняння нагріву кожного тіла при симетричному перевантаженні, що складаються з трьох парціальних усталених перевищень температури тіла над температурою навколишнього середовища та трьох парціальних постійних часу нагріву. Для досліджуваного трансформатору парціальні постійні часу нагріву в номінальному режимі роботи дорівнюють: перша – 10525 с , друга – 1666 с , третя – 246 с . Показано, що з достатнім ступенем точності рівняння нагріву тіл можуть бути записані як рівняння різниці загального усталеного перевищення температури тіла над температурою навколишнього середовища та першою парціальною експонентою.

4. Отримані рівняння нагріву кожного тіла при несиметричному перевантаженні, що складаються з п'яти парціальних усталених перевищень температури тіла над температурою навколишнього середовища та п'яти парціальних постійних часу нагріву. Для досліджуваного трансформатору парціальні постійні часу нагріву в номінальному режимі роботи дорівнюють: перша – 10525 с , друга – 1666 с , третя і четверта – 246 с , п'ята – 246 с . Показано, що з достатнім ступенем точності рівняння нагріву тіл можуть бути записані як рівняння різниці загального усталеного перевищення температури тіла над температурою навколишнього середовища та першою парціальною експонентою.

5. Для опису теплових процесів при дії надструмів одержано рівняння нагріву обмотки як адіабатичного процесу. У цьому рівнянні використані наступні показники: імпульс квадрату надструму, конструкційний коефіцієнт, критерій нагріву. Для досліджуваного трансформатора конструкційний коефіцієнт дорівнює $3 \cdot 10^{-6} 1/(A^2 \cdot c)$ при імпульсі квадрату надструму, який дорівнює $2352 A^2 \cdot c$, критерій нагріву дорівнює $0,007$.

6. Показано, якщо за параметр діагностування експлуатаційних режимів роботи силового трансформатора прийняти температуру масла, то додаткове теплове зношення ізоляції на одне перевантаження неприпустимо перевищує значення, що рекомендовані «Правилами експлуатації силових трансформаторів». Для досліджуваного трансформатора при перевантаженні на 20% додатковий знос ізоляції вище за допустимі значення в $3,7$ рази, при перевантаженні на 75% – в $1,45$ рази.

7. Показано, якщо за параметр діагностування експлуатаційних режимів роботи силового трансформатора прийняти сили струмів по фазах, то при допустимих і аварійних перевантаженнях додатковий тепловий знос ізоляції на одне перевантаження в $4 - 5$ разів відрізняється при різних температурах навколишнього середовища.

8. Запропонована методика функціонального діагностування експлуатаційних режимів роботи силових трансформаторів сільських споживчих підстанцій за температурою масла та за кратностями сил струмів у фазах. Експериментальна перевірка показала, що запропонована модель функціонального діагностування

з достатнім ступенем точності описує фактичні процеси нагріву обмоток силового трансформатора. Для досліджуваного трансформатора значення температури найбільш нагрітої точки обмотки, що одержані експериментально, відрізняються від значення температури, що одержані з моделі не більше, ніж на 5 %.

9. Розроблено пристрій функціонального діагностування експлуатаційних режимів роботи силового трансформатора. Ймовірність безвідмовної роботи пристрою складає 0,986; середній час безвідмовної роботи – 80450,5 годин. Пристрій впроваджений в Приморському РЕМ Запорізької області і в Тячівському РЕМ Закарпатської області. Річний економічний ефект на одну трансформаторну підстанцію складає 2300 грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Овчаров В.В., Безменнікова Л.М. Теоретичне обґрунтування визначення теплових провідностей у силових трансформаторах // Праці ТДАТА. - Випуск 19, - Мелітополь: ТДАТА, 2004. - С.18-21.
2. Овчаров В.В., Безменнікова Л.М. Аналітичне дослідження залежності температури обмоток силового трансформатора у функції температури масла і кратності сили струму // Праці ТДАТА. - Випуск 32, - Мелітополь: ТДАТА, 2005. - С.39-43.
3. Овчаров В.В., Безменнікова Л.Н. Исследование тепловых переходных процессов в силовых трансформаторах при воздействии сверхтоков // Праці ТДАТА. - Випуск 45, - Мелітополь: ТДАТА, 2006. - С.32-39.
4. Безменнікова Л.М. Математична модель діагностування функціонального стану силових трансформаторів сільських підстанцій // Праці ХНТУ-СГ. - Випуск 43, том1. -Харків: ХНТУГС, 2006. - С.197-201.
5. Безменнікова Л.М., Переверзєв Д.М. Пристрій діагностування експлуатаційних режимів роботи силового трансформатора // Матеріали науково-технічної конференції магістрів та студентів ТДАТА. - Вип.1, том 2. - Мелітополь: ТДАТА, 2006. - С.18-19.
6. Безменнікова Л.М. Аналіз пошкоджень силових трансформаторів сільських підстанцій. // Праці ТДАТА.- Випуск 19, - Мелітополь: ТДАТА, 2007. – С.129 -133.
7. Безменнікова Л.Н. Исследование нагрева силового трансформатора при неравномерной нагрузке фаз // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. №6, 2007. - С.29 – 35.
8. Безменнікова Л.Н. Устройство функционального диагностирования силовых трансформаторов. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету / Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика. – Дніпродзержинск: ДДТУ, 2007. - С.467-468.

