

Вінницький національний технічний університет

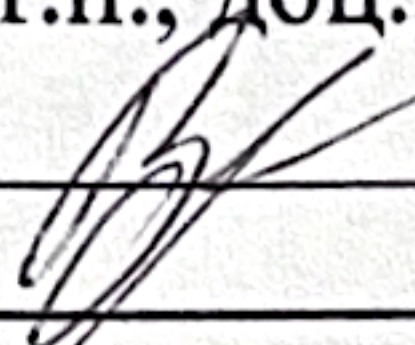
Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

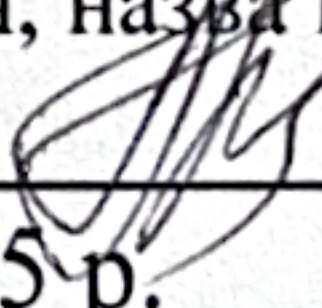
ФУНКЦІОНУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЗА ТЕМПЕРАТУРНИМИ
ТА ІЗОЛЯЦІЙНИМИ КРИТЕРІЯМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕС-216
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електричні станції»,
Коваль О. М. 

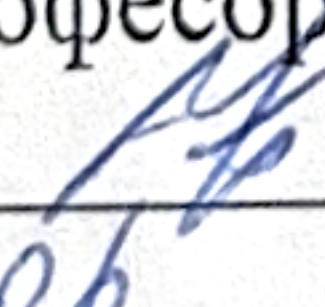
Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС
Лесько В.О. 

« 03 » 06 2025 р.

Рецензент: кти, доц., доц. каф. ЕСФЕМ
(наук.ступінь, вч.звання, назва кафедри)

Байденко О.В. 
« 07 » 06 2025 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.


« 04 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма – Електричні станції

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

«20» 03 2025 р.

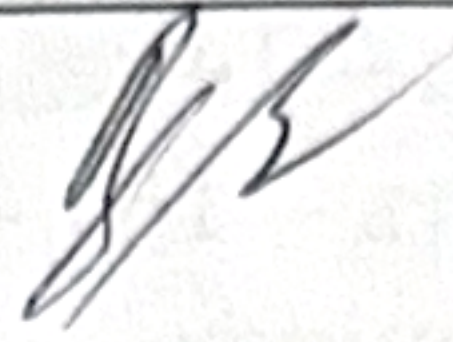
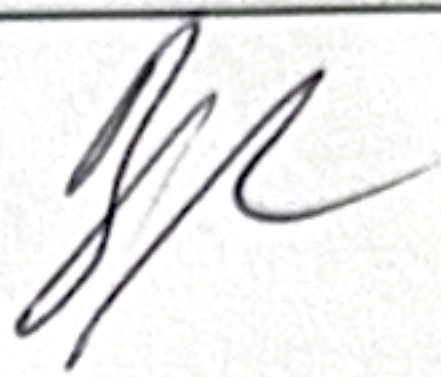
З А В Д А Н Н Я **НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Ковалю Олегу Михайловичу .

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Функціонування силових трансформаторів за температурними та ізоляційними критеріями експлуатаційної надійності»
Керівник роботи к.т.н., доцент каф. ЕСС Лесько В. О.
затверджена наказом вищого навчального закладу від 20.03.2025 року № 97
2. Термін подання студентом роботи 4 червня 2025 року
3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи:
1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х. : Видавництво «Форт», 2017. – 760 с. 2. «ПТЕ Технічна експлуатація електричних станцій та мереж.» 3. Електричні системи і мережі. Частина 1: навчальний посібник / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський. Вінниця : ВНТУ, 2020. 203 с. 4. Кулик В. В. Типові рішення при проектуванні електричних мереж напругою 110-330 кВ: навчальний посібник / В. В. Кулик, В. В. Тептя, О. Б. Бурикін, О. В. Сікорська. Вінниця: ВНТУ, 2018. 110 с.
4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Випробування і визначення стану ізоляції. 2. Вимоги що до функціонування силових трансформаторів за умов експлуатації. 3 Температурний режим силових трансформаторів в процесі експлуатації. 4. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Основні типи пошкодження трансформаторів 2. Системи охолодження трансформаторів. 3. Перевантажувальна здатність

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Лесько В. О., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці	Лесько В. О., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		

7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Примітки
		початок	кінець	
1	Формування та затвердження задач БКР	21.03.2025	24.03.2025	Вик
2	Вступ. Огляд літературних джерел	25.03.2025	30.03.2025	Вик
3	Вимоги що до функціонування силових трансформаторів за умов експлуатації (розділ 1 БКР)	31.03.2025	07.04.2025	Вик
4	Випробування і визначення стану ізоляції (розділ 2 БКР)	08.04.2025	11.04.2025	Вик
5	Температурний режим силових трансформаторів в процесі експлуатації (розділ 3 БКР)	12.04.2025	19.04.2025	Вик
6	Виконання розділу охорона праці (розділ 4 БКР)	20.04.2025	30.04.2025	Вик
7	Формування висновків по роботі	01.05.2025	03.05.2025	Вик
8	Оформлення пояснювальної записки	04.05.2025	19.05.2025	Вик
9	Виконання графічної частини та оформлення презентації	20.05.2025	27.05.2025	Вик
10	Перевірка БКР на плагіат. Попередній захист БКР.	28.05.2025	3.06.2025	Вик
11	Рецензування БКР	04.06.2025	09.06.2025	Вик
12	Захист БКР	10.06.2025	12.06.2025	Вик

Студент

(підпис)

О.М. Коваль

Керівник роботи

(підпис)

В. О. Лесько

АНОТАЦІЯ

Коваль О. М. «Функціонування силових трансформаторів за температурними та ізоляційними критеріями експлуатаційної надійності». Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 69 с. Рис. 10, табл.18, бібліогр. 31.

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з розрахунково-пояснювальної записки, яка виконана на 69 друкованому аркуші та складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних і літературних джерел. У даній бакалаврській роботі розглядаються основні види ушкоджень силових трансформаторів, способи діагностики стану, питання профілактичних й інших випробувань трансформатора, його елементів і допоміжного устаткування.

Ключові слова: силовий трансформатор; надійність експлуатації; температурний режим; електрична ізоляція; діагностика стану; випробування трансформаторів; пошкодження трансформатора; профілактика; допоміжне обладнання; залишковий ресурс.

ANNOTATION

Koval O. M. “Functioning of power transformers according to temperature and insulation criteria of operational reliability”. Bachelor's qualification work. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 69 p. Fig. 10, table 18, bibliography 31.

The bachelor's qualification work consists of a calculation and explanatory note, which is made on 69 printed sheets and consists of an introduction, 5 sections, conclusions, a list of used and literary sources. This bachelor's work considers the main types of damage to power transformers, methods of diagnosing the condition, issues of preventive and other tests of the transformer, its elements and auxiliary equipment.

Keywords: power transformer; operational reliability; temperature regime; electrical insulation; condition diagnostics; testing of transformers; transformer damage; prevention; auxiliary equipment; residual resource.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. Вимоги що до функціонування силових трансформаторів за умов експлуатації.....	9
2. Випробування і визначення стану ізоляції.....	13
3 Температурний режим силових трансформаторів в процесі експлуатації.....	22
3.1 Вимір температури і її перевищення.....	27
3.2 Перевантаження електроустаткування, припустимі за критерієм граничної температури.....	29
3.3 Перевантаження трансформаторів по граничній температурі.....	34
4 Аналіз теплового балансу в силовому трансформаторі.....	43
5. Охорона праці.....	53
ВИСНОВКИ.....	64
ЛІТЕРАТУРА.....	65
Додатки	69

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку енергетики особливої актуальності набувають питання забезпечення надійності, ефективності та довговічності роботи електрообладнання, зокрема силових трансформаторів. Силові трансформатори — це ключові елементи енергосистем, які забезпечують перетворення та передачу електричної енергії на різні рівні напруг. Вони відіграють вирішальну роль у функціонуванні електромереж, від побутових споживачів до масштабних промислових об'єктів. Вихід трансформатора з ладу може спричинити серйозні економічні збитки, порушення технологічних процесів і навіть надзвичайні ситуації.

Одним із найважливіших аспектів забезпечення стабільної роботи трансформаторів є підтримання їхньої експлуатаційної надійності на належному рівні. Під експлуатаційною надійністю розуміють здатність трансформатора виконувати задані функції у встановлених режимах та умовах протягом визначеного терміну без збоїв і відмов. Надійність трансформатора значною мірою залежить від таких критичних факторів, як температурний режим і стан електричної ізоляції, що формують основу його технічного ресурсу.

Температура, яка виникає під час роботи трансформатора, є одним із головних параметрів, що впливають на швидкість старіння ізоляційних матеріалів, деградацію обмоток, а також ймовірність розвитку внутрішніх дефектів. Підвищення температури вище допустимих норм, навіть протягом короткого часу, значно пришвидшує процеси термічного старіння, зменшуючи залишковий ресурс трансформатора. У свою чергу, стан ізоляції є критично важливим для запобігання пробоям, міжвитковим замиканням та іншим видам електричних пошкоджень. Оцінка стану ізоляції дозволяє виявити потенційні дефекти ще до їхнього переходу в аварійний режим.

Зважаючи на вищевикладене, **особливої актуальності набуває дослідження** функціонування силових трансформаторів саме через призму

температурних та ізоляційних критеріїв експлуатаційної надійності. Ретельний аналіз температурних режимів, методів контролю та діагностики ізоляції, а також інтеграція цих факторів у систему оцінки надійності дають змогу не лише своєчасно виявляти потенційні відмови, а й прогнозувати залишковий ресурс обладнання.

Метою даної бакалаврської роботи є комплексне дослідження впливу температурного режиму та стану ізоляції на експлуатаційну надійність силових трансформаторів. Контроль параметрів силових трансформаторів, реалізація якої буде розглянута в наступній послідовності:

- Вимоги що до функціонування силових трансформаторів за умов експлуатації;
- Випробування і визначення стану ізоляції ;
- Температурний режим силових трансформаторів в процесі експлуатації ;
- Вимір температури і її перевищення ;
- Перевантаження електроустаткування, припустимі за критерієм граничної температури ;
- Перевантаження трансформаторів по граничній температурі ;
- Аналіз теплового балансу в силовому трансформаторі ;

Об'єктом дослідження в даній роботі є силові трансформатори, які експлуатуються в умовах реальних енергетичних систем. Предметом дослідження виступають температурні та ізоляційні показники, що визначають експлуатаційну надійність трансформаторів.

Практичне значення роботи полягає у можливості застосування результатів дослідження для оптимізації технічного обслуговування та підвищення ефективності експлуатації силових трансформаторів, а також у зменшенні ймовірності аварійних відмов і продовженні терміну служби обладнання.

1. ВИМОГИ ЩО ДО ФУНКЦІОНУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЗА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Під час експлуатації трансформаторів (автотрансформаторів) повинна бути забезпечена їх надійна робота шляхом:

- дотримання навантажувальних і температурних режимів, рівня напруги, характеристик масла й ізоляції у межах встановлених норм;
- утримування у справному стані пристроїв охолодження, регулювання напруги, захисту масла та інших елементів.

Конструювання трансформаторів передбачає їх тривалу безперервну роботу протягом 25-30 років. Для забезпечення впродовж цього часу надійної безаварійної роботи експлуатація трансформаторів повинна проводитися з дотриманням його номінальних параметрів за потужністю, рівнем напруги і режимом охолодження. Порушення цих правил може призвести до підвищеного нагріву трансформатора, прискореного старіння його ізоляції та передчасного виходу з ладу.

Необхідно підтримувати на достатньо високому рівні характеристики ізоляції трансформатора, якість масла, а також слідкувати за справним станом апаратури, встановленої на трансформаторі, від стану якої залежить надійна довострокова робота трансформатора на підставі таких вимог:

а) періодичність ремонтів трансформаторів, що відпрацювали по над 25 років, визначається згідно вимог п.п. 12.3.28 і 12.3.29 ПТЕ;

б) лист Міненерго України № 05/22-259 від 25.07.93 "Про підвищення належності електропостачання" – на енергопідприємствах повинні бути переглянуті регламенти профілактичних випробувань устаткування, що відпрацювало понад 25 років.

Трансформатори, обладнані пристроями газового захисту, повинні бути встановлені так, щоб кришка мала підйом у напрямку до газового реле не менший ніж 1%, а маслопровід до розширника — не менший ніж 2%. Порожнина випускної труби повинна бути з'єднана з порожниною

розширника. У разі необхідності мембрана (діафрагма) на випускній трубі повинна бути замінена аналогічною тій, яка була поставлена заводом-виробником.

Газовим захистом обладнуються всі масляні трансформатори потужністю 1,0 МВА і вище. Захист здійснюється за допомогою спеціального газового реле, що реагує на виділення газів. Внутрішні пошкодження та підвищені нагріви окремих елементів активної частини, як правило, призводять до розкладу масла і твердої ізоляції трансформатора, що супроводжується виділенням газів.

Інтенсивність виділення газів залежить від характеру і обсягу пошкодження. Початок деяких тяжких пошкоджень трансформаторів, таких як "повзучі" розряди в основній ізоляції, які розвиваються по ізоляційних щитах і циліндрах, і "пожеж" сталі, супроводжуються невеликим виділенням газів. Для забезпечення спрямовування руху газів до газового реле і концентрації в ньому якомога більшої кількості газів, для прискорення спрацьовування цього реле, трансформатори встановлюються з відповідним підйомом кришки бака і маслопроводу до газового реле. Нахил кришки досягається встановленням металевих підкладок під котки трансформатора з боку розширювача (рисунок 1.1).

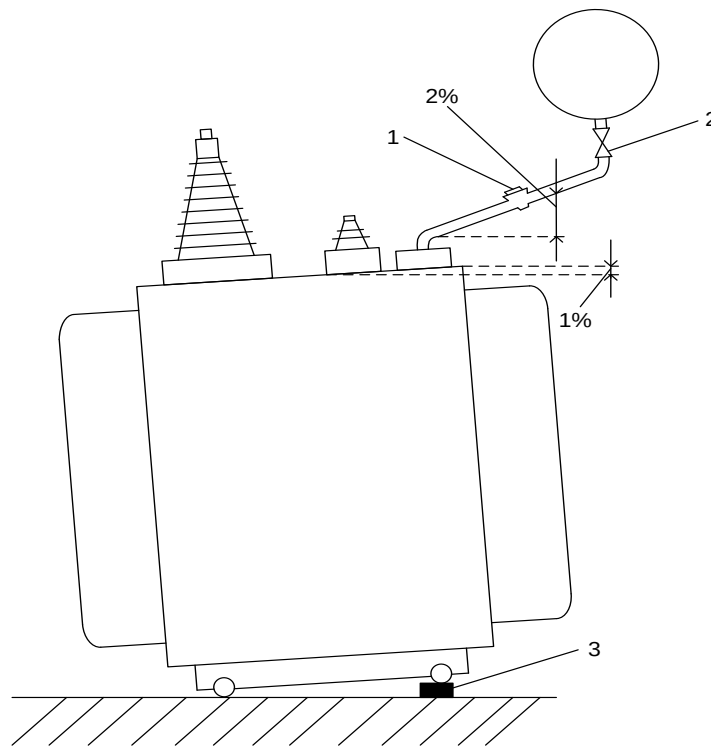


Рисунок 1.1 - Схема установки трансформатора з нахилом бака:

1 - газове реле; 2 - кран; 3 - підкладка під котки трансформатора

Під час монтажу трансформаторів та реакторів з плоскою кришкою, обладнаних газовим захистом, якщо про це зазначено в заводській інструкції, необхідно забезпечити нахил бака, за якого кришка і верхня частина бака мали б підйом у напрямку газового реле не менше 1—1,5%, а маслопровід від бака до розширювача — не менше 2—4%. Якщо трансформатор має газовідвідний трубопровід, приєднаний до верхньої частини бака у декількох місцях по його довжині, то нахил трансформатора по поперечній осі має бути таким, щоб місця приєднання газовідводів опинились в найвищій точці. За напівциліндричної форми верхньої частини бака газовідводи приєднуються до найвищої точки (посередині) і для таких трансформаторів нахил не вимагається.

Для відділення розширювача від бака, на випадок проведення різних ремонтних робіт, на маслопроводі, який з'єднує розширювач з баком, встановлюється кран (автоматичний клапан). Цей кран під час роботи трансформатора повинен бути відкритим. Для того, щоб не було відмови в

роботі газового реле у разі випадкового перекриття цього крана, він встановлюється між розширювачем і газовим реле. Для вирівнювання рівня масла в розширювачі і випускній (захисній) трубі потрібно, щоб випускна труба трансформатора у верхній частині з'єднувалась з простором над маслом в розширювачі. У протилежному разі можлива невірна робота газового захисту через різкий перетік масла між розширювачем і випускною трубою у випадках пошкодження мембрани (діафрагми) і зміни рівня масла у випускній трубі.

У випадках ремонту мембрани (заміни), вона повинна виготовлятися із скла товщиною, аналогічній тій, яка була виготовлена заводом-виробником. Використання металевої мембрани не допускається.

У випадках, коли під час роботи трансформатора спостерігається помилкова робота газового реле через вібрацію маслопроводу, що іноді трапляється на потужних трансформаторах, необхідно вжити заходів до зменшення вібрації маслопроводу.

2 ВИПРОБУВАННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ

Профілактичні випробування трансформаторів виробляються відповідно до вимог ПТЭ й норм випробувань електроустаткування при кожному поточному й капітальному ремонті. Поточний ремонт трансформаторів із пристроями РПН виробляється щорічно, без РПН - 1 раз у два роки для головних трансформаторів електростанцій і підстанцій і трансформаторів власних потреб й 1 раз в 4 роки для всіх інших. Профілактичні випробування в основному зводяться до випробувань ізоляції й вимірам перехідних опорів контактів.

Таблиця 2.1. Обсяг профілактичних випробувань трансформаторів

Проведені виміри і перевірки	Випробування				
	При уведенні в експлуатацію	при капітальному ремонті	При поточному ремонті	Між ремонтний період	
Опір ізоляції,	+	+	+	+	
коэф. абсорбції $\text{tg}\delta$	+	+	-	+	
Ємність, $C_2/C_{50}, \Delta C/C$	+	+	-	-	
Випробування підвищеною напругою	+	+	-	-	
Опір обмоток при постійному струмі		+	+	-	-
Коеф. трансформації		+	+	-	-
Група зеднань		+	+	-	-
Струм і втрати Х.Х.		+	+	-	-
Перевірка перемикаючого пристрою		+	+	+	-
Перевірка		+	+	+	+

індикаторного силікагеля				
Перевірка бака тиском	+	+	-	-
Перевірка пристрою охолодження	+	+	+	-
Трансформаторне масло	+	+	+	+

Опір ізоляції $\text{tg} \delta$ випробування підвищеною напругою й випробування масла вводів	+	+	-	+
Перевірка якості ущільнення вводів	+	+	-	-
Перевірка манометрів вводів	-	-	-	+

Таблиця 2.2 З'єднання обмоток при вимірі характеристик ізоляції трансформатора

Вимірювальні обмотки	Заземлені частини
Двох обмоткові трансформатори	
НН	ВН, бак
ВН	НН, бак
ВН+НН	Бак
Трьох обмоткові трансформатори	
НН	СН, ВН, бак
СН	ВН, НН, бак
ВН	НН, СН, бак
ВН+СН	НН, бак
ВН+СН+НН	Бак

На практиці застосовуються й інші види випробувань. Якщо є ознаки погіршення ізоляції або припущення про її погіршення, профілактичні випробування виробляються в період між ремонтами. Результати випробувань порівнюють із установленими нормами, а також з раніше обмірюваними значеннями.

Випробування ізоляції є основним елементом усяких профілактичних випробувань. Ізоляція піддається тепловим, механічним й електричним впливам. При цьому прискорюється протікання хімічних процесів (окислювання), змінюється структура ізоляції, знижується механічна міцність, відбувається розшарування. Особливо шкідливі впливи на ізоляцію трансформаторів роблять зволоження й забруднення. Волога проникає в глиб ізоляції, створюючи небезпеку електричного пробою. Повністю уникнути шкідливих впливів практично неможливо. У результаті ізоляція старіє й у ній виникають загальні (рівномірно розподілені) і місцеві (зосереджені) дефекти. Навіть такий ефективний засіб діагностики стану трансформаторів, як

хроматографічний аналіз розчинених у маслі газів, не говорячи вже про зовнішній огляд, не дозволяє виявити всіх можливих дефектів ізоляції. Саме цим викликана необхідність проведення профілактичних випробувань із відключенням трансформатора.

Розглянемо основні види профілактичних випробувань ізоляції трансформаторів. Вимір опору ізоляції виробляється за допомогою мегомметра і є одним з найбільш простих і розповсюджених видів випробувань. Воно може дати подання про середній стан ізоляції, при явних ушкодженнях указати на їхню наявність, а в деяких випадках допомагає визначити місце дефекту.

Для виміру опору ізоляції трансформатора використовуються мегомметри з напругою 2,5 до В. Для трансформаторів 220 кВ і більш доцільно застосовувати мегомметр зі стабілізуючою електронною приставкою. Якщо генератор мегомметра має ручний привод, рукоятку треба обертати із частотою 120 про/хв. До затискача Л (лінія) підключають одну обмотку трансформатора, до затискача З (земля) - всі інші обмотки, з'єднані з баком або іншим заземленим елементом (табл. 2.2).

У табл. 2.2 позначені: ВН - обмотка вищого, СН - середнього, НН – нижчої напруги. В автотрансформаторах, що мають загальну обмотку ВН і СН й окрему обмотку НН, з'єднання виробляються як для двох обмоткового трансформатора. Якщо обмотка НН відсутня виконується один вимір. При профілактичних випробуваннях вимірювати опір ізоляції по всіх перерахованих схемах немає необхідності.

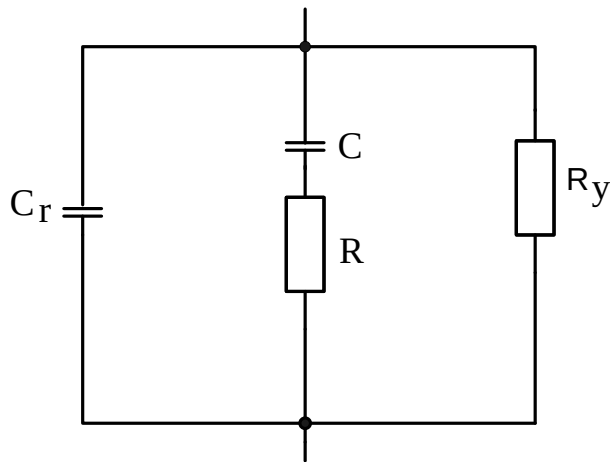


Рис.2.1 - схема заміщення внутрішньої ізоляції трансформатора

Перед подачею напруги від мегомметра рекомендується спочатку розкрутити його генератор до повної швидкості й лише тоді подавати напруга на трансформатор (це дозволить правильно визначити коефіцієнт абсорбції — див. нижче). При цьому спочатку відбудеться швидкий заряд геометричної ємності C_r (рис 2.1), обумовленою конструкцією ізоляції, потім буде плавно заряджатися ємність C , що разом з опором R , характеризує наявність зволоження, забруднень і т.д., і, нарешті, що протікає струм установиться й буде визначатися опором ізоляції постійному струму R_y . Цей сталий струм називається струмом витoku. Відповідно до зміни струму буде змінюватися й значення опору, вимірюване мегомметром. Стале значення R_y досягається досить довго. За опір ізоляції даної обмотки (або між обмотками) трансформатора приймають значення опору R_{60} , обмірюване через 60 с після подачі випробуваної напруги. Після виміру до проведення інших випробувань потрібно розрядити обмотку трансформатора. Істотний вплив на результати виміру робить температура. Перерахування опору ізоляції R_1 , обмірюваного при температурі t_1 , до температури t_2 виробляється по формулі

$$R_2 = K_2 R_1$$

$$\begin{aligned} & \text{якщо } t_2 > t_1, \text{ або } R_2 \\ & = R_1/K_2, \end{aligned} \quad (2.1)$$

якщо $t_2 < t_1$. Коэффициент K_2 визначається по табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Залежність перерахункових коефіцієнтів від різниці температур

Коефіцієнт	Значення коефіцієнта при $\Delta t = t_2 - t_1$ °C									
	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30
K_1 (перерахування $\text{tg}\delta$)	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,31	1,51	1,75	2	2,3
K_2 (перерахування R_{60})	1,04	1,08	1,13	1,17	1,22	1,5	1,84	2,25	2,75	2,4
K_3 (перерахування $\text{tg}\delta_M$)										

Однак температурні залежності для різних трансформаторів так сильно відрізняються одна від іншої, що на практиці не слід користуватися перерахуванням на різницю температур більш ніж ± 5 °C.

Якщо отримане Δt не зазначено в таблиці, коефіцієнт визначається множенням коефіцієнта K' , що відповідає найближчої меншої різниці температур t , кратної 5 °C, на коефіцієнт K'' , що відповідає різниці $t - t'$.

Наприклад, для $t = 13$ °C знаходимо $K' = 1,31$ при $t = 10$ °C $K_1'' = 1,09$ при $t - t' = 13 - 10 = 3$ °C, і тоді $K'' = K'_1 K_1'' = 1,31 \cdot 1,09 = 1,43$.

Нормами обмежені мінімальні значення опору ізоляції обмоток при введенні в експлуатацію й після капітального ремонту (табл.2.4).

При капітальному ремонті опір ізоляції обмоток трансформаторів до 35 кВ включно потужністю до 10 000 кВА включно не повинне знизитися більш ніж на 40 %, для інших трансформаторів - на 30 %. Більше значне

зменшення свідчить про зволоження або забруднення ізоляції в процесі ремонту

Таблиця 2.4 Мінімальний опір ізоляції обмоток трансформаторів

Вид випробувань	Номинальні дані трансформатора		Мінімальне R_{60} , МОм, при температурі обмоток, °С						
	Напруга, кВ	Потужність, кВА	10	20	30	40	50	60	70
При введенні в експлуатацію	<35	< 10000 > 10 000	450 900	300 600	200 400	130 60	90 180	60 120	40 80
	110-750	Всіх потужностей	Не менш 70 % значення, зазначеного в паспорті						
Після капітального ремонту	<35	Всіх потужностей	450	300	200	130	90	60	40
	110	Всіх потужностей	900	600	400	260	180	120	80

У всіх випадках, у тому числі коли мінімально припустиме значення опору ізоляції не обговорено, воно не повинне зменшуватися в порівнянні з попереднім виміром більш ніж в 2 рази. При більшому зменшенні необхідно з'ясувати причину цього й вжити заходів по відновленню ізоляції.

Коефіцієнт абсорбції виражається відношенням опору ізоляції, обмірюваного через 60 с після подачі напруги від мегомметра, до опору, обмірюваному через 15 с, тобто $K''_{аб} = R_{60}/R_{15}$. Він характеризує ступінь зволоження й забруднення ізоляції. Для сухої ізоляції цей коефіцієнт дорівнює 1,5—2, для сильно зволоженої він близький до одиниці. Коефіцієнт абсорбції залежить від температури, наближаючись до одиниці при 80 °С. Тому виміри повинні вироблятися при температурі 10—30 °С. При введенні в експлуатацію й після капітального ремонту ізоляція вважається задовільною, якщо $K''_{аб} > 1,3$.

Вимір ємності й тангенса кута діелектричних втрат ізоляції обмоток трансформатора виконується для схем, зазначених у табл.2.2

Іноді потрібно визначити ємність й $\tan \delta$ "по зонах", тобто виділити певну зону. У цьому випадку крім двох основних використається третій затискач вимірювального моста - "Екран". Наприклад, якщо потрібно визначити

ємність або $\operatorname{tg} \delta$ між обмотками ВН і НН двох обмоткового трансформатора, те ці обмотки приєднують до вимірювальних затискачів *A* и *C*, а бак — до затискача *З*. Крім нормальної схеми моста, застосовують так звану перевернену схему, у якій випробуваний об'єкт заземлений. Зокрема, така схема використається завжди, коли вимір виробляється між обмоткою й баком. Виміри по зонах роблять для трансформаторів напруги 110 кВ і більше. Схеми приєднання обмоток і підключення моста наведені в табл.2.5. У цьому випадку вимірювання по схемах, наведених у табл.2.2 не обов'язкові.

Виміри роблять на трансформаторі, залитому маслом, через 0,5 - 2 діб після заливання. У трансформаторах з примусовою циркуляцією масла в цей період варто зробити перемішування масла шляхом включення насосів. Розглянемо докладніше вимір $\operatorname{tg} \delta$ за допомогою моста типу Р5026.

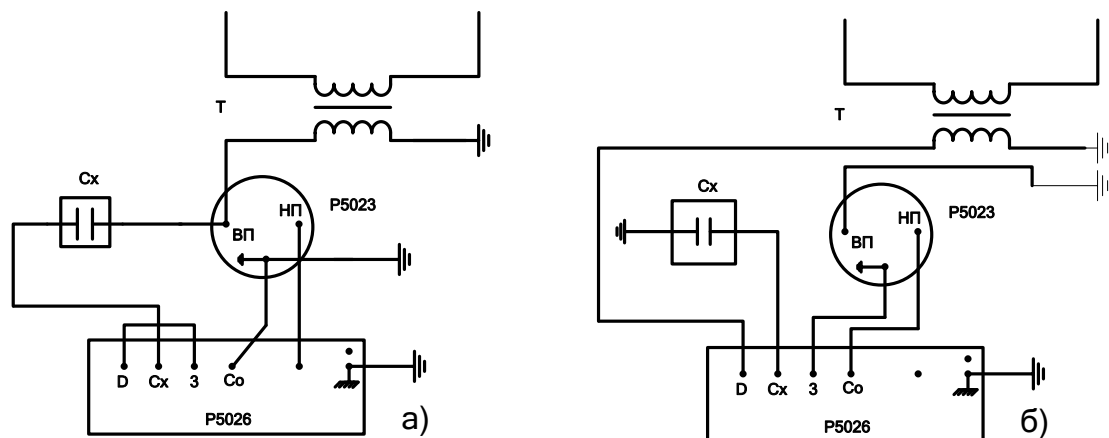


Рис. 2.2 Підключення моста змінного струму Р5026 при вимірі ємності і $\operatorname{tg} \delta$ з зовнішнім конденсатором Р5023 :

а) – пряма схема ; б) – перевернута схема ;

На високій напрузі (а при випробуваннях трансформаторів це має місце досить часто) міст використається із зовнішнім зразковим повітряним конденсатором Р5023. Схеми з'єднань наведені на рис. 2.2. Вони повністю відповідають схемам. Позначення затискачів на схемах прийняті відповідно до маркування моста й зразкового конденсатора. Затискач C_x на рис. 2.2 відповідає точці *A* , затискач .5/7 конденсатора — точці *C*.

При вимірах ємності й $\operatorname{tg} \delta$ дотримують правил, передбачені для випробувань електроустаткування підвищеною напругою, тим більше що апаратури, необхідна для виміру, розташовується в безпосередньої близькості від об'єкта. Особлива увага потрібно при вимірюванні за переверненою схемою, коли значне число елементів моста перебуває під напругою. Корпус моста встановлений поза огороженням, але його задня стінка повинна бути розташована на рівні огороження, а високовольтне уведення з підходящим до нього екранованим сполучним кабелем — в обгородженій зоні. У ній же перебуває іспитовий трансформатор T і зразковий конденсатор P5023.

Таблиця 2.5 Приєднання обмоток при вимірі характеристик ізоляції трансформатора по зонах

Вимірювальна зона	Схема включення моста	Підключення трансформатора			
		Підключення моста			
		до вимірювальної точки А	схемі точка С	до джерела живлення	до землі
Двох обмоткові трансформатори					
НН -бак	Перевернена	НН	- ВН	D	C
НН -ВН	Нормальна	НН	ВН Бак	C	Э. D
ВН -бак	Перевернена	ВН	- НН	D	C
Трох обмоткові трансформатори					
НН -бак	Перевернена	НН	- СН, ВН	D	C
НН-СН	Нормальна	НН	СН Бак, ВН	C	Э, D
СН- бак	Перевернена	СН	- ВН, НН	D	C
СН -ВН	Нормальна	СН	ВН Бак, НН	C	Э, D
ВН -бак	Перевернена	ВН	- СН, НН	D	C

3 ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Електричне устаткування й провідники при роботі нагріваються за рахунок втрат енергії в струмоведучих елементах і в магнітних сердечниках, що веде до підвищення їхньої температури. Підвищення температури вище певних меж викликає необоротні зміни в ізоляції, її прискорене старіння (зниження механічної й електричної міцності). Крім того, виникають додаткові внутрішні напруження в ряді деталей конструкції. Наслідки нагрівання відбиваються на стані устаткування, його безвідмовній роботі і терміну служби. В експлуатації тому ведеться систематичний контроль за тепловим режимом відповідальних деталей електроустаткування.

Припустимі теплові режими устаткування визначаються в інструкціях для експлуатації й у вказівках заводів-постачальників. Ці вказівки засновані як на проведених випробуваннях, так і на теплових розрахунках, у яких використовуються залежності між навантаженням устаткування й температурою. В окремих випадках такі розрахунки доцільно проводити й в умовах експлуатації (наприклад, для оцінки допустимості режиму, не передбаченого в інструкціях).

Теплообмін. Так називають процес перенесення тепла в даному тілі від більш нагрітих до менш нагрітих його частин, а також до сусідніх тіл і в довкілля. Розрізняють три види теплообміну: через теплопровідність, конвекцію і випромінювання (випромінювання).

Явище теплопровідності характерне для твердих тіл. Основний закон теплопровідності згідно Фур'є може бути представлений математично таким чином:

$$\theta = -\lambda \frac{\delta J}{\delta v} \sum , \quad (3.1)$$

де Φ - тепловий потік, Вт, через ізотермічний майданчик S , м^2 , у напрямі нормалі в ній; $d\vartheta/dn$ - градієнт температури у напрямі нормалі; λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Відношення Φ/S є щільністю теплового потоку в якій-небудь точці поверхні, $\text{Вт}/\text{м}^2$

$$\theta = \frac{\hat{O}}{\Sigma} = -\lambda \frac{\delta J}{\delta v}. \quad (3.2)$$

Знак мінус в приведених виразах вказує, що тепло передається у напрямі убутання температури уздовж нормалі до майданчика.

Поняттям конвекції користуються при описі передачі тепла від поверхні твердих тіл до рідини або газу. Це найбільш складний вигляд теплообміну, в якому бере участь теплопровідність і перенесення тепла потоком рідини або газу. Рідина (газ), дотична з нагрітою поверхнею, нагрівається, щільність її зменшується, вона піднімається. На її місце личить холодніша рідина, газ. Разом із струмом рідини, газу відбувається перенесення тепла. Конвекцію називають вільною, якщо рух рідини, газу відносно нагрітої поверхні відбувається лише унаслідок різниці щільності нагрітих і холодних шарів рідини, газу. Якщо рідина, газ наводиться в рух зовнішніми силами (різницею тисків) або штучно за допомогою насоса, вентилятора, конвекцію називають вимушеною. Тепловіддача при цьому різко збільшується.

Кількість тепла, що відводиться через вільну конвекцію, залежить від теплопровідності рідини (газу), її щільності і в'язкості, форми, розмірів і стану охолоджуваної поверхні і перевищення температури тіла над температурою довкілля. Для визначення тепла, що відводиться, використовують експериментальні дані, отримані на натурних зразках і моделях. На підставі таких досліджень запропоновані відповідні розрахункові формули, придатні в окремих випадках.

Тепловим випромінюванням називають перенесення тепла від більш нагрітої поверхні до менш нагрітою електромагнітними хвилями через роздільне

газове середовище. Остання приймається повністю прозорою для теплових променів.

Основний закон теплового випромінювання, даний Стефаном і Больцманом, визначає щільність теплового потоку випромінювання, Вт/м², таким чином:

$$q_{\pi} = \sigma_0 \varepsilon (\vartheta_K^4 - \vartheta_{K\text{в}}^4), \quad (3.3)$$

де σ_0 - коефіцієнт випромінювання або. постійна Стефана - Больцмана, рівна $5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² · К⁴ ; ε - міра чорноти випромінюючої поверхні; ϑ_K і $\vartheta_{K\text{в}}$ - температури випромінюючої поверхні і повітря в кельвінах ($K_{\text{в}} = t_{\text{в}} + 273$).

Нагадаємо вираження і їхній вивід, часто застосовувані в подібних теплових розрахунках. Нехай в устаткуванні є втрати потужності P , Вт; тепловіддача навколишнє середовище K , Вт/°С; теплоємність устаткування C , Вт · с/°С; різниця температури устаткування навколишнього середовища $\vartheta - \vartheta_0 = \theta$, °С (цю різницю прийнято називати перевищенням температури або перегрівом). Час позначимо через t с.

Якщо прийняти наступні допущення:

віддача тепла в навколишнє середовище пропорційна різниці температур устаткування й середовища;

теплоємність навколишнього середовища необмежена;

умови охолодження по всій поверхні однакові;

втрати потужності, коефіцієнти теплоємності й тепловіддачі постійні (не залежать від температури),

те можна написати наступне вираження:

$$P dt = K \theta dt + C \theta. \quad (3.4)$$

Фізичний зміст цього виразу полягає в тому, що енергія втрат, отримана обладнанням, частиною віддається в навколишнє середовище (перший член правої частини), а частиною поглинається встаткуванням за рахунок його теплоємності (другий член). При цьому перевищення температури встаткування θ збільшується доти, поки не наступить сталий стан, при якому воно залишається постійне й рівним θ_y . Вираз (3.4) прийме

вид $P = K\theta_y$ тому що другий член (3.4) стане рівним нулю, звідки стале перевищення температури, °C,

$$\theta = Pt/C \quad (3.5)$$

Якщо припустити, що нагрівання відбувається без віддачі енергії в навколишнє середовище, то нулю буде дорівнювати перший член (3-4) і вираження прийме вид $Pt = C\theta$, звідки

$$\theta = Pt / C \quad (3.6)$$

Час, протягом якого перевищується температури θ у цих умовах стане рівним θ_y , прийнято називати постійною часу нагрівання або постійної нагрівання. З (3-5) і (3-6) постійна нагрівання, с, дорівнює:

$$T = \theta_y C / P = PC / KP = C / kS \quad (3.7)$$

де k — коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(°C·см²), а S — охолоджена поверхня устаткування, см².

Використовуючи отримані співвідношення при інтегруванні (3.4) можна одержати залежність перевищення температури θ , °C, від часу t у процесі нагрівання устаткування від початкового перевищення θ_1 , до сталого значення θ_2 , °C:

$$\theta = \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1) \cdot (1 - e^{-t/T}). \quad (3.8)$$

Виразення (3.8) справедливо як для нагрівання, так і для охолодження встаткування. При нагріванні $\theta_1 < \theta_2$, а при охолодженні $\theta_1 > \theta_2$ і $(\theta_1 - \theta_2)$ є негативною величиною.

Рівняння (3.8) є сумою постійної величини θ_1 і змінної величини, що змінюється по експоненті, як це представлено на рисунку 3.1 для процесів нагрівання (рисунок 3.1, а) і охолодження (рисунок 3.1,б). Його неважко побудувати графічно, якщо приймати значення t кратними постійним

нагрівання: $T, 2T, 3T, 4T$. Тоді $e^{-t/T}$ буде дорівнює: 0,37; 0,14; 0,05; 0,01, а значення

$1 - e^{-t/T}$ вийде рівним 0,63; 0,86; 0,95; 0,99. Сталий стан процесу наступить практично через час, рівне $4T$

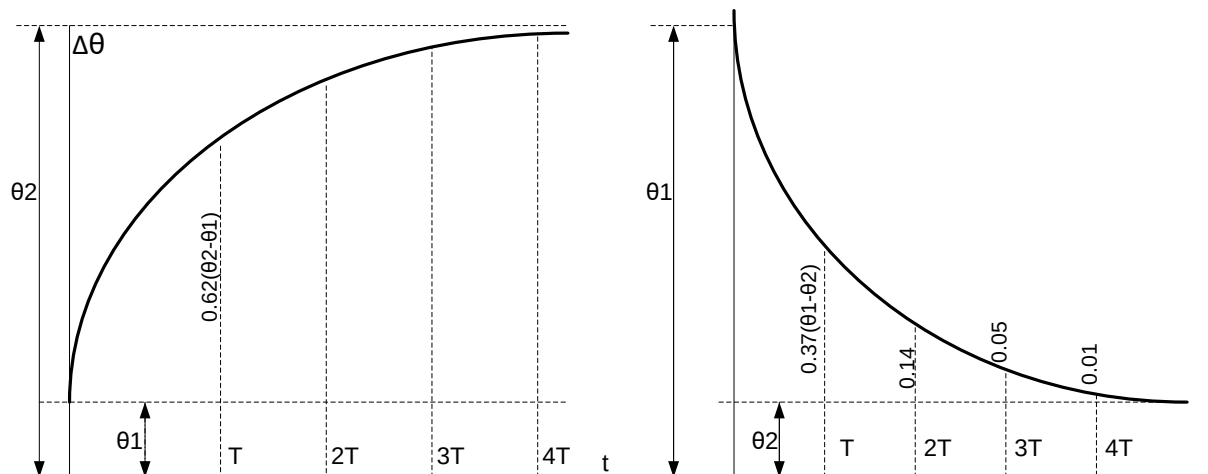


Рисунок 3.1 Перехід устаткування від одного сталого теплового стану до іншого

Вирази (3.5)-(3.8) будуть застосовуватися при подальшому викладі. На їхньому використанні засновані приписання ряду інструкцій, наприклад вказівки ГОСТ 1209-69 про перевантаження трансформаторів.

Хоча допущення, прийняті при виводі вираження (3.4), є трохи наближеними, результати розрахунків по (3.5)-(3.8) теплових режимів провідників, апаратів, трансформаторів досить добре збігаються з досвідом. Однак для більше складного встаткування (наприклад, для електричних машин) вони можуть дати тільки загальне подання про характер протікання процесів нагрівання й охолодження.

Допущення про сталість теплоємності й тепловіддачі можуть бути прийняті тільки при відносно вузьких межах зміни температури так само як і допущення про сталість активних втрат в обмотках (через залежність опору

їх від температури). Тому нагрівання при короткому замиканні характеризується більше складними залежностями.

3.1 Вимір температури і її перевищення

Оскільки тепловий режим устаткування має дуже велике значення для безвідмовної роботи і порушення цього режиму можуть привести до зниження терміну служби устаткування, необхідний систематичний контроль за температурами й перевищеннями температур найбільш відповідальних елементів. Для цієї мети застосовуються прилади і пристрої, що дозволяють вимірювати як місцеві, так і середні температури й перевищення температур. Ці прилади й пристрої можуть бути стаціонарними й переносними. Нижче розглядаються схеми й особливості використання основних з них.

Вимір за допомогою термометрів є одним з найбільш простих методів для виміру місцевих температур. Убудовані стаціонарні термометри застосовуються для контролю температури масла трансформаторів, що прохолоджує повітря й газу в електричних машинах і масла в підшипниках. Краще застосування спиртових термометрів перед ртутними, тому що в останні можливий додаткове нагрівання ртуті вихровими струмами, що виникають при наявності магнітних потоків розсіювання.

Для забезпечення мінімального перепаду між температурою масла й термометрів у кришках трансформаторів і в підшипниках передбачаються спеціальні гільзи (кишені), які повинні бути заповнені маслом. Для потужних трансформаторів, у яких через велику висоту спостереження за звичайним термометром утруднено, застосовуються термометри зі зниженим показником манометричного типу. При нагріванні рідина, що заповнює вимірювальну колбочку такого термометра, розширюється й через сполучну капілярну трубку й систему важелів пересуває стрілку показника.

Термометри забезпечуються контактами для сигналізації підвищення температури понад задані межі.

У деяких випадках виникає необхідність виміру температури якої-небудь деталі встаткування, де стаціонарний термометр не передбачений. У цьому випадку необхідно забезпечити гарну тепловіддачу від крапки виміру до колби термометра, що може бути досягнуте за допомогою фольги й щільного притиснення термометра. Для зниження втрати тепла доцільно закрити укріплений термометр тепло ізолюючим матеріалом, наприклад ватою. Як стаціонарні, так і переносні термометри варто періодично перевіряти.

Виміру за допомогою термопар дозволяють визначити перевищення температури (безпосередньо) і температуру (побічно). Принципова схема вимірювального пристрою зображена на рисунку 3.2, *а*. Вона дана для найбільш уживаних термопар з константану й міді. «Гарячий» спай щільно притискається до місця, перевищення температури якого потрібно виміряти, а «холодний» спай міститься в охолодному середовищі, температура якого відома. Пристрій градується, установлюється залежність між перевищенням температури гарячого спаю θ і E_T термопари, вимірюваної гальванометром. Вид градуйованої кривої даний на рисунку 3.2, *б*.

Для визначення температури точки потрібно знати температуру холодного спаю, тобто температуру середовища, що можна довідатися по термометрі. Тоді температуру крапки можна визначити по формулі $\vartheta = \vartheta_0 + \theta$, де ϑ_0 — температура середовища і холодного спаю θ - обмірюване термопарою перевищення. Якщо температура середовища підтримується постійної, то гальванометр може бути градуйований на температуру. Один вимірювальний пристрій може застосовуватися для декількох термопар, для чого в схему вводиться перемикач.

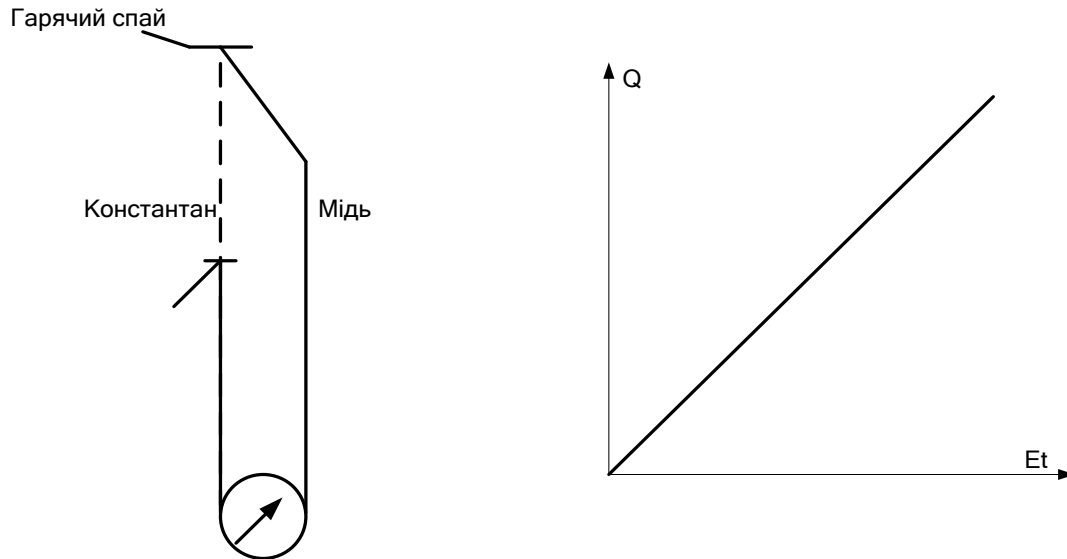


Рисунок 3.2 Схема з'єднань при вимірі температури термопарою (а) і градуйована характеристика (б).

Залежність е.р.с. мідь - константанової термопарі від різниці температур має майже прямолінійний характер — при різниці температур між її кінцями в $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ е.р.с. дорівнює $2,08\text{ мВ}$, а при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $4,36\text{ мВ}$. Опір сполучних провідників впливає на результати вимірів; відповідне виправлення може бути визначена зі співвідношення $\theta = UC \cdot (R_{\Gamma} + R_{\Pi}) / R_{\Gamma}$, де C — постійна гальванометра, град/мВ; R_{Γ} — опір гальванометра, Ом; R_{Π} — опір проводів, Ом; U — показання гальванометра, мВ.

3.2 Перевантаження електроустаткування, припустимі за критерієм граничної температури

Під перевантаженням устаткування розуміється робота його при навантаженнях, що перевищують номінальну потужність. Робота устаткування в умовах перевантаження може знадобитися як в аварійних, так і в нормальних режимах електроустановки або енергосистеми. В аварійних

умовах вона може бути необхідна при заміні іншого ушкодженого встаткування. У нормальних умовах вона потрібна в тих випадках, коли навантаження перевищило проектні припущення.

І втім, і в іншому випадку відмова від перевантаження устаткування спричинив би за собою обмеження навантаження споживача й не до відпуску електроенергії. Це означає, що споживач не до використовував би продуктивність встановленого в нього обладнання, знизив випуск корисної продукції, що викликало б істотний матеріальний збиток. Слід зазначити, робота самої електроустановки, як правило, в умовах перевантаження економічно вигідна — при цьому знижується питома собівартість передачі й розподілу енергії, . Це положення ставиться до електроустановок, що вже перебуває в експлуатації, і справедливо до певних значень перевантаження, після яких стає економічно доцільною заміна обладнання на потужніше або виникає загроза швидкого зношування ізоляції обладнання і його ушкоджень.

Як правило, припустимі перевантаження обладнання за першим критерієм у нормальних умовах виходять менше, ніж по другому, коли підвищений зношування при перевантаженнях може компенсуватися зниженням зношування при малих навантаженнях. Тому що тривалості підвищених і знижених навантажень вимірюються годинниками, то перевантаження за критерієм зношування доцільні для такого встаткування, у якого при зміні навантаження температура обмотки змінюється відносно повільно. Це має місце в трансформаторах з великою тепловою інерцією, тобто великого постійної часу нагрівання.

Перевантаження за критерієм граничної температури можуть бути тривалими й короткочасними. Тривалі перевантаження припустимі в тих випадках, коли умови охолодження відмінні від номінальних або коли характер або стан устаткування дозволяє відхилитися від нормованих гранично припустимих температур на тривалий час. Короткочасні перевантаження застосовуються в аварійних умовах, при переході від

зниженої в порівнянні з номінального навантаження до перевантажувального режиму.

Тривалі перевантаження голих провідників і встаткування розподільних пристроїв. Збірні й сполучні шини в розподільних пристроях виконуються, як правило, з голих провідників. Граничні навантаження голих шин різного перетину визначаються по таблицях, наявним у ПУЕ і в довідниках.

Таблиці складені для граничних температур поверхні провідника

$\vartheta_{ном} = 70^{\circ}\text{C}$, і для температури навколишнього середовища $\vartheta_{о.ном} = 25^{\circ}\text{C}$.

Виходячи з цього номінальне перевищення температури $\theta_{ном} = 45^{\circ}\text{C}$.

При зменшенні температури навколишнього середовища нижче номінальної можна підвищити навантаження шин, не виходячи при цьому за гранично припустиму температуру поверхні шини. Значення струму навантаження в цих умовах можна знайти, використовуючи вираз (3.5).

На основі цього виразу, з огляду на те що $P = I_{ном}^2 \cdot R$; $\theta_{ном} = \vartheta_{ном} - \vartheta_{о.ном}$ одержуємо:

$$\vartheta_{ном} = \frac{I_{ном}^2 \cdot R}{K} - \vartheta_{о.ном} \quad (3.9)$$

Якщо замінити в (3.9) $\vartheta_{о.ном}$ іншою температурою $\vartheta_{о.п.}$, а струм навантаження $I_{ном}$ іншим струмом $I_{п.}$, при якому $\vartheta_{ном}$ залишається незмінним, то після спільного рішення отриманого виразу й виразу (3.9) припустимий струм у режимі перевантаження, A , визначиться як

$$I_{п.} = I_{ном} \sqrt{\frac{\vartheta_{ном} - \vartheta_{о.п.}}{\theta_{ном}}} \quad (3.10)$$

Струм у режимі перевантаження $I_{п.}$ може бути допущений на увесь час, поки температура навколишнього середовища дорівнює або нижче $\vartheta_{о.п.}$.

Перевантаження шин може бути допущена в деяких випадках не тільки за рахунок зниження температури навколишнього середовища нижче

номінальної, але й за рахунок підвищення температури поверхні шини вище номінальної. Гранично припустима температура в основному визначається з умов надійної роботи болтових з'єднань. При температурі, що перевищує 70 °С, спостерігалися випадки прогресуючого окислювання контактних поверхонь з'єднань і їхнє нагрівання. Але в з'єднаннях, виконаних зварюванням, подібні явища не виникають. Тому якщо буде потреба може бути допущена температура, що перевищує 70° С. Наприклад, у період Великої Вітчизняної війни допускалося підвищення температури до 90° С. Слід зазначити, що при підвищенні навантаження збільшуються втрати енергії, тому таке перевантаження може допускатися тимчасово.

Замінивши у виразі (3.10) $\vartheta_{ном}$ на ϑ_{Π} , одержимо значення припустимого струму навантаження в умовах, коли граничнодопустима температура, шини й температура навколишнього повітря відмінні від номінальних значень:

$$I_{\Pi} = I_{ном} \sqrt{\frac{\vartheta_{\Pi} - \vartheta_{о.п.}}{\theta_{\Pi}}} \quad (3.11)$$

Вирази (3.10) і (3.11) дозволяють визначити припустимий струм навантаження не тільки при зниженні температури навколишнього середовища нижче номінального значення, але й при її перевищенні.

Вирази (3.10) і (3.11) можна застосовувати й для визначення припустимого навантаження устаткування, що складається в основному із провідних деталей і порцелянової ізоляції: роз'єднувачів, віддільників, короткозамикачів, вимикачів, трансформаторів струму. У зимових умовах підвищене навантаження доводиться на період зі зниженою температурою повітря, улітку мають місце зворотні явища. В обох випадках визначення гранично припустимих навантажень устаткування залежно від температурних умов може виявитися корисним.

Короткочасні перевантаження за рахунок попереднього недовантаження використовуються, як правило, в аварійних умовах. Визначення їх

Для частки випадку, коли за температуру, що допускається гранично, у режимі перевантаження прийнята температура номінального режиму, виразу (1.12) доцільно додати інший вид. Для цього використовується вираз (3.5) з обліком того, що $P = I^2 R$ а $I_1 / I_{\text{ном}}$ і $I_2 / I_{\text{ном}}$ позначені через k_1 і k_2 . Припустима тривалість, з, для цього випадку має вигляд:

$$t_{\Pi}' = T \ln \frac{k_2^2 - k_1^2}{k_2^2 - 1}. \quad (3.13)$$

Отриманий вираз містить постійну нагрівання T . Для провідників шин і апаратів значення T , с, можна підрахувати, виходячи з (3.6) і з огляду на, що $P = I_{\text{ном}}^2 R = I_{\text{ном}}^2 \rho l / s$, а $C = G_c = ls \gamma c$:

$$T = c \gamma \theta_{\text{ном}} / \rho i_s^2 \quad (3.14)$$

де c — питома теплоємність, Дж/(°C · кг); γ — щільність, кг/см³; ρ — питомий опір, Ом · мм²/м (для міді $\rho / p = 240$, а для алюмінію — 80); (i_s — щільність струму в провідниках, визначається по таблиці припустимих навантажень, де вказуються θ і θ_{0x}).

При перетинах шин 75—1000 мм² постійна часу нагрівання виходить при алюмінієвих шинах 6—14хв відповідно, а t_{Π}' за виразом (3.13) визначаються множенням T на коефіцієнт, близький до одиниці. Наприклад, при $k_2 = 1,5$ і $k_1 = 0$ значення цього коефіцієнта дорівнює 0,6. Таким чином, для збірних і сполучних шин і для апаратури можливості короточасних перевантажень дуже обмежені й такі перевантаження практично не використовуються.

3.3 Перевантаження трансформаторів по граничній температурі

За критерієм гранично припустимої температури для трансформаторів допускаються два види перевантаження: тривала, за рахунок зниження

температури охолодного середовища проти номінальної, і короткочасна - аварійна. Остання використовується в тих випадках, коли відключиться один з паралельно працюючих трансформаторів і залишилися в роботі приймуть на себе підвищене навантаження.

Величина й тривалість перевантаження можуть бути визначені по описаному вище методу. Однак залежність між температурою найбільш нагрітої крапки й навантаженням і характер зміни цієї температури в часі визначається більш складно через складну конструкцію трансформатора. Тепло, виділюване струмами навантаження в обмотці трансформатора, передається спочатку маслу, а від масла охолодним поверхням бака й охолоджувачів струмів. Масло безупинно циркулює в трансформаторі, піднімаючись знизу нагору через і уздовж обмоток і сердечника, поступово нагріваючись. Відповідно підвищуються й температури м і, і, обмотки, як це показано на рисунку 3.5. Цей малюнок і є спрощеною картиною розподілу температур — криві другого порядку замінені прямими лініями. Аналіз результатів розрахунків показав, що це спрощення полегшує розрахунки, не вносячи в них істотної погрішності. На рисунку 3.4 представлені діаграми розподілу температур для двох типів трансформаторів — виконаних відповідно ГОСТ 401-41 (б)

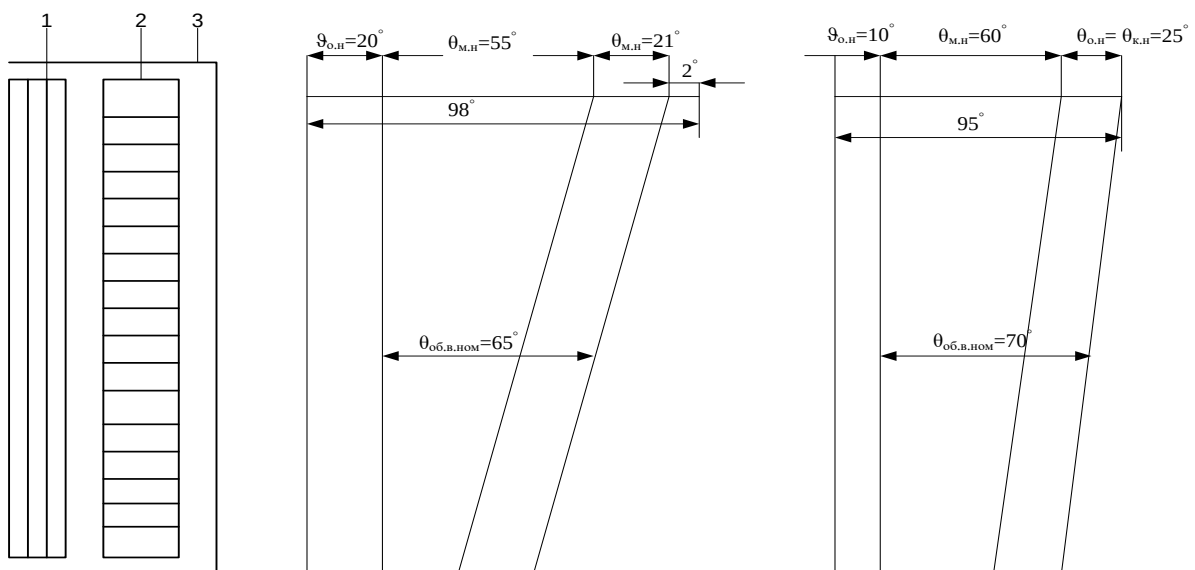


Рисунок 3.4 Розподіл перевищень температур по висоті обмотки трансформаторів, виконаних за ГОСТ 11677-65 (а) і за ГОСТ 401-41 (б).

1 — осердя; 2 — обмотка; 3 — стінка бака.

ГОСТ 11677-65 (а). Варто врахувати, що потужність трансформаторів, виконаних за ГОСТ 401-41 і, що перебувають у справжній час в експлуатації, перевищує 500 млн. кв-А.

Температури й перевищення температур, зазначені на рисунку 3-4, ставляться до номінального навантаження. Температуру найбільш нагрітої крапки в цьому режимі можна представити в такий спосіб:

$$\vartheta_{\text{н.т.ном}} = \vartheta_{\text{о.ном}} + \theta_{\text{м.ном}} + \theta_{\text{об.ном}} + \theta_{\text{к.ном}}, \quad (3.15)$$

тут $\vartheta_{\text{о.ном}}$ — температура охолодного повітря; $\theta_{\text{м.ном}}$ - перевищення температури верхніх шарів масла над температурою повітря; $\theta_{\text{об.ном}}$ — перевищення температури обмотки над температурою масла; $\theta_{\text{к.ном}}$ — перевищення найбільш нагрітої крапки верхньої котушки над середньою температурою цієї котушки.

Для трансформаторів, виконаних за ГОСТ 11677-65, температура найбільш нагрітої крапки при номінальному режимі $\vartheta_{\text{н.т.ном}} = 20 + 55 + 21 + 2 = 98^\circ \text{C}$. Для трансформаторів по ГОСТ 401-41 $\vartheta_{\text{н.т.ном}} = 10 + 60 + 25 = 95^\circ \text{C}$.

При написанні останнього вираження допущена деяка умовність - вони справедливі тільки для середньої смуги нашої країни. Номінальна температура охолоджуючого повітря за

ГОСТ 401-41 визначена «як природно змінна», тобто за номінальну температуру прийнята середньорічна температура того місця, де встановлений трансформатор. Для середньої смуги СРСР ця температура близька до 10°C .

У ГОСТ 11677-65 нормована температура охолодного середовища 20°C , що відповідає середньорічній температурі на крайньому півдні нашої

країни. Така ж температура прийнята в стандартах майже всіх країн і в рекомендаціях Міжнародної електротехнічної комісії (МЭК).

У ГОСТ 11677-65 у порівнянні з ГОСТ 401-41 знижені на 5° С номінальна температура масла, перевищення температури масла над повітрям і середнє перевищення температури обмотки над повітрям (позначено як $\theta_{об.в.ном}$ на рисунку 3.4). Зниження температури масла значно збільшило строк його служби.

Вираз (3.15) написано для номінального режиму. Для навантажень, відмінних від номінальної, перевищення температур обмотки й масла в сталих режимах визначаються по виразах

$$\theta_{об.к.у} + \theta_{к.к.у} = (\theta_{об.ном} + \theta_{к.ном})k^{2m} \quad (3.15a)$$

$$\theta_{м.к.у} = \theta_{м.ном} \left(\frac{1+bk^2}{1-b} \right)^m \quad (3.16)$$

де k — відносне навантаження трансформаторів, $k=I/I_{ном} = S/S_{ном}$; b — відношення втрат в обмотці до втрат у сердечнику $P_{к.з}/P_{х.х}$; m — показник, що залежить від системи охолодження трансформатора; $m = 0,8$ для природного охолодження М, $m = 0,9$ для дуттєвого охолодження Д; $m = 1,0$ для охолодження зі штучною циркуляцією масла ДЦ і Ц.

При зміні навантаження трансформатора від сталого режиму з відносним навантаженням k_1 до сталого режиму k_2 , кожне з перевищень температур (3-15a) і (1.16) буде змінюватися згідно (3.8) зі своєї постійної часу нагрівання.

Постійна часу нагрівання обмотки трансформатора невелика: 5—10 хв. У розрахунках можна прийняти, що при зміні навантаження перевищення температури обмотки над маслом $\theta_{об}$ відразу приймає стале значення, що відповідає новому режиму.

Постійна часу нагрівання для масла істотно більше; зразкові значення цього показника дані вище. Більш точно постійна часу нагрівання, може бути вирахована по виразу

$$T = \frac{(G_m c_m + G_c c_c + G_b c_b) \theta_{m.ном}}{(P_{к.з} + P_{х.х}) 3600} \quad (3.17)$$

де G_m ; G_c ; G_b — маса масла, сердечника, бака, кг; див; c_m c_c ; c_b — питомі теплоємності,

Дж/(°C * кг); $\theta_{m.ном}$ — перевищення температури масла в номінальних умовах, °C; $P_{к.з}$. $P_{х.х}$ — втрати к. з. і х.х. при номінальному навантаженні, кВт.

Виразення в дужках у чисельнику, розділене на 3 600, являє собою теплоємність трансформаторів, кВт-год/°C. Частка від ділення $(P_{к.з} + P_{х.х}) / \theta_{m.ном}$ є згідно (3.5) тепловіддачею трансформатора. Таким чином, (3.17) відповідає (3.7). При підстановці в (3-17) кількісних значень питомих теплоємностей получимо:

$$T = \frac{\theta_{m.ном} (0,545G_m + 0,133G_c + 0,108G_b)}{P_{к.з} + P_{х.х}} \quad (3.17a)$$

У цьому виразі маса елементів трансформатора підставляється в тоннах, а втрати - у кіловатах.

У ГОСТ 14209-69 при визначенні припустимих перевантажень трансформаторів рекомендується приймати постійну часу нагрівання залежно від потужності трансформатора й системи її охолодження згідно з даними табл. 3.1.

Наведені тут відомості й дані достатні для побудови графіка змін температури найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора при переході від одного сталого навантаження до іншої, як це виконано для приклада для найбільш простого двоступінчастого графіка навантаження. Цих же відомостей досить для визначення граничних припустимих перевантажень за критерієм температури.

Таблиця 3.1 Постійна часу нагрівання трансформаторів залежно від потужності й системи охолодження

Потужність трансформатора, МВА	Тип охолодження	Постійна нагрівання, год
0,005—1,0	М	2,5
1—6,3	М	3,5
6,3—32	Д	2,5
40—63	Д	3,5
100—125	ДЦ (Ц)	2,5
125 і вище	ДЦ(Ц)	3,5

Для визначення тривалих перевантажень при температурі охолодного середовища, відмінної від номінальних, використовуються залежності (3.16) і (3.17). По цих вираженнях будується графік залежностей перевищення температури найбільш нагрітої крапки обмотки над повітрям від відносного навантаження k . Задаючись температурою навколишнього середовища, по цьому графіку можна знайти навантаження, при якій сума температури навколишнього середовища й перевищення температури найбільш нагрітої точки над повітрям.

дорівнює температурі найбільш нагрітої точки в номінальному режимі.

Нижче наведені гранично припустимі навантаження для трансформаторів, виконