

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Борецький Владислав Олегович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Система діагностування силового трансформатора по тепловим параметрам
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Борецький В.О.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Соколовський Олег Феліксович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Борецький В.О. Система діагностування силового трансформатора по тепловим параметрам. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

Метою роботи є пропонування методики, на основі якої можна створювати пристрої теплового захисту та діагностування силового трансформатора тільки на основі безпосереднього вимірювання температури поверхні його бака і навколишнього повітря.

Основна ціль роботи – підвищення вивчення теплових процесів які відбуваються в масляному трансформаторі під час його роботи.

Ключові слова: силовий трансформатор, система діагностування, теплові процеси.

ABSTRACT

V.O. Boretskyi Power transformer diagnostics system based on thermal parameters. Qualifying work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

The purpose of the work is to propose a methodology based on which it is possible to create thermal protection devices and diagnose a power transformer only on the basis of direct measurement of the surface temperature of its tank and the surrounding air.

The main goal of the work is to improve the study of thermal processes that occur in an oil transformer during its operation.

Key words: power transformer, diagnostics system, thermal processes.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АДАПТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО УСТАТКУВАННЯ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ	6
1.1 Узагальнена математична модель теплових процесів пристрої електроенергетики	6
1.2 Алгоритм для адаптації математичної моделі до реальних параметрів пристрою електроенергетики	11
Висновки по розділу 1	16
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОГО ОЛІВНОГО ТРАНСФОРМАТОРУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ЙОГО БАКА	17
2.1 Структурна схема теплових процесів силового масляного трансформатора	18
2.2 Методика розрахунку теплового опору внутрішнього навколишнього середовища	21
Висновки по розділу 2	31
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	33

ВСТУП

Основне обладнання систем електропостачання - це генератори, трансформатори, проводи, кабелі, електродвигуни та ін. При роботі під навантаженням усі ці об'єкти мають втрати активної потужності, що розсіюються, як правило, у вигляді тепла. У разі перевантаження або зовнішніх аварійних режимів температура їх окремих частин може перевищити допустиме значення, тобто виникне перегрів. Якщо погіршаться умови охолодження через засмічення тепловідвідних шляхів або виростуть діелектричні втрати в ізоляції об'єкта, то з'явиться його додаток, т. б. аномальне нагрівання.

Багато робіт було присвячено питанням раннього діагностування силових трансформаторів, кабелів та електродвигунів за тепловими параметрами. У цих роботах була вироблена загальна концепція, в відповідно з якої потрібна математична модель теплових процесів об'єкта, що дозволяє в реальному часі розраховувати температури найбільш нагрітих точок його основних частин, і алгоритм виявлення аномального нагріву, обумовленого розвитком несправностей у цьому об'єкті. Запропоновані методики дозволяють виявити аномальне нагрівання об'єкта до того, як температури його частин досягнуто критичних значень.

Силові трансформатори – найдорожчі елементи в системі електропостачання, тому за нинішнього суттєвого недовантаження трансформаторів держава несе значні фінансові витрати. Максимальне завантаження трансформаторів на підприємствах, яке визначається як відношення півгодинного максимуму навантаження до номінальної потужності трансформатора, рідко перевищує 60%.

Це означає, що на кожен кВА потужності, що передається, при півгодинному максимумі навантаження встановлюють 1,5-3 кВА трансформаторної потужності. Ця ситуація, зокрема, обумовлена тим, що з тривалою історією експлуатації масляних трансформаторів теплові процеси у них до кінця не вивчені. І, перш за все, тому, що технічно складно виміряти температуру обмотки, провід якої знаходиться під високою напругою.

Виходячи з вище сказаного в роботі запропонована система діагностування силового трансформатора по тепловим параметрам.

Метою роботи є пропонування методики, на основі якої можна створювати пристрої теплового захисту та діагностування силового трансформатора тільки на основі безпосереднього вимірювання температури поверхні його бака і навколишнього повітря.

Основна ціль роботи – підвищення вивчення теплових процесів які відбуваються в масляному трансформаторі під час його роботи.

Методи дослідження . В роботі використовувались методи теорії кіл, теоретичного математичного аналіз та імітаційного моделювання.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Борецький В.О. УЗАГАЛЬНЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИСТРОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ

Студентські наукові читання : збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 березня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. 129 с.

Соколовський О. Ф., Борецький В.О. СТРУКТУРНА СХЕМА ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Студентські наукові читання : збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 березня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. 134 с.

РОЗДІЛ 1

АДАПТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО УСТАТКУВАННЯ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

При розробці математичних моделей теплових процесів електрообладнання з'ясувалося, що для їх реалізації в рамках мікропроцесорного приладу необхідні алгоритми, достатньо прості і в той же час які враховують реальні параметри об'єктів. Було запропоновано розробити математичні моделі самоналаштованими, т. б. адаптивними за рахунок безперервного вимірювання температури поверхності об'єкта, температури навколишнього середовища, його напруг і струмів і постійного коригування параметрів моделі для розрахунку його внутрішніх температур.

1.1 Узагальнена математична модель теплових процесів пристрої електроенергетики

Моделювання теплових процесів електрообладнання на основі малої кількості теплових однорідних тіл – досить поширена практика у всьому світі. Наприклад, в [4] силовий масляний трансформатор розглядається як система трьох однорідних тіл: обмотки, оливи та магнітопроводу. На основі такої моделі був створений стандарт МЕК [4] з розрахунку навантажувальної здатності силових трансформаторів і аналогічний вітчизняний стандарт ДСТУ 2860-94.

У ДСТУ 2860-94[7] силові кабелі розглядаються як система з чотирьох однорідних тіл: ізоляції жил, поясної ізоляції, броні та захисної оболонки. Подібні моделі використовують і електродвигуни. Так, в [5] електродвигун представлений як система з двох однорідних тел: статора і ротора.

Враховуючи наявний у літературі матеріал, а також моделі, створені раніше, розробимо узагальнену математичну модель теплових процесів, котра може бути використана практично для будь-якого пристрою системи електропостачання.

Як показано в [4], [6], порядок характеристичного рівняння моделі не повинен бути вище чотирьох, тому що в іншому випадку висновок

аналітичних розрахункових співвідношень, необхідних для побудови алгоритмів діагностування, практично неможливий через їхню громіздкість. Відповідно, кількість теплових однорідних тіл, в яких враховуються теплоємності, має бути не вище чотирьох.

У кожній моделі потрібна наявність однорідного тіла, що характеризує теплообмін модельованого об'єкта з навколишнього середовищем. У [2], [8] таке однорідне тіло запропоновано називати «внутрішнє навколишнє середовище» у тому сенсі, що воно моделює частину навколишнього середовища, температура якого залежить від температури поверхні об'єкта. Так, наприклад, для силових трансформаторів це буде частина навколишнього повітря, а для силових кабелів, прокладених в траншеях, - частина ґрунту.

Отже, з можливих чотирьох однорідних тіл одне характеризуватиме внут- докільля, а три, що залишилися, – основні елементи конструкції модельованого об'єкт. Назвемо умовно ці тіла «Елемент 1», «Елемент 2» та «Елемент 3». На рис. 1.1. показана структурна схема теплових процесів у такій системі.

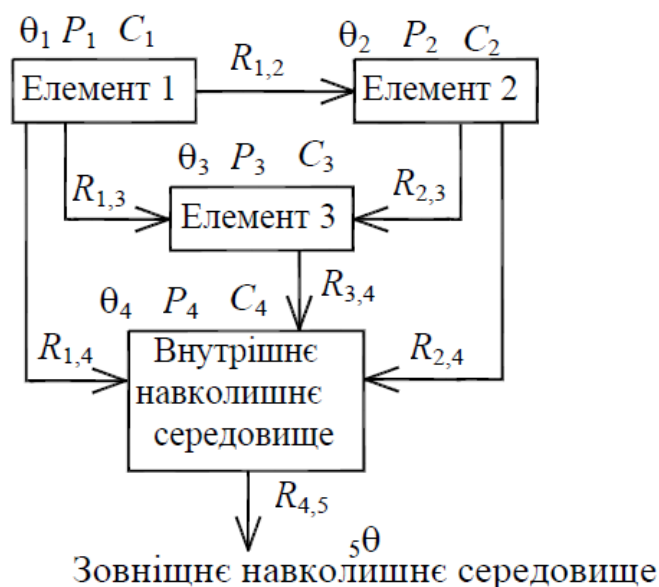


Рисунок 1.1.. Структурна схема теплових процесів

Нехай кожен i -й елемент об'єкта, що моделюється, має температуру найбільш нагрітої точки, Θ_i теплоємність C_i і втрати активної потужності P_i . Нехай також теплові опори між i -м і j -м однорідними тілами будуть рівні R_{ij} .

Втрати P_4 в однорідному тілі «внутрішнє довкілля» є умовними і необхідні роботи адаптивного алгоритму, що буде показано нижче.

Іноді до складу цього тіла потрібно ввести металевий корпус об'єкта, як, наприклад, це зроблено [16] для електродвигуна. У такому разі втрати P_4 можна прийняти рівними втрат у корпусі.

Очевидно, що в працюючій електроустановці найбільш нагріта точка для внутрішнього охолоджуючого середовища буде максимально близько до об'єкта і якомога вище від його основи через прагнення конвективних складових теплового потоку вгору.

Таким чином, приймемо температуру Θ_4 рівної температурі деякої точки у верхній частині поверхні об'єкта, де можливе встановлення датчика. Наприклад, для силового трансформатора це буде верх бічної поверхні його бака, а двигуна – верх його станини. У запропонованій методиці некритично, якщо ця точка не виявиться максимально нагрітою.

Температура зовнішнього охолоджуючого середовища Θ_5 не залежить від температури об'єкта, що моделюється, і повинна вимірюватися на мінімальному віддаленні від об'єкта на рівні прямої, проведеної між його центром і точкою вимірювання температури Θ_4 .

Напрямки умовних теплових потоків між однорідними тілами на рис. 1.1 показані стрілки. Очевидно, що при зміні співвідношення між температурами змінюватимуться і ці напрямки. Підкреслимо, що йдеться про узагальнену модель, в якій розглядається максимум шляхів теплообміну. В реальних об'єктах частина цих шляхів буде відсутня.

У більшості випадків однорідні тіла для елементів модельованого об'єкта можуть бути представлені або в вигляді циліндрів, або в вигляді паралелепіпедів [4], [12]. Найчастіше зустрічається перший випадок, так як

багато пристроїв електроенергетики мають форму, близьку до циліндричної. На рис. 1.2 показано система вкладених циліндрів, яка може бути використана для одножильного силового кабелю, електродвигуна або конденсатора.

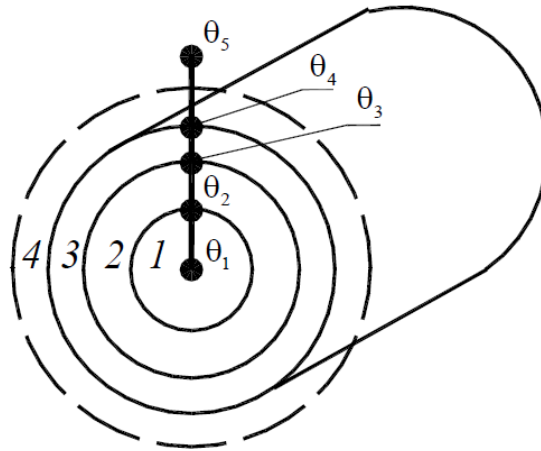


Рисунок 1.2. Приклад об'єкта з системою циліндричних однорідних тел

Для розрахунку нестационарних теплових процесів розглядатимемо одномірну модель із лінійними параметрами. Температури для кожного однорідного тіла визначатимемо лише в одній точці, де передбачається найбільше нагрівання (рис. 1.2). Враховуючи це, а також відповідно до першого початку термодинаміки схема теплових процесів, наведена на рис. 1.1, описуватиметься такими диференціальними рівняннями [8]:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{1,2}} + \frac{\theta_1 - \theta_3}{R_{1,3}} + \frac{\theta_1 - \theta_4}{R_{1,4}} = P_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{1,2}} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_{2,3}} + \frac{\theta_2 - \theta_4}{R_{2,4}} = P_2; \\ C_3 \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_3}{R_{1,3}} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_{2,3}} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_{3,4}} = P_3; \\ C_4 \frac{d\theta_4}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_4}{R_{1,4}} + \frac{\theta_2 - \theta_4}{R_{2,4}} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_{3,4}} + \frac{\theta_4 - \theta_5}{R_{4,5}} = P_4. \end{cases}$$

Для об'єкта зі структурою, аналогічною до вказаної на рис. 1.2, частини доданків в системі (1.1) не буде через відсутності відповідних теплових потоків.

Система (1.1), записана у формі Коші, може бути вирішена стандартними

численими методами, такими як метод Рунге-Кутта. Однак при побудові адаптивної моделі потрібні аналітичні вирази для розрахункових температур.

Виведення розрахункових співвідношень зручно виконувати на основі методу електричних аналогій, синтезувавши із системи (1.1) теплову схему заміщення моделюючого об'єкта [8], [10]. Ця схема зображена на рис. 3.

У тепловій схемі заміщення струмам відповідають теплові потоки, напруженням – температури, опорам – теплові опори, ємностям – теплоємності.

У випадку використання такої схеми зручність висновку аналітичних виразів полягає в можливості застосування методу накладення, застосовуваного в електротехніці. Тобто висновок формул можна виконати для кожного джерела струму або напруги окремо, склавши потім результати. Це особливо актуально для систем четвертого порядку, вирази в яких виходять дуже громіздкими.

Виконавши необхідні перетворення, для i -ї температури в операторній формі можна, можливо записати [8]:

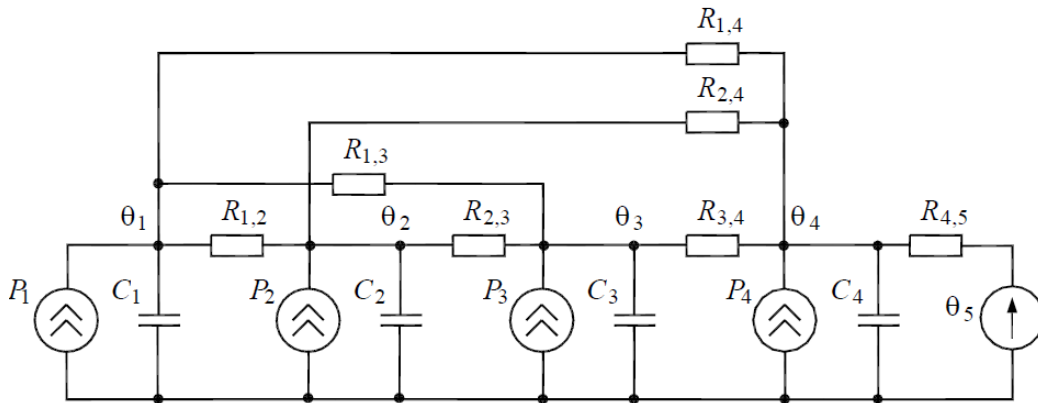


Рисунок 1.3. Теплова схема заміщення

$$\theta_i(p) = \frac{\sum_{m=1}^4 \sum_{k=0}^3 b_{j,k} \cdot p^k \cdot P_m(p) + \sum_{k=0}^3 c_k \cdot p^k \cdot \theta_5(p)}{\sum_{k=0}^3 a_k \cdot p^k}, i \in [1;4], \quad (1.2)$$

де p - оператор перетворення Лапласа; a_k – коефіцієнти характеристичного рівняння; $b_{j,k}$ - коефіцієнти впливу втрат активної потужності; c_k - коефіцієнти впливу температури зовнішнього охолоджуючого середовища.

Знайшовши оригінал виразу (1.2) і переходячи до дискретних відліків часу, протримаємо алгоритм розрахунку i -ї температури [8]:

$$\begin{cases} \theta_{i,j} = \sum_{k=1}^4 \sum_{m=1}^4 \vartheta_{i,k,m,j} + \sum_{k=1}^4 \vartheta_{i,k,5,j}; \\ \vartheta_{i,k,m,j} = h_{i,k,m} \cdot P_{m,j} + \left(\vartheta_{i,k,m,j-1} - h_{i,k,m} \cdot P_{m,j} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}; \\ \vartheta_{i,k,5,j} = h_{i,k,5} \cdot \theta_{5,j} + \left(\vartheta_{i,k,5,j-1} - h_{i,k,5} \cdot \theta_{5,j} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}; \\ i \in [1; 4], \end{cases}$$

де j – номер розрахункового інтервалу; k – номер експоненційної складової теплового процесу; m – номер втрат активної потужності; τ_k – постійні часи експоненційних складових; $\vartheta_{i,k,m,j}$ – складові розрахункової температури від втрат активної потужності; $\vartheta_{i,k,5,j}$ – складові розрахункової температури від температури зовнішнього охолоджуючого середовища; $h_{i,k,m}$ $h_{i,k,5}$ – коефіцієнти, що розраховуються відповідно до правил зворотного перетворення Лапласа на основі співвідношення (1.2); Δt – інтервал часу між j -м та $j + 1$ -м розрахунковими інтервалами (період дискретизації).

Алгоритм (3) дозволяє вести розрахунок температур у реальному часі незалежно від характеру зміни втрат і температури зовнішнього середовища.

1.2 Алгоритм для адаптації математичної моделі до реальних параметрів пристрою електроенергетики

Запропонована узагальнена математична модель не враховує багато важливих чинників, що впливають на реальні теплові процеси в об'єкті моделювання. По перше, це відсутність однорідності теплових параметрів його елементів, а також залежність теплових опорів від температури; по-друге – вплив конвективних та електромагнітних процесів, теплового випромінювання та інших факторів. А в таких об'єктах, як електричні машини, теплові процеси мають настільки складний характер, що зробити їх теоретичний розрахунок з високою точністю практично неможливо.

У [4], [8], [12] розроблено адаптивні моделі для силових трансформаторів, кабелів та електродвигунів, які здатні автоматично підлаштовуватися до реальних теплових параметрів цих об'єктів. У таких моделях є єдині вимоги: вимірювання температури поверхні об'єкта, температури зовнішнього середовища, що охолоджує, і, при необхідності, значень струмів і напруг. Потім здійснюється розрахунок адаптуючого параметра та необхідних температур.

Як адаптуючий параметр будемо використовувати коефіцієнт, що варіюється, K_j множиться на втрати активної потужності в другому рівнянні системи (1.3) наступним чином [10]:

$$\vartheta_{i,k,m,j} = h_{i,k,m} \cdot K_j \cdot P_{m,j} + \left(\vartheta_{i,k,m,j-1} - h_{i,k,m} \cdot K_j \cdot P_{m,j} \right) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}. \quad (1.4)$$

Сформулюємо гіпотезу: в результаті непрямого розрахунку коефіцієнта K_j на основі безпосередньо вимірюваної температури поверхні об'єкта Θ_4 та використання цього коефіцієнта при розрахунку температур Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 відхилення параметрів вихідної моделі від реальних теплових параметрів об'єкта буде частково компенсовано за рахунок оптимального коефіцієнтів при експонентних складових.

Наведемо аналітичне обґрунтування цієї гіпотези.

Підставимо (1.4) у перше рівняння алгоритму (1.3) і виразимо коефіцієнт K_j по відношенню до температури $\Theta_{4,j}$. Враховуючи, що ця температура повинна вимірюватися на поверхні об'єкта, що моделюється, в результаті отримаємо [11]:

$$K_j = \frac{\theta_{pl,4,j} - \sum_{k=1}^4 \left(\vartheta_{4,k,5,j} + \sum_{m=1}^4 \vartheta_{4,k,m,j-1} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} \right)}{\sum_{k=1}^4 \left[\left(\sum_{m=1}^4 P_{m,j} \cdot h_{4,k,m} \right) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} \right) \right]}, \quad (1.5)$$

де $\Theta_{pl,4,j}$ – реально обмірювані значення температури поверхні об'єкта.

Отримані на кожному j -му кроці значення K_j необхідно підставляти (1.4) і (1.3) для розрахунку температур $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$.

Припустимо, що реальні теплові процеси в об'єкті, що моделюється, з деякою точністю можуть бути представлені у вигляді суми чотирьох експоненційних складових із параметрами, що відрізняються від відповідних параметрів математичної моделі четвертого порядку. Тоді (1.5) випливає, що коефіцієнт K_j являє собою суму коефіцієнтів за експоненційними складовими:

$$K_j = \sum_{k=1}^4 K_{k,j}. \quad (1.6)$$

Обґрунтування проведемо для першої експоненційної складової температур Θ_3 і Θ_4 відповідно до алгоритмів (1.3)–(1.5) та співвідношення (1.6), припускаючи, що аналогічна ситуація спостерігатиметься і для інших експонентів. При цьому для спрощення вважатимемо, що температура зовнішнього навколишнього середовища Θ_5 стала і дорівнює 0°C , і, отже, всі її доданки також рівні: $\vartheta_{4,k,5j} = 0^\circ\text{C}$. Втрати P_2, P_3 та P_4 приймемо рівними 0 Вт, тобто складові температур рівні:

$$\vartheta_{4,k,2j} = \vartheta_{4,k,3j} = \vartheta_{4,k,4j} = 0^\circ\text{C}$$

Для експоненційних складових реальних значень температур Θ_3 і Θ_4 використовуватимемо додатковий індекс «рл», тобто «реальний». Тоді алгоритм (1.5) перепишеться у вигляді [11]:

$$K_{1,j} = \frac{\theta_{pl,4,1,1,j} - \vartheta_{4,1,1,j-1} \cdot e^{-\frac{\Delta}{\tau_1}}}{P_{1,j} \cdot h_{4,1,1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta}{\tau_1}}\right)}, \quad (1.7)$$

де $\vartheta_{pl,4,1,1,j}$ – перша експоненційна складова першого доданку температури Θ_3 .

Вирази для відповідних доданків реальних температур $\vartheta_{pl,3j}$ і $\vartheta_{pl,4j}$ запишуться наступним чином [11]:

$$\mathcal{G}_{pl,3,1,1,j} = h_{pl,3,1,1} \cdot P_{1,j} + \left(\mathcal{G}_{pl,3,1,1,j-1} - h_{pl,3,1,1} \cdot P_{1,j} \right) \cdot e^{\frac{\Delta t}{\tau_{pa,1}}}; \quad (1.8)$$

$$\mathcal{G}_{pl,4,1,1,j} = h_{pl,4,1,1} \cdot P_{1,j} + \left(\mathcal{G}_{pl,4,1,1,j-1} - h_{pl,4,1,1} \cdot P_{1,j} \right) \cdot e^{\frac{\Delta t}{\tau_{pa,1}}}. \quad (1.9)$$

Підставимо (1.9) в (1.7) і перепишемо одержаний вираз [10]:

$$\begin{aligned} K_{1,j} &= \frac{h_{pl,4,1,1} \cdot P_{1,j} + \left(\mathcal{G}_{pl,4,1,1,j-1} - h_{pl,4,1,1} \cdot P_{1,j} \right) e^{\frac{\Delta t}{\tau_{pa,1}}} - \mathcal{G}_{4,1,1,j-1} \cdot e^{\frac{\Delta t}{\tau_1}}}{h_{4,1,1} \cdot P_{1,j} \left(1 - e^{\frac{\Delta t}{\tau_1}} \right)} = \\ &= \frac{h_{pl,4,1,1} \cdot P_{1,j} \left(1 - e^{\frac{\Delta t}{\tau_{pa,1}}} \right) + \mathcal{G}_{pl,4,1,1,j-1} \cdot e^{\frac{\Delta t}{\tau_{pa,1}}} - \mathcal{G}_{4,1,1,j-1} \cdot e^{\frac{\Delta t}{\tau_1}}}{h_{4,1,1} \cdot P_{1,j} \left(1 - e^{\frac{\Delta t}{\tau_1}} \right)}. \end{aligned}$$

При правильній роботі алгоритму значення розрахункової температури поверхні об'єкта повинні збігатися з реальними значеннями цієї температури, тобто $\mathcal{G}_{4,1,1,j} = \mathcal{G}_{pl,4,1,1,j}$ і, відповідно, $\mathcal{G}_{4,1,1,j-1} = \mathcal{G}_{pl,4,1,1,j-1}$. Тоді вираз (1.10) перепишеться у вигляді [11]:

$$K_{1,j} = \frac{h_{pl,4,1,1} \cdot P_{1,j} \left(1 - e^{\frac{\Delta t}{\tau_{pa,1}}} \right) + \mathcal{G}_{pl,4,1,1,j-1} \left(e^{\frac{\Delta t}{\tau_{pa,1}}} - e^{\frac{\Delta t}{\tau_1}} \right)}{h_{4,1,1} \cdot P_{1,j} \left(1 - e^{\frac{\Delta t}{\tau_1}} \right)}.$$

При досить малому періоді дискретизації, тобто коли $\Delta t < \tau_k$ експоненти можна представити першими двома членами розкладання до ряду Маклорена:

$$e^{\frac{\Delta t}{\tau_k}} \approx 1 - \frac{\Delta t}{\tau_k}. \quad (1.12)$$

Тоді, з урахуванням (1.12), співвідношення (1.11) перетворюється на вид [12]:

$$K_{1,j} = \frac{h_{рл,4,1,1} \cdot \tau_1}{h_{4,1,1} \cdot \tau_{рл,1}} + \frac{\vartheta_{рл,4,1,1,j-1} \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_{рл,1}}\right)}{h_{4,1,1} \cdot P_{1,j}}.$$

Розглянемо найгіршу ситуацію відхилення реальних значень температури від розрахункових значень. Така ситуація спостерігатиметься на першому кроці розрахунку ($j=1$), коли швидкість експоненти максимальна. Виходитимемо з нульових початкових умов: $\vartheta_{рл,4,1,1,0} = 0^\circ\text{C}$. Тоді вираз (1.13) переписується так:

$$K_{1,1} = \frac{h_{рл,4,1,1} \cdot \tau_1}{h_{4,1,1} \cdot \tau_{рл,1}}. \quad (1.14)$$

Введемо коефіцієнти відповідності між реальними та розрахунковими параметрами відповідних складових температур Θ_3 і Θ_4 [13]:

$$\begin{cases} h_{рл,3,1,1} = \alpha h_{рл,4,1,1}; \\ h_{3,1,1} = \beta h_{4,1,1}; \\ h_{рл,3,1,1} = \gamma h_{3,1,1}; \\ h_{рл,4,1,1} = \frac{\beta\gamma}{\alpha} h_{4,1,1} = \omega h_{3,1,1}; \\ \tau_1 = \varphi \tau_{рл,1}. \end{cases} \quad (1.15)$$

Враховуючи (1.15), для (1.14) можна записати:

$$K_{1,1} = \omega\varphi \quad (1.16)$$

Підставимо (1.16) у вираз для першої експоненційної складової першого складової розрахункової температури Θ_3 на першому кроці розрахунку, помноживши значення втрат на коефіцієнт $K_{1,1}$ та враховуючи (1.12), (1.15) та нульові початкові умови.

В результаті отримаємо [10]:

$$\vartheta_{3,1,1,1} = h_{3,1,1} \cdot \omega\varphi P_{1,1} + (0 - h_{3,1,1} \cdot \omega\varphi P_{1,1}) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}} = h_{3,1,1} \cdot \omega\varphi P_{1,1} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}}\right) \approx h_{3,1,1} \cdot \omega\varphi P_{1,1} \frac{\Delta t}{\tau_1}. \quad (1.17)$$

Перепишемо вираз (1.8) для цих умов, не підставляючи $K_{1,1}$ так як в даному випадку розглядається доданок реальної температури [10]:

$$\vartheta_{рл,3,1,1,1} = h_{рл,3,1,1} \cdot \omega \varphi P_{1,1} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{рл,1}}} \right) \approx h_{рл,3,1,1} \cdot \omega \varphi P_{1,1} \frac{\Delta t}{\tau_{рл,1}}. \quad (1.18)$$

Розділимо (1.18) на (1.17). Враховуючи (1.15), отримаємо [12]:

$$\frac{\vartheta_{рл,3,1,1,1}}{\vartheta_{3,1,1,1}} = \frac{h_{рл,3,1,1} \cdot P_{1,1} \frac{\Delta t}{\tau_{рл,1}}}{h_{3,1,1} \cdot \omega \varphi P_{1,1} \frac{\Delta t}{\tau_1}} = \frac{\gamma \varphi}{\omega \varphi} = \frac{\gamma}{\beta \gamma} = \frac{\alpha}{\beta}.$$

З (1.19) випливає, що відношення реальної температури $\Theta_{рл,3}$ до розрахункової Θ_3 в рамках прийнятих умов не залежить від параметра γ , що зв'язує між собою коефіцієнти при експоненційних складових для цих температур, а також від параметра φ , що зв'язує значення постійних теплових часу. Таким чином, розрахункова температура, отримана на основі множення коефіцієнта K на розрахункові втрати буде наближена до реальної температури за рахунок компенсації відхилення розрахункових коефіцієнтів при експоненційних складових від їх еквівалентів у реальних теплових процесах.

Висновки по першому розділу

Теплові процеси в електроенергетичному обладнанні мають багато загальних закономірностей і можуть бути описані в реальному часі досить простою математичною моделлю, яка не потребує значних обчислювальних потужностей і дозволяє розраховувати температури внутрішніх елементів цього обладнання, які виміряти складно або неможливо. Застосування такої моделі у програмному забезпеченні мікропроцесорних приладів дозволить вирішувати завдання раннього діагностування несправностей у об'єктах енергетики.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОГО ОЛІВНОГО ТРАНСФОРМАТОРУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ЙОГО БАКА

У МЕК 60354 прийнята спрощена математична модель теплових процесів, де трансформатор розглядається як система з двох однорідних тіл: обмотки та оливи. Магнітопровід трансформатора в цій моделі враховано лише побічно. При цьому введено поняття теплової постійної часу трансформатора, і процес зміни температури його оливи зведений до однієї експоненційної складової. У [1] показано, що така математична модель призначена в основному для оцінки здатності навантаження силових трансформаторів на етапі проектування систем електропостачання, а при розрахунках температури в режимі реального часу дає значну похибку.

В [2, 12] силовий масляний трансформатор розглядається як система з трьох однорідних тіл: обмотки, магнітопроводу та оливи. Методика розрахунку режимі реального часу відповідних температур докладно викладена в [8]. Там же проведено аналіз адекватності математичної моделі теплових процесів трансформатора на основі експериментальних даних і показано, що ця модель значно точніша, ніж моделі, прийняті в МЕК 60354, але потребує подальшого підвищення точності. У [11] наведено методику параметричної ідентифікації математичної моделі теплових процесів силового трансформатора, що дозволяє підвищити точність моделі, розглянутої в [12].

Використовуючи вирази для розрахунку в реальному часі температури обмотки, магнітопроводу та оливи силового трансформатора, запропоновані в [10, 11], можна створювати пристрої для його теплового захисту або для виявлення аномального нагріву трансформатора [12, 14]. Однак загальним недоліком таких пристроїв є необхідність їх підключення до значної кількості ланцюгів трансформатора: ланцюгів вимірювання напруги і струму, ланцюгів

автоматики РПН і системи охолодження, до датчиків температури масла і обмотки. Усе це ускладнює використання таких пристроїв на реальні об'єкти.

У цьому розділі пропонується методика, на основі якої можна створювати пристрої теплового захисту та діагностування силового трансформатора тільки на основі безпосереднього вимірювання температури поверхні його бака і навколишнього повітря.

2.1 Структурна схема теплових процесів силового масляного трансформатора

Розглянемо два види навколишнього середовища для силового трансформатора внутрішнє та зовнішнє. Внутрішнім називатимемо середовище, температура якого залежить від температури трансформатора. Відповідно температура зовнішнього середовища не залежить від температури трансформатора. В обох випадках середовище – це повітря.

Представимо внутрішнє і зовнішнє середовища як однорідні тіла. Тоді структурна схема теплових процесів трансформатора виглядатиме, як показано на рис. 1.1.

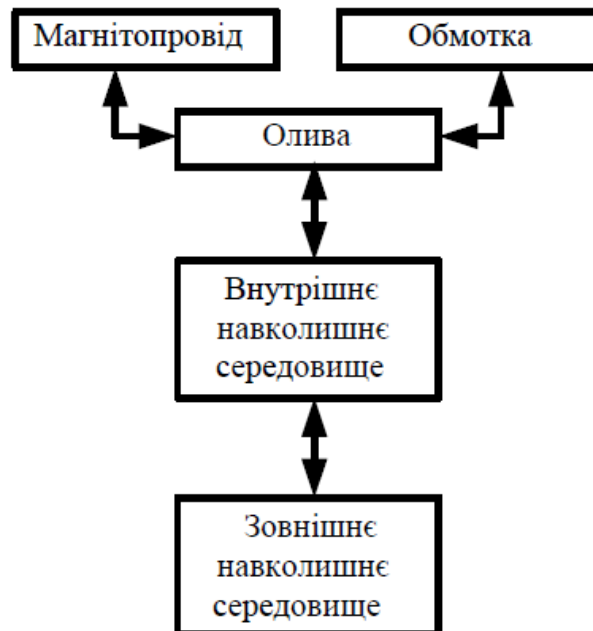


Рисунок 1.1. Структурна схема теплових процесів силового масляного трансформатора

Зі структурної схеми видно, що теплообмін між магнітопроводом і обмотками відсутній. Це зумовлено наявністю між ними ізоляційних циліндрів із щільного картону чи бакеліту [6].

Система рівнянь, що описує аналізовані процеси, запишеться за аналогією із системою, наведеною в [14]:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_3}{R_1} = \Delta P_{\text{xx}}; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = \Delta P_{\text{н}}; \\ C_3 \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_3 - \theta_1}{R_1} + \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_3} = 0; \\ C_4 \frac{d\theta_4}{dt} + \frac{\theta_4 - \theta_3}{R_3} + \frac{\theta_4 - \theta_5}{R_4} = 0, \end{cases}$$

де $C_1 - C_4$ – відповідно теплоємність магнітопроводу, обмотки, оливи та внутрішнього навколишнього середовища; $R_1 - R_4$ – відповідно тепловий опір магнітопроводу, обмотки, олії та внутрішнього навколишнього середовища; $\theta_1 - \theta_5$ – відповідно температура магнітопроводу, обмотки, оливи, внутрішнього довкілля та зовнішнього довкілля; ΔP_{xx} – активна потужність втрат холостого ходу трансформатора; $\Delta P_{\text{н}}$ – активна потужність навантажувальних втрат трансформатора.

За аналогією із схемою, наведеною в [14], на основі системи (2.1) можна синтезувати теплову схему заміщення силового трансформатора, показану на рис. 1.2.

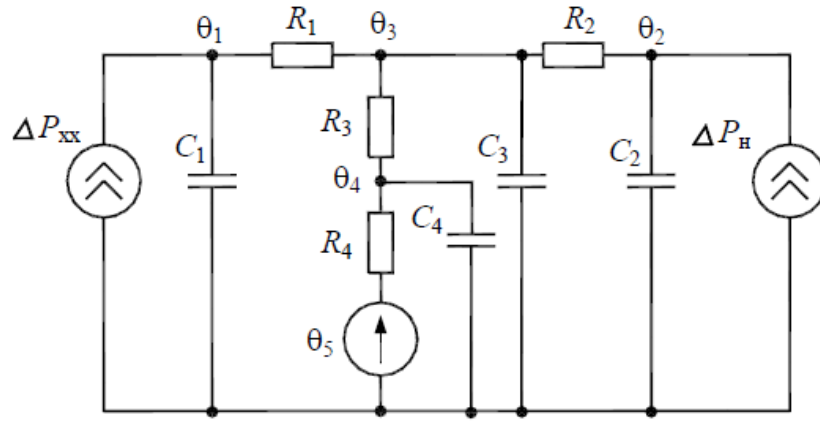


Рисунок 1.2. Теплова схема заміщення силового масляного трансформатора

Скориставшись операторним методом, а також з огляду на те, що $\Delta P_{xx} = \text{const}$, отримаємо вирази для температур $\theta_1 - \theta_4$ [13]:

$$\theta_1(p) = \Delta P_{xx} (R_1 + R_3 + R_4) + \frac{(b_{1.1}p + b_{1.0})\Delta P_{\text{н}}}{H(p)} + \frac{(d_{1.1}p + 1)\theta_5(p)}{H(h)}; \quad (2.2)$$

$$\theta_2(p) = \Delta P_{xx} (R_3 + R_4) + \frac{(b_{2.3}p^3 + b_{2.2}p^2 + b_{2.1}p + b_{2.0})\Delta P_{\text{н}}}{H(p)} + \frac{(d_{2.1}p + 1)\theta_5(p)}{H(h)}; \quad (2.3)$$

$$\theta_3(p) = \Delta P_{xx} (R_3 + R_4) + \frac{(b_{3.2}p^2 + b_{3.1}p + b_{3.0})\Delta P_{\text{н}}}{H(p)} + \frac{(d_{3.2}p^2 + d_{3.1}p + 1)\theta_5(p)}{H(h)}; \quad (2.4)$$

$$\theta_4(p) = \Delta P_{xx} R_4 + \frac{(b_{4.1}p + b_{4.0})\Delta P_{\text{н}}}{H(p)} + \frac{(d_{4.3}p^3 + d_{4.2}p^2 + d_{4.1}p + 1)\theta_5(p)}{H(h)}; \quad (2.5)$$

$$H(p) = a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + 1; \quad (2.6)$$

$$\begin{cases} a_4 = R_1R_2R_3R_4C_1C_2C_3C_4; \\ a_3 = R_1R_2R_4C_1C_2C_4 + R_2R_3R_4C_1C_2C_4 + R_2R_3R_4C_2C_3C_4 + \\ + R_1R_2(R_3 + R_4)C_1C_2C_3 + R_1R_3R_4C_1C_2C_4 + R_1R_3R_4C_1C_3C_4; \\ a_2 = R_2R_4C_2C_4 + R_1R_2C_1C_2 + R_2(R_3 + R_4)C_1C_2 + R_2(R_3 + R_4)C_2C_3 + \\ + R_1(R_3 + R_4)C_1C_2 + R_3R_4C_2C_4 + R_1R_4C_1C_4 + R_3R_4C_1C_4 + \\ + R_3R_4C_3C_4 + R_1(R_3 + R_4)C_1C_3; \\ a_1 = R_2C_2 + (R_3 + R_4)C_2 + R_4C_4 + (R_3 + R_4)C_1 + (R_3 + R_4)C_3 + R_1C_1; \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{1.1} = R_2 C_2; \\ d_{2.1} = R_1 C_1; \\ d_{3.2} = R_1 R_2 C_1 C_2; \\ d_{3.1} = R_1 C_1 + R_2 C_2; \\ d_{4.3} = R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3; \\ d_{4.2} = R_2 R_3 C_2 C_3 + R_1 R_3 C_1 C_3 + R_1 R_3 C_1 C_2 + R_2 R_3 C_1 C_2 + R_1 R_2 C_1 C_2; \\ d_{4.1} = R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_3 C_1 + R_3 C_2 + R_3 C_3; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{1.1} = R_3 R_4 C_4; \\ b_{1.0} = R_3 + R_4; \\ b_{2.3} = R_1 R_2 R_3 R_4 C_1 C_3 C_4; \\ b_{2.2} = R_1 R_2 R_4 C_1 C_4 + R_2 R_3 R_4 C_1 C_4 + R_2 R_3 R_4 C_3 C_4 + \\ + R_1 R_2 (R_3 + R_4) C_1 C_3 + R_1 R_3 R_4 C_1 C_4; \\ b_{2.1} = R_2 R_4 C_4 + R_1 R_2 C_1 + R_2 (R_3 + R_4) C_1 + R_2 (R_3 + R_4) C_3 + \\ + R_1 (R_3 + R_4) C_1 + R_3 R_4 C_4; \\ b_{2.0} = R_2 + R_3 + R_4; \\ b_{3.2} = R_1 R_3 R_4 C_1 C_4; \\ b_{3.1} = R_1 (R_3 + R_4) C_1 + R_3 R_4 C_4; \\ b_{3.0} = R_3 + R_4; \\ b_{4.1} = R_1 R_4 C_1; \\ b_{4.0} = R_4. \end{array} \right.$$

Теплові опори магнітопроводу, обмотки та масла трансформатора можна розрахувати за формулами, наведеними в [12].

2.2 Методика розрахунку теплового опору внутрішнього навколишнього середовища

Розробимо методику розрахунку теплового опору внутрішнього навколишнього середовища, тобто величини. R_4

Представимо бак трансформатора у вигляді прямокутного паралелепіпеда, розміри якого, тобто довжина a , ширина b і висота h , збігаються з основними відповідними розмірами бака. Представимо також внутрішнє охолоджувальне

середовище як простір, укладений між розглянутим паралелепіпедом і паралелепіпедом, всі сторони якого більше значення g порівняно з величинами a, b і h .

Врахуємо, що тепловий опір розраховується аналогічно електричному опору за формулою

$$R_4 = \frac{1}{\gamma_4} \frac{g}{S}, \quad (2.10)$$

де γ_4 – питома теплопровідність внутрішнього доквілля (повітря); g – відстань розповсюдження теплового потоку; S – площа поверхні тепловіддачі.

Розглянемо тепловий опір внутрішнього охолоджуючого середовища як паралельне з'єднання теплових опорів для всіх граней паралелепіпеда (сума теплових провідностей), нехтуючи крайовими ефектами і тепловими потоками через кутові області зовнішнього паралелепіпеда.

Тоді для теплової провідності як величини, зворотної теплового опору, можна записати [14]

$$Y_4 = \frac{1}{R_4} = \gamma_4 \frac{S}{g} = \gamma_4 \frac{2(ab + ah + bh)}{g}. \quad (2.11)$$

Визначимо орієнтовне значення параметра g . Для цього запишемо вираз для теплового опору R_4 через коефіцієнт тепловіддачі оливи у внутрішнє середовище

$$R_4 = \frac{1}{\alpha S}, \quad (2.12)$$

де α – результуючий коефіцієнт тепловіддачі конвекцією та випромінюванням [11].

Прирівнявши (2.12) та (2.10) і виразивши параметр g , отримаємо

$$g = \frac{\gamma_4}{\alpha}. \quad (2.13)$$

Таким чином, для розрахунку теплового опору R_4 необхідно скористатися спочатку співвідношенням (2.13), а потім (2.11).

Теплоємність навколишнього середовища розрахуємо по аналогії [15]

$$C_4 = c_{num,4} G_4 = c_{num,4} \cdot \rho_4 V_4, \quad (2.14)$$

де $c_{\text{пит.4}}$ – питома теплоємність внутрішнього довкілля (повітря); G_4, ρ_4, V_4 – відповідно маса, щільність та об'єм речовини внутрішнього середовища (повітря).

Об'єм внутрішнього середовища знайдемо як обсяг простору, укладений між обраними паралелепіпедами, за формулою [14]

$$V_4 = (a + g)(b + g)(h + g) - abh. \quad (2.15)$$

Таким чином, для розрахунку теплових параметрів внутрішнього середовища необхідно скористатися співвідношеннями (2.11), (2.13)-(2.15). Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі α для відкритої вертикальної поверхні та спокійного охолоджуючого середовища (олії) становить 110 Вт/(м²·°C) [6].

Для автотрансформатора АТДЦТН 63000/220/110/6, що розглядається в [1], значення теплових параметрів внутрішнього навколишнього середовища дорівнюють: $R_4 = 0,074$ °C/кВт; $C_4 = 4,8 \cdot 10^{-6}$ кВт·год/°C.

Відповідно до правил зворотного перетворення Лапласа, знайшовши оригінал для виразу (2.5), запишемо алгоритм для розрахунку температури поверхні бака трансформатора в часовій області [14]:

$$\begin{cases} \theta_{4,j} = \sum_{i=1}^4 \vartheta_{н,i,j} + \sum_{i=1}^4 \vartheta_{в,i,j} + \vartheta_{4,xx}; \\ \vartheta_{н,i,j} = \vartheta_{б,i} K_{нj}^2 + (\vartheta_{н,i,j-1} - \vartheta_{б,i} K_{нj}^2) e^{-\frac{T_d}{\tau_i}}; \\ \vartheta_{в,i,j} = \vartheta_{д,i} \theta_{5,j} + (\vartheta_{в,i,j-1} - \vartheta_{д,i} \theta_{5,j}) e^{-\frac{T_d}{\tau_i}}, \end{cases}$$

де j - номер інтервалу розрахунку; i – те саме експоненційної складової;

θ_4 – температура поверхні бака; $\vartheta_{н}, \vartheta_{в}, \vartheta_{4,xx}$ – відповідно складові температури поверхні бака від навантажувальних втрат, температури повітря та втрат холостого ходу трансформатора; $\vartheta_{б}, \vartheta_{д}$ – відповідно множники при експонентних складових; $K_{н}$ – коефіцієнт навантаження трансформатора; θ_5 – температура повітря; T_d – період дискретизації; τ – теплова постійна часу.

Множники при експоненційних складових $\vartheta_{b,i}$ і $\vartheta_{d,i}$, а також теплові постійні часу τ_i отримані на основі зворотного перетворення Лапласа. Коефіцієнт навантаження, що дорівнює відношенню суми всіх струмів навантаження до номінального струму силового трансформатора на відповідній стороні напруги, що є в алгоритмі (2.16), виходячи з розрахунку навантажувальних втрат за відомою формулою

$$\Delta P_n = \Delta P_{к.ном} K_n^2, \quad (2.17)$$

де $\Delta P_{к.ном}$ – номінальні втрати короткого замикання силового трансформатора.

Згрупуємо коефіцієнти за параметра $K_{н,j}^2$ у другому рівнянні системи (2.16). В результаті отримаємо [13]

$$\vartheta_{н,i,j} = K_{н,j}^2 \vartheta_{b,i} \left(1 - e^{-\frac{T_d}{\tau_i}} \right) + \vartheta_{н,i,j-1} e^{-\frac{T_d}{\tau_i}}.$$

Підсумувавши співвідношення (2.18) по i , можна записати [13]

$$\sum_{i=1}^4 \vartheta_{н,i,j} = K_{н,j}^2 \sum_{i=1}^4 \vartheta_{b,i} \left(1 - e^{-\frac{T_d}{\tau_i}} \right) + \sum_{i=1}^4 \vartheta_{н,i,j-1} e^{-\frac{T_d}{\tau_i}}.$$

Підставивши (2.19) у перше рівняння системи (2.16) і виразивши $K_{н,j}^2$ отримаємо [13]

$$K_{н,j}^2 = \frac{\theta_{4,j} - \sum_{i=1}^4 \vartheta_{н,i,j-1} e^{-\frac{T_d}{\tau_i}} - \sum_{i=1}^4 \vartheta_{в,i,j} - \vartheta_{н,xx}}{\sum_{i=1}^4 \vartheta_{b,i} \left(1 - e^{-\frac{T_d}{\tau_i}} \right)}.$$

Співвідношення (2.20) дозволяє розраховувати невідомі значення коефіцієнта навантаження силового трансформатора при відомих значеннях температури поверхні бака та температури повітря. При цьому отримані значення коефіцієнта навантаження відповідатимуть деякому умовному еквівалентному навантаженню, що призводить до поточного значення температури поверхні бака при поточних та попередніх параметрах

зовнішньої охолоджувального середовища, поточної та попередньої конфігурації системи охолодження, поточного та попереднього положення пристрою РПН трансформатора, а також його реального навантаження.

Враховуючи, що температура поверхні бака трансформатора пов'язана з іншими температурами його основних елементів у системі диференціальних рівнянь (1), значення коефіцієнта навантаження, отримані зі співвідношення (20), можна використовувати для розрахунку температури масла, обмотки та магнітопроводу трансформатора.

Таким чином, алгоритм розрахунку температури трансформатора на основі вимірних значень температури повітря та температури поверхні бака на j -му інтервалі матиме наступні етапи:

- 1) виходячи з нульових початкових умов розрахувати суму $\sum_{i=1}^4 \vartheta_{n,i,j}$;
- 2) визначити $K_{n,j}^2$;
- 3) розрахувати нові значення параметрів зв. $\vartheta_{i,j}$;
- 4) розрахувати поточні значення температур оливи, обмотки та магнітопроводу.

Проведемо аналіз роботи цього алгоритму. Припустимо, що при деякому постійному коефіцієнті навантаження і постійній температурі повітря, що дорівнює 18 °С, температура поверхні бака автотрансформатора АТДЦТН 63000/220/110/6 незмінна і становить 30 °С. Для цих умов квадрат розрахункового коефіцієнта навантаження відповідно до (2.16) складе

$$K_n^2 = \frac{\theta_4 - \theta_5 - \theta_{n,xx}}{\sum_{i=1}^4 \vartheta_{6,i}} = \frac{30 - 18 - 2,23}{11,34} = 0,86. \quad (2.21)$$

Скориставшись формулою (2.20), розрахуємо значення квадрата коефіцієнта навантаження K_n^2 виходячи з початкових нульових умов.

На рис. 2.3 показаний результат розрахунку квадрата коефіцієнта навантаження аналізованого автотрансформатора при період дискретизації $T_d = 10$ хв.

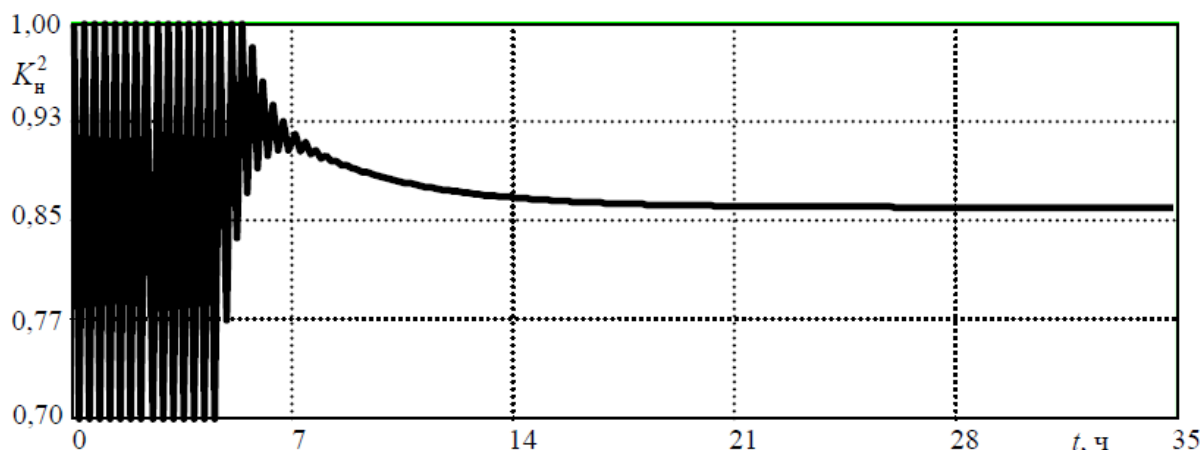


Рисунок 2.3. Діаграма зміни квадрата коефіцієнта навантаження за період дискретизації 600 с тривалий інтервал часу (у збільшеному масштабі)

Час встановлення становив $4\tau_4 = 31$ год. На початкових інтервалах розрахунку квадрат коефіцієнта навантаження досягнув значень 130 і більше (діаграма на рис. 3 дана у збільшеному масштабі), що пояснюється нульовими початковими умовами в алгоритмі і кінцевою точністю розрахунків комп'ютером, а потім повільно прагнув встановити значення відповідно (2.21). Протягом перехідного процесу спостерігалися негативні значення величини K_n^2 , тобто значення самого коефіцієнта навантаження в даному випадку були уявними величинами. Тому в алгоритмі необхідно розраховувати лише його квадрат, щоб уникнути видачі помилок розрахунку.

При виборі періоду дискретизації менше 10 хв початкові коливання величини K_n^2 зростають у багато разів і, відповідно, підвищуються вимоги до точності обчислень.

Проведемо аналіз роботи розглянутого алгоритму на основі імітаційного моделювання графіка навантаження автотрансформатора АТДЦТН 63000/220/110/6 та температури зовнішнього середовища. При цьому імітуватимемо також відхилення параметрів автотрансформатора від їх паспортних значень.

Представимо імітований коефіцієнт навантаження у такій формі [14]:

$$K_{н. j} = K_{н. пс} + \sum_{i=1}^2 \left[K_i \sin \left(\frac{2\pi T_d j}{T_{н. i}} + \varphi_{н. i} \right) \right],$$

де j - номер інтервалу розрахунку; $K_{н. пс}$ – постійна складова коефіцієнта навантаження; $K_i, T_{н. i}, \varphi_{н. i}$ – відповідно амплітуда, період та фаза гармонійних складових коефіцієнта навантаження.

За аналогічною формулою імітуватимемо і значення температури повітря [14]

$$\theta_{с. j} = \theta_{в. пс} + \sum_{i=1}^2 \left[\theta_{в. i} \sin \left(\frac{2\pi T_d j}{T_{в. i}} + \varphi_{в. i} \right) \right],$$

де $\theta_{в. пс}$ – постійна складова температури повітря; $\theta_{в. i}, \varphi_{в. i}, T_{в. i}$ – відповідно амплітуда, період та фаза гармонійних складових температури повітря.

Величини, розраховані на основі паспортних та нормованих ГОСТ 14209–85 параметрів автотрансформатора, а також самі ці параметри називатимемо вихідними, а величини, розраховані в умовах відхилення параметрів автотрансформатора від паспортних значень, а також самі ці параметри – ситуаційними.

Для автотрансформатора АТДЦТН 63000/220/110/6 імітуватимемо відхилення від паспортних всіх значень у бік збільшення на 10–20 %.

Як параметри для імітованих значень коефіцієнта навантаження і температури повітря у співвідношеннях (2.22), (2.23) приймемо наступні:

$K_{н. пс} = 0,6$; $K_1 = 0,3$; $K_2 = 0,2$; $T_{н. 1} = 24$ Г.; $T_{н. 2} = 6$ Г.; $\varphi_{н. 1} = 2\pi/6$; $\varphi_{н. 2} = 2\pi/3$;
 $\theta_{в. пс} = 10^\circ\text{C}$; $\theta_{в. 1} = 5^\circ\text{C}$; $\theta_{в. 2} = 2^\circ\text{C}$; $T_{в. 1} = 24$ Г.; $T_{в. 2} = 2$ Г.; $\varphi_{в. 1} = 0$; $\varphi_{в. 2} = 2\pi/7$. Період дискретизації приймемо рівним 10 хв.

Імітовані параметри вибиралися виходячи з найгірших умов для роботи алгоритму, а також із можливих ситуацій при реальній експлуатації автотрансформатора. Добові коливання коефіцієнта навантаження та температури повітря дано з максимальними розмахами та форми їх графіків наближені до реальних.

Приймемо такий порядок імітаційного моделювання. Спочатку розрахуємо температури поверхні бака, оливи, обмотки та магнітопроводу автотрансформатора за вихідними та ситуаційними параметрами. Температура, знайдена за вихідними параметрами, буде відповідати температурі, визначеній за математичною моделлю при безпосередньо вимірюваному коефіцієнті навантаження без параметричної ідентифікації [1], а температура, розрахована за ситуаційними параметрами, – реальною температурою, в тому числі і безпосередньо вимірюваною (у разі температури поверхні бака). Після цього на основі ситуаційної температури поверхні бака обчислимо коефіцієнт навантаження автотрансформатора відповідно до алгоритму, розглянутого вище. Потім, використовуючи отримані значення коефіцієнта навантаження, знову визначимо температуру основних елементів автотрансформатора. Порівнюючи останню із ситуаційною температурою, визначимо похибки математичної моделі.

На рис.2.4 наведено часові діаграми температури оливи автотрансформатора АТДЦТН 63000/220/110/6, отримані за вихідними та ситуаційними параметрами за 7 діб розрахунку.

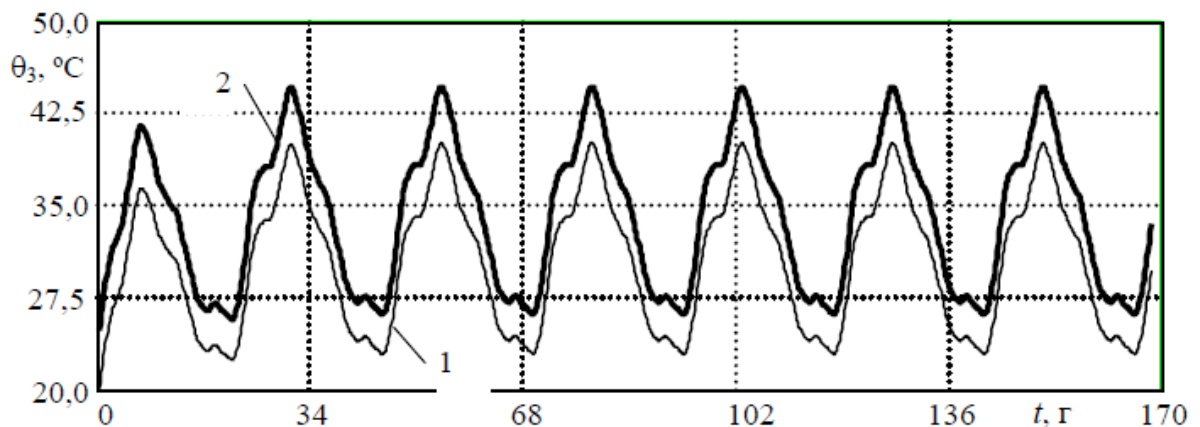


Рисунок 2.4. Діаграми температури оливи автотрансформатора АТДЦТН 63000/220/110/6, розраховані: 1 – за вихідними; 2 – за ситуаційними параметрами

На рис. 2.5 наведено діаграми імітованого за формулою (2.22) та розрахункового, отриманого за допомогою запропонованого алгоритму на

основі ситуаційної температури поверхні бака автотрансформатора, квадратів коефіцієнтів навантаження. З діаграми 2 рис. 2.5 видно, що інтенсивний перехідний процес спостерігався лише перші 4-5 год, а потім припинився.

Для виключення впливу перехідного процесу розрахункового коефіцієнта навантаження температуру елементів автотрансформатора визначатимемо, починаючи з часового інтервалу не менше $4\tau_4 = 31$ год.

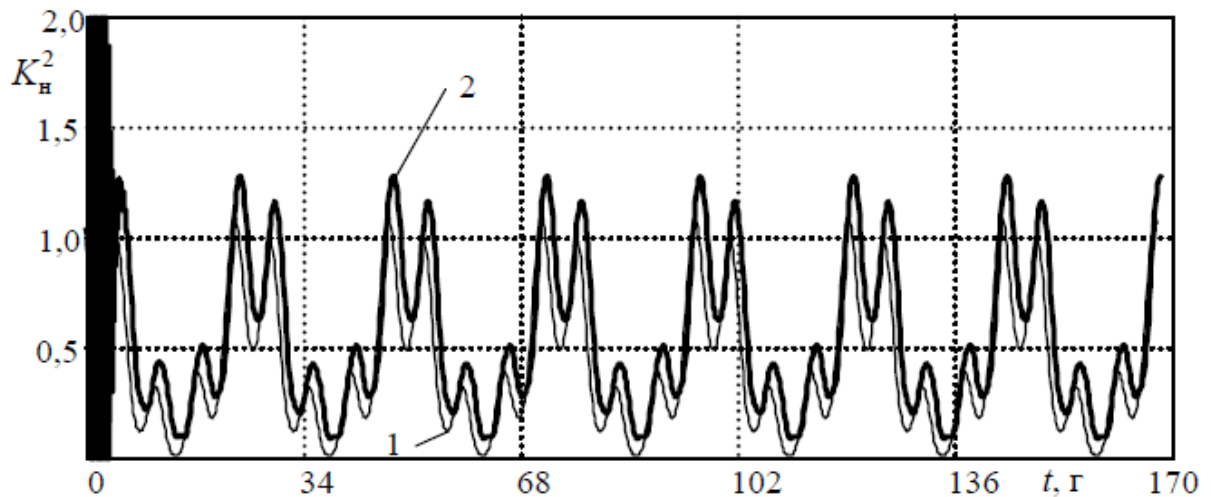


Рисунок 2.5. Діаграми квадратів коефіцієнтів навантаження автотрансформатора АТДЦТН 63000/220/110/6: 1 – вихідного, що імітується; 2 – розрахункового

На рис. 2.6 наведено діаграми, аналогічні рис. 2.4 але крива 1 отримана на основі розрахункового коефіцієнта навантаження. Усі обчислення виконані виходячи з нульових початкових умов за експоненціальними складовими.

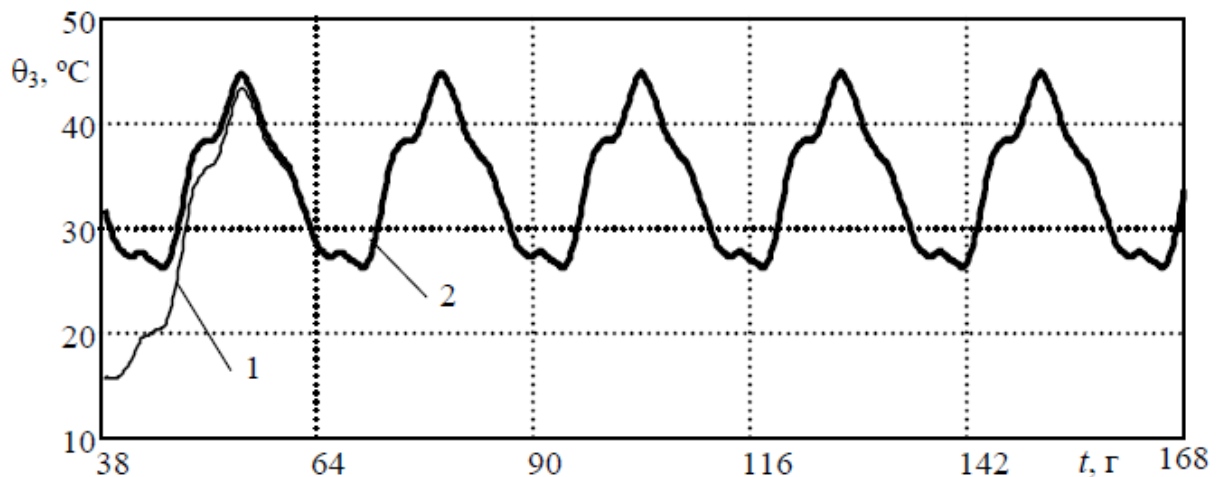


Рисунок 2.6. Діаграми температури мастила автотрансформатора АТДЦТН 63000/220/110/6, отримані на основі розрахункового коефіцієнта навантаження та розраховані: 1 – за вихідними; 2 – за ситуаційними параметрами

У табл. 2.1 наведено значення модуля максимальної абсолютної похибки математичної моделі, де безпосередньо виміряну температуру прийняті відповідні значення, розраховані на основі ситуаційних параметрів. Похибки визначено з огляду на виключення помилки початкових умов.

З табл. 2.1 видно, що абсолютна похибка моделі за всіма розрахунковими температурами значно знизилася, тому можна стверджувати, що розроблений алгоритм має властивості параметричної ідентифікації силового трансформатора [3] без додаткових обчислень. Це об'яснюється тим, що ці ситуаційні параметри силового трансформатора у певній мірі впливають на температуру його поверхні і відповідно значення розрахункового коефіцієнта навантаження, що є лише еквівалентом вихідного коефіцієнта навантаження, враховуючи, крім струму, низка додаткових факторів. Наприклад, тепловий опір внутрішнього середовища R_4 істотно залежить від погодних параметрів: тиску повітря, його вологості, швидкості та напрямки вітру, інтенсивності сонячного випромінювання.

Таблиця 2.1 - Значення модуля максимальної абсолютної похибки математичної моделі за результатами імітаційного моделювання

Назва вимірюваного елемента	Розрахункова температура по коефіцієнту навантаження, °C	
	початкова	розрахункова
Поверхня бака	1,70	0,03
Олива	4,60	0,35
Обмотка	8,20	2,04
Магнітопровід	10,10	5,70

Однак у процесі вимірювань датчик температури повітря повинен піддаватися впливу всіх цих же факторів, а температура поверхні бака трансформатора, також вимірювана, природно, залежить від них. Тому в

процесі розрахунків за математичною моделлю кліматичні фактори будуть компенсовані, нівельовані.

Висновки по другому розділу

Що стосується реальних внутрішніх теплових параметрів силового трансформатора, то їх значення інтегрально повинно закладатися в розрахунковий еквівалентний коефіцієнт навантаження. На даному етапі досліджень всі ці тези знайшли теоретичне підтвердження. Далі їхню істинність необхідно перевірити експериментальним шляхом.

ВИСНОВКИ

Теплові процеси в електроенергетичному обладнанні мають багато загальних закономірностей і можуть бути описані в реальному часі досить простою математичною моделлю, яка не вимагає значних обчислювальних потужностей і дозволяє розраховувати температури внутрішніх елементів цього обладнання, які виміряти складно або неможливо. Застосування такої моделі у програмному забезпеченні мікропроцесорних приладів дозволить вирішувати завдання раннього діагностування несправностей в об'єктах енергетики.

В кваліфікаційній роботі пропонується методика, на основі якої можна створювати пристрої теплового захисту та діагностування силового трансформатора тільки на основі безпосереднього вимірювання температури поверхні його бака і навколишнього повітря.

Результати імітаційного моделювання показали, що розрахунок в режимі реального часу температури основних елементів силового трансформатора можна вести, використовуючи в якості безпосередньо виміряних величин тільки температуру поверхні бака і температуру повітря, не вимірюючи струм навантаження. Остаточні висновки з цього питання будуть зроблені на основі експериментальних досліджень.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електричні системи і мережі. Частина 3 : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський ; за ред. П. Д. Лежнюка. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 172 с.

2. Електричні мережі та системи: Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С. П. Шевчук, О. В. Мейта. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,46 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.– 167 с.

3. Правила улаштування електроустановок/ МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ/ Наказ №476 від 21.07.2017р.- Київ, 2017.

4. Діагностика теплоенергетичного устаткування теплових та атомних електричних станцій: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. Для студ. спеціальності 144 «Теплоенергетика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. А. Пешко, О. Ю. Черноусенко, Д. В. Риндюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,6 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 81 с.

5. Рой В. Ф. Системи діагностування, контролю, керування та захисту електроенергетичних установок і комплексів : конспект лекцій для аспірантів першого року навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / В. Ф. Рой, Ю. П. Кравченко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 128 с.

6. Плешков П. Г. Організація системи моніторингу силових трансформаторів / П. Г. Плешков, В. Ф. Мануйлов, І. В. Савеленко // Наукові записки : зб. наук. пр. - Кіровоград : КНТУ, 2010. - Вип. 10, ч. 2. - С. 250-255.

7. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення.

8. А. А. Стребков, А. А. Вовк, А. Ю., С.О. Квітка Аналіз теплових перехідних процесів в обмотках і маслі силового трансформатора та розробка способу вимірювання температури обмоток//
<http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/5599>

9. <http://itff.kiev.ua/naukovi-pidrozdili/modelyuvannya-procesiv-teploobminu-v-obyektax-energetiki-ta-teploteknologiyax-mpt/aktualni-napryamki-diyalnosti-mpt/analiz-teplovogo-stanu-ta-osoblivostej-techi%D1%97-oxolodzhualnogo-masla-energetichnix-transformatoriv/>

10. Ю.В. Байдак, М. Масарік, В.А. Матухно. Моделювання процесу конвективного теплообміну маслом з поверхні розподільчого трансформатора/<https://www.researchgate.net/publication/319010430>

11. Діагностика трансформаторного обладнання, Детальна інформація//<http://referaty.com.ua/ukr/details/5838/>

12. Діагностика стану електротехнічного обладнання: Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійних програм «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. Р. Проценко Я. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,06 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 162 с.

13. В.Е.Бондаренко, Н.В.Аулова. Анализ традиционной системы оценки состояния трансформаторных масел в баках трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 330 кВ/<https://kpi.kharkov.ua/archive/>

14. В. М. Кутін, М. В. Нікітчук, В. М. Світко, О. О. Шпачук. Автоматизація процесу аналізу теплового стану високовольтних трансформаторів струму/ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/34787/92009.pdf?sequence=2&isAllowed=y

15. Круковский П.Г., Яцевский В.А., Конторович Л.Н., Иванков В.Ф., Юрченко Д.Д.. Методические подходы к моделированию тепловых режимов силовых масляных трансформаторов /

<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/61200/07>

KrukovskyNEW.pdf?sequence=1

16. Квітка С. О., Вовк О. Ю., Квітка О. С. Теплова модель асинхронного електродвигуна в стаціонарних режимах// Таврійський державний агротехнологічний університет