АНОТАЦІЯ

Безменнікова Л. М. Діагностування експлуатаційних режимів роботи силових трансформаторів сільських споживчих підстанцій.

- Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь, 2007.

Містить результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів нагріву силового трансформатора порівняно з номінальним режимом роботи при симетричному, несиметричному перевантаженні і дії надструмів. Розроблена методика визначення параметрів теплової схеми заміщення силового трансформатора з використанням дослідів холостого ходу і короткого замикання. Запропонована методика функціонального діагностування експлуатаційних режимів роботи силових трансформаторів сільських споживчих підстанцій за температурою масла та за кратно-стями сил струмів у фазах. За результатами досліджень розроблена мікропроцесорна система функціонального діагностування силового трансформатора сільських споживчих підстанцій. Здійснено впровадження пристрою діагностування у виробництво. Наведені дані щодо економічної ефективності розробленого пристрою при його експлуатації.

Ключові слова – процес нагріву, номінальний режим, симетричне перевантаження, несиметричне перевантаження, кратність сили струму, надструм, мікропроцесорна система, пристрій функціонального діагностування режимів роботи.

АННОТАЦИЯ

Безменникова Л.Н. Диагностирование эксплуатационных режимов работы силовых трансформаторов сельских потребительских подстанций. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнологические комплексы и системы. – Таврический государственный агротехнологический университет, Мелитополь, 2007.

Обоснована актуальность работы, рассмотрено состояние вопроса, определены цель и задачи исследований. Анализ работ посвященных нагреву силовых трансформаторов, разработке устройств диагностирования режимов работы силовых трансформаторов в эксплуатационных условиях, позволил обобщить и классифицировать методы и средства диагностирования, а также сформулировать научную гипотезу.

Получены выражения для определения эквивалентных тепловых проводимостей между телами тепловой схемы замещения и окружающей средой на базе экспериментальных данных, полученных в опытах холостого хода и короткого замыкания.

Проведен анализ процесса нагрева силового трансформатора как гетерогенной системы в сравнении с номинальным режимом работы при симметричной, несимметричной перегрузке фаз и под действием сверхтоков.

Обосновано, что процессы нагрева силового трансформатора при симметричной и несимметричной перегрузках могут быть описаны упрощенными уравнениями нагрева, которые представляют разность установившегося превышения температуры тела над температурой окружающей среды и первой парциальной экспоненты каждого тела. При этом ошибка не превышает 5 %.

Для описания теплового процесса при действии сверхтока получено уравнение нагрева обмотки как адиабатического процесса. В этом уравнении использованы следующие показатели: импульс квадрата сверхтока, конструкционный коэффициент, критерий нагревания.

Предложена методика функционального диагностирования эксплуатационных режимов работы силовых трансформаторов сельских потребительских подстанций по температуре масла и кратностям сил токов в фазах. Экспериментальная проверка показала, что предложенная модель функционального диагностирования с достаточной степенью точности описывает фактические процессы нагрева обмоток силового трансформатора. При этом отклонение экспериментальных данных от теоретических не превышает 5 %.

На основании теоретических и экспериментальных исследований процессов нагрева силового трансформатора разработана микропроцессорная система функционального диагностирования, которая осуществляет контроль температур обмоток фаз, формирование и передачу сигнала по средствам GSM/GPRS - модема. Устройство внедрено в Приморском РЭС Запорожской области и в Тячевском РЭС Закарпатской области. Годовой экономический эффект на одну трансформаторную подстанцию составляет 2300 грн., вероятность безотказной работы устройства 0,986, среднее время безотказной работы – 80450,5 ч.

Ключевые слова – процесс нагрева, симметричные перегрузки, несимметричные перегрузки, кратность силы тока, сверхток, микропроцессорная система, устройство функционального диагностирования режимов работы.

SUMMARY

Bezmennikova L. Diagnosing of power transformers operating conditions operation of rural consumer substations. - Manuscript.

Dissertation on competition of candidate technical science scientific degree on speciality 05.09.03 - electro technological complexes and systems. - Tavria state agrotechnological university, Melitopol, 2007.

The dissertation contains theoretical and experimental researches results of power transformer heating processes compared with the nominal operation mode at the symmetrical, asymmetrical overload and additional currents activity.

Definition procedure of power transformer thermal equivalent circuit parameters with use of open-circuit and short circuit tests is developed.

The power transformers operating conditions operation functional diagnosing procedure of rural consumer substations on oil temperature and currents forces multiplicities in phases is offered.

By researches results the power transformer functional diagnosing microprocessor system of rural consumer substations is developed.

Introduction of diagnosing device in production is carried out. Data about device efficiency at its operation are cited.

Key words - heating process, symmetrical overloads, asymmetrical overloads, multiplicity of current intensity, additional current, microprocessor system, modes, operation functional diagnosing device.

