

Машинобудування і зварювальне виробництво

of lifting and transport equipment (students, workers, foremen) need to be familiar with the requirements for discarding wheelsets and methods for their restoration. Lifting cranes play a leading role in the system of machines used for mechanizing assembly and loading/unloading operations in construction. With the help of lifting cranes, high productivity rates and industrialization of construction and assembly work are achieved.

Bridge cranes are a type of lifting crane with a load-carrying mechanism suspended from the hoist trolley, which is mounted on a moving bridge. These include: a) Bridge cranes – bridge cranes with direct support of the bridge on an overhead crane track; b) Gantry cranes – bridge-type cranes with the bridge supported on the crane track by two support legs; c) Semi-gantry cranes – bridge-type cranes with the bridge supported on the crane track on one side directly, and on the other side using a support leg.

Wear, which occurs due to various factors (operation outdoors, dusty conditions, atmospheric precipitation, etc.) during normal crane operation, is called natural wear. The result of this is called natural wear. Rapid wear, which occurs due to poor maintenance or manufacturing defects, is called accidental wear, and its result is called accidental wear. Based on the nature of the interaction of friction surfaces, there are mechanical, molecular-mechanical, and corrosion-mechanical types of crane wear.

Solving the wear problem is an important task, as restoring a crane wheel is more economically advantageous than purchasing a new one, with the price difference reaching up to five times.

Keywords: Bridge crane wheels, surfacing, wear resistance, metastable austenite, flux.

Стаття надійшла 20.04.2025р.

УДК 621.3.048.1

doi.org/10.31498/2522-9990292025330217

Цокотун П.В., Капустян О.Є.

РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ ТЕРМОВАКУУМНОЇ ОБРОБКИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Ефективність роботи підприємств при сучасному рівні електрифікації залежить від стабільного електропостачання, одним з елементів якого є трансформатор. Надійна робота трансформатора зумовлена станом його ізоляції. Для відновлення діелектричних властивостей ізоляції, порушених через зволоження, трансформатори, що знаходяться на монтажі, в експлуатації та ремонті, нагріваються та сушаться. показала, що найбільш просте та зручне в експлуатації є обладнання для термовакуумної обробки. незалежно від методу, що використовується, процес сушіння виходить дорогим і енергоємним. Мета статті – запропонувати і реалізувати порядок дій для побудови математичної моделі термовакуумної обробки силових трансформаторів. Математичне моделювання враховує складну, багатошарову конструкцію трансформаторів, різні матеріали, їх теплофізичні властивості, а також особливості технологічного процесу. Активна частина розглядається як об'єкт, що складається з послідовно з'єднаних різних елементів, виготовлених з різних матеріалів, що входять до конструкції активної частини. Впровадження програми розрахунку режимів термовакуумної обробки дозволяє розробляти технологічні процеси на стадії проектування нових виробів та вдосконалювати діючу технологію термовакуумної обробки серійних трансформаторів. Запропонована методика сушіння трансформаторів, дозволяє збільшити їхню експлуатаційну надійність, обґрунтовано збільшити термін їхньої служби і, отже, здешевити їхню експлуатацію.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Проведено комплекс експериментальних робіт на полігоні, що підтвердили достовірність результатів, отриманих під час теоретичних досліджень, і показала, що запропоновані параметри є надійними для оцінки стану ізоляції трансформаторів.

Ключові слова: трансформатор, ізоляція, сушінні, математична модель, термовакуумна обробка.

Постановка проблеми. Сучасний рівень електрифікації виробництва пред'являє підвищені вимоги до надійності та якості електропостачання, раціональної експлуатації обладнання електричних мереж, застосування прогресивних методів обслуговування та ремонту. Це стосується і експлуатації трансформаторних підстанцій. Надійність електропостачання значною мірою залежить від надійності роботи трансформаторів. Однією з головних та найбільш відповідальних частин трансформаторів високої напруги, як і асинхронних двигунів [1, 2], є внутрішня електрична ізоляція, електрична міцність якої визначає надійну роботу трансформаторів. Трансформатори, як і інші електричні установки можуть надійно працювати лише зі справною ізоляцією. У процесі експлуатації через зволоження, перегріву, динамічних навантажень і перенапруг відбувається старіння ізоляції, тобто. погіршення її характеристик. Порушення ізоляції обмоток становить 67,5 % всіх аварій трансформаторів в експлуатації. Це особливо важливо на етапі експлуатації енергетичних систем, коли понад 70% основного трансформаторного устаткування вже виробило свій ресурс часу, регламентований нормативними документами. Однією з основних причин порушення ізоляції при зберіганні та експлуатації трансформаторів є її зволоження. Для відновлення діелектричних властивостей ізоляції, порушених через зволоження, трансформатори, що знаходяться на монтажі, в експлуатації та ремонті, нагріваються та сушаться [3]. Крім того, дуже часто потрібно проводити прогрівання трансформаторів перед контролем стану ізоляції, під час проведення ревізії активної частини та інших випадках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метою сушіння трансформатора є видалення вологи з ізоляційного матеріалу трансформатора, підвищення його опору ізоляції та збільшення напруги пробою.

Існують різні способи сушіння трансформаторів (наприклад, методом в індукційних втрат сталі бака, в спеціальній шафі, інфрачервоними променями, повітродувкою, у вакуумі, струмами короткого замикання та ін.) [4], низькочастотне нагрівання – процес сушіння за рахунок подачі регульованого струму низької частоти на його високовольтні обмотки [5] або комбінація методів [6, 7]. Але практика показала, що найбільш просте та зручне в експлуатації є обладнання для термовакуумної обробки. Раціональним є їх сушіння шляхом продування гарячим повітрям (до 110°C) для трансформаторів напругою до 35 кВ, або сушіння у вакуум-сушильних шафах при вакуумі (-600 Па, або ~5 мм рт. ст.) більш потужних трансформаторів. Термовакуумна обробка активних частин трансформаторів завдяки зневодненню та дегазації ізоляції забезпечує необхідну електричну міцність ізоляції і є відповідальною ланкою в циклі виготовлення високовольтних силових трансформаторів.

Однак незалежно від методу, що використовується, процес сушіння виходить дорогим і енергоємним. В результаті, при виборі відповідної процедури сушіння, основна увага приділяється часу обробки та загального споживання енергії. Цей процес не має чітких критеріїв, які характеризують ступінь сушіння ізоляції у всьому обсязі. Застосування в експлуатаційній практиці найбільш точних способів розрахунку параметрів нагрівання та сушіння дозволить знизити витрати, прискорити введення трансформаторів у роботу.

В роботі [8] розглянута спрощена модель аналітичного описання процесу сушки ізоляції трансформаторів струму при обдуванні гарячим повітрям вакуумного або глибоковакуумного сушіння, що дозволяє оцінити вологість ізоляції у будь-який момент часу з використанням нескладного математичного алгоритму.

При сушінні ізоляції трансформаторів виникає завдання розрахунку необхідних режимів

Машинобудування і зварювальне виробництво

нагрівання оброблюваних виробів. Специфікою такої задачі часто є локалізація нагріву в області поверхні виробу. Це, в загальному випадку, відрізняє дані технологічні установки від печей і не дозволяють використовувати для розрахунку та проектування апробовані методики, що застосовуються при розрахунку печей.

Таким чином, розрахунок для вакуумно-термічного обладнання вимагає розробки спеціальної методики, що дозволяє визначати температури взаємодіючих поверхонь при заданих потужних характеристиках технологічного процесу, що реалізується, або необхідні потужнісні характеристики технологічної установки для необхідного розподілу температур з урахуванням геометрії системи та теплофізичних характеристик її елементів.

Мета дослідження. запропонувати і реалізувати порядок дій для побудови математичної моделі термовакuumної обробки силових трансформаторів, що дозволяє розрахувати необхідні характеристики для забезпечення регульованої зміни температури поверхонь, що беруть участь у теплообміні. Оцінити точність та ефективність методу, дати рекомендації щодо його застосування.

Завдання дослідження: отримання розрахункових залежностей визначення значень параметрів, щоб забезпечити реалізацію необхідного режиму термообработки;

отримання експериментальних даних у вакуумно-термічних установках з локальним розподілом температур та їх зіставлення з результатами розрахунків за розробленими математичними моделями з визначенням похибок розрахунків.

Основний матеріал дослідження. Експериментальні дослідження проведені на силових трансформаторах, що діють, з використанням сучасного діагностичного обладнання. Достовірність отриманих результатів базується на коректному застосуванні теорії теплопередачі, збігу результатів розрахунків з експериментальними даними, використанні при проведенні експериментів сучасних повірених вимірювальних засобів та стандартних методик вимірювань, адекватності та несуперечності використовуваних моделей.

Основними параметрами процесу термовакuumної обробки є температура, залишковий тиск, тривалість фази прогріву і фази глибоковакуумного сушіння. Температура та залишковий тиск визначаються дослідженнями і залежать від властивостей матеріалів та особливостей обладнання.

Тривалість фази прогріву і фази глибоковакуумного сушіння трансформаторів в даний час визначається у період авторського нагляду за головними зразками і ґрунтується на методах непрямого контролю за станом ізоляції, тому що для отримання даних по кінетиці прогріву та сушіння ізоляції трансформаторів, вивчення розподілу температур і залишкового вмісту вологи в ізоляції по всій товщині, необхідно виконувати серію тривалих і дорогих досліджень на великомасштабних моделях, практично рівних трансформаторам.

Для розробки технологічних регламентів термовакuumної обробки з конструкторської документації на трансформатор створена математична модель, яка описує процес і розроблена методика розрахунку процесу термовакuumної обробки.

Математичне моделювання враховує складну, багат шарову конструкцію трансформаторів, різні матеріали, їх теплофізичні властивості, а також особливості технологічного процесу. Активна частина розглядається як об'єкт, що складається з послідовно з'єднаних різних елементів, виготовлених з різних матеріалів, що входять до конструкції активної частини.

У процесі термовакuumної обробки активна частина трансформатора отримує тепло з навколишнього середовища за рахунок випромінювання та теплообміну в режимі вільної конвекції.

З [9] процеси тепломасопереносу пов'язані співвідношеннями:

$$\bar{q} = -\lambda \text{grad } t; \quad (1)$$

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$\bar{V} = -K_p \text{grad } P, \quad (2)$$

де $\bar{q}$ – тепловий потік, Вт/м²;

$\bar{V}$ – масовий потік, кг/(м²×с);

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м×с);

K_p – ефективний коефіцієнт переносу пари в капілярно-пористому тілі, кг/(м×с×Па);

t – температура, °С;

P – парціальний тиск в камері, Па.

Стан зв'язаної вологи в целюлозній ізоляції описується законом Френдліха:

$$U(t) = a \exp(-b \times t) P^{(k+d \times t)}, \quad (3)$$

де a , b , k , d – емпіричні коефіцієнти, абсолютні значення для кожного електроізоляційного матеріалу із [1];

$U(t)$ – вологовміст в ізоляції, %.

На основі рівнянь (1) – (3) та класичних задач теплопровідності [10] розроблена математична модель фази прогріву і сушіння активних частин трансформаторів.

У безрозмірних змінних математичний описання моделі має вигляд:

$$\frac{\partial \theta}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}; F_0 > 0, x \in [0, 1] \quad (4)$$

з початковими та граничними умовами:

$$\theta |_{F_0 = 0} = 0; \quad (5)$$

$$\theta |_{x = 1} = 1 - \exp(-Bi L F_0); \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} |_{x = 0} = Bi(\theta - 1). \quad (7)$$

Вирішуючи завдання (4) – (7) за допомогою операційного обчислення, отримуємо значення безрозмірної температури в будь-якій точці фази в різні моменти безрозмірного часу:

$$\theta = \varphi(Bi, L, F_0, x), \quad (8)$$

де θ – безрозмірна температура;

F_0 – число Фур'є (узагальнений час);

L – відносний розмір;

Bi – критерій Біо.

Перехід до розмірної температури та часу здійснюється через залежності [10]:

$$t_{(x,\tau)} = t_0 + \theta(t_c - t_0); \quad (9)$$

$$\tau = \frac{F_0 \times l^2}{a}, \quad (10)$$

де t_0 – температура в початковий момент часу, чисельно дорівнює 20° С;

t_c – температура середовища, чисельно рівна 115°С;

$t_{(x,\tau)}$ – температура в будь-якій точці фази по часу, °С;

a – коефіцієнт температуропровідності, чисельно рівний $79,8 \times 10^3$ м²/с;

l – характерний розмір, м;

τ – час, с.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Розрахунок процесу термовакуумної обробки здійснюється в два етапи: розрахунок зміни температури і вмістологи в часі для фази прогріву і розрахунок зміни полів температур, тисків і вологовмісту для глибоковакуумного сушіння.

Вихідними даними для розрахунку тривалості етапу прогріву крім теплофізичних коефіцієнтів, що характеризують властивості матеріалів, є геометричні розміри конструкції, температура процесу, початкова температура ізоляції, початковий вмістологи ізоляції, маса електрокартону, кабельного паперу, міді, кількість електрокартонних бар'єрів, рейок, повітряних проміжків на фазу активної частини трансформатора [9].

Виходячи з оптимальних умов закінчення етапу прогрівання [9] (температура ізоляції 85°C , залишок вмістуологи 2 %), визначається його тривалість і ділянка ізоляції (ділянка, що важко прогривається має найменшу температуру і найбільший вмістологи у момент закінчення прогріву).

Вихідними даними для розрахунку тривалості глибоковакуумного сушіння є температура і вмістологи ділянки, що важко прогривається, його висота і заданий кінцевий вмістологи ізоляції, який залежить від класу напруги виробу.

Необхідна інформація для розрахунку t та U досвідченим співробітником підбирається трохи більше 3 год.

В даний час як лінії електропередачі в основному використовуються лінії напругою 110 кВ і вище, а як розподільні - лінії напругою 35 кВ і нижче. Трансформатори 110 кВ найчастіше використовуються в системах електропостачання для перетворення напруги передачі 110 кВ напруга розподілу 35 кВ, 20 кВ або 10 кВ, для використання користувачами або трансформаторами суспільного розподілу. Великі споживачі електроенергії також використовують трансформатори на 110 кВ як користувальницькі трансформатори. Малі електростанції також використовують напругу 110 кВ як мережеву напругу, тому трансформатор 110 кВ використовується як підвищуючий трансформатор. Виконано низку розрахунків режимів термовакуумної обробки для трансформаторів класу напруги 110 кВ і вище і проведено порівняння з експериментальними даними.

Наприклад на рис. 1 та 2 показані результати розрахунку прогріву силового високовольтного трансформатора. З рис. 1 слід, що до кінця прогріву ділянка ізоляції, що знаходиться в зоні точки 6 радіального розміру фази активної частини, має мінімальну температуру (85°C) і максимальний вмістологи (2%).

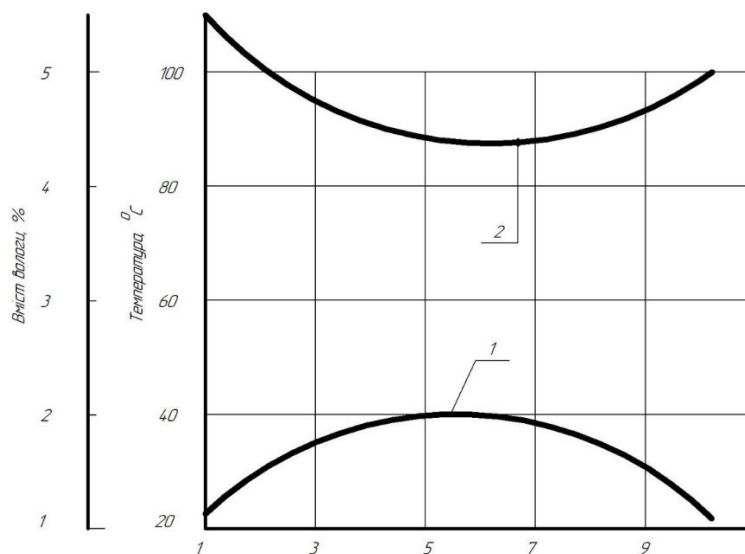


Рисунок 1 – Розподіл вологовмістів (1) та температур (2) в ізоляції активної частини в кінці прогріву

Машинобудування і зварювальне виробництво

Відповідно до прийнятої методики дану дільницю слід віднести до важкопрогріваємої, яка визначає тривалість прогріву.

З рис. 2 видно, що для досягнення заданих параметрів, прогрів активної частини трансформатора повинен продовжуватися впродовж 125 год. За даними експерименту тривалість прогріву становила 120 год. Отримана розбіжність результатів незначна.

Запропонована методика сушіння трансформаторів, дозволяє збільшити їхню експлуатаційну надійність, обґрунтовано збільшити термін їхньої служби і, отже, здешевити їхню експлуатацію. Проведено комплекс експериментальних робіт на полігоні, що підтвердили достовірність результатів, отриманих під час теоретичних досліджень, і показала, що запропоновані параметри є надійними для оцінки стану ізоляції трансформаторів.

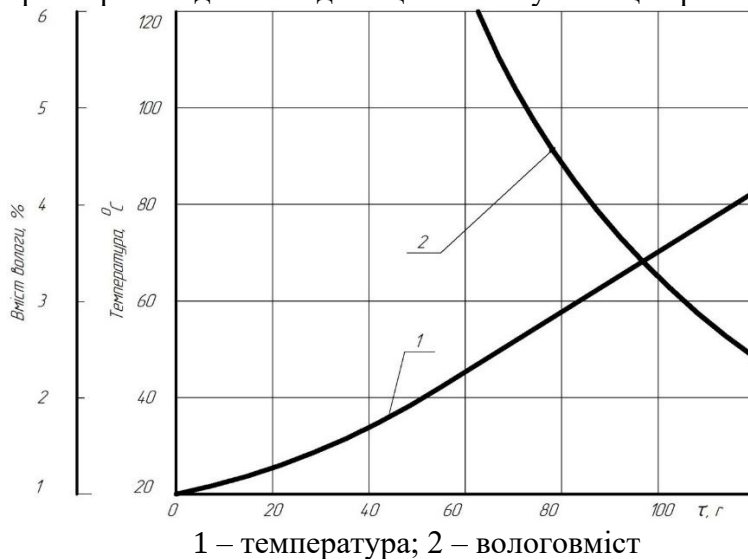


Рисунок 2 – Кінетика прогріву важкопрогріваємої дільниці ізоляції активної частини

ВИСНОВКИ

Запропоновано методику розрахунку режимів термовакuumної обробки силових трансформаторів.

Впровадження програми розрахунку режимів термовакuumної обробки дозволяє розробляти технологічні процеси на стадії проектування нових виробів та вдосконалювати діючу технологію термовакuumної обробки серійних трансформаторів.

Список використаних джерел

1. Банин Р. В. Разработка устройства токовой сушки изоляции обмоток асинхронных двигателей // Вестник КГУ, 2010. №1. – С. 78-84.
2. Банин Р. В. Совершенствование способа повышения эксплуатационной надежности асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве // Достижения науки и техники АПК, 2010. №10 – С. 71-73.
3. Сушка электрических машин и трансформаторов / И.П. Алякритский и др. – М.: Энергия, 1974. – 72 с.
4. Сивак Ю. П. Сучасні методи сушіння ізоляції трансформаторів [Електронний ресурс] / Ю. П. Сивак, Ю. В. Малогулко // Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 13-15 березня 2019 р. – Електрон. текст. дані. – 2019. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2019/paper/view/7045>
5. Риндлісбахер Г., М. фон Ах Сушка трансформаторов // АББ Ревю 3/2005 С. 66-69.

Машинобудування і зварювальне виробництво

6. Сердешнов А. П., Усов Г. Г. Сушка твердой изоляции силовых трансформаторов комбинированным методом //Агропанорама. – 2000. - С.32-35.
7. Пат. 713 879 RU, МПК (2006) H02K 15/00. Устройство для сушки силовых трансформаторов в полевых условиях сельских электрических сетей / Богатырев Н.И., Оськин С. В., Ефанов А. В., Миргородский А. В. ; Патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина. –№ 2019125885; заявл. 15.08.2019; опубл.: 10.02.2020, Бюл. № 4. – 14 с.
8. Рассальский А.Н., Солодуненко Д.В. Математическая модель процесса сушки изоляции трансформаторов тока // Електротехніка і Електромеханіка. 2003. №2 – С. 53-54.
9. Куц П.С., Пикус И.Ф. Теплофизические и технологические основы сушки высоковольтной изоляции. Минск: Наука и техника, 1979. – 33 с.
10. Теорія теплопровідності: підручник: підручник. для студ. спец. 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / А. В. Гільчук, А. А. Халатов, Т. В. Доник; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 131 с.

Tsokotun P.V., Kapustian O.Ye.

CALCULATION OF THERMAL VACUUM TREATMENT MODES FOR POWER TRANSFORMERS

The efficiency of enterprises at the current level of electrification depends on a stable power supply, one of the elements of which is a transformer. Reliable operation of a transformer is determined by the state of its insulation. To restore the dielectric properties of the insulation, which are damaged due to moisture, transformers that are under installation, operation and repair are heated and dried. showed that the simplest and most convenient to operate is equipment for thermovacuum treatment. Regardless of the method used, the drying process is expensive and energy-intensive. The purpose of the article is to propose and implement a procedure for building a mathematical model of thermovacuum treatment of power transformers. Mathematical modeling takes into account the complex, multilayer structure of transformers, heterogeneous materials, their thermophysical properties, as well as the features of the technological process. The active part is considered as an object consisting of series-connected heterogeneous elements made of different materials that are part of the design of the active part. The implementation of the program for calculating the thermal vacuum treatment modes allows developing technological processes at the design stage of new products and improving the existing technology of thermal vacuum treatment of serial transformers. The proposed method of drying transformers allows increasing their operational reliability, reasonably increasing their service life and, therefore, reducing the cost of their operation. A set of experimental works was carried out at the test site, which confirmed the reliability of the results obtained during theoretical studies and showed that the proposed parameters are reliable for assessing the state of transformer insulation.

Keywords: transformer, insulation, drying, mathematical model, thermal vacuum treatment.

Стаття надійшла 18.05.2025р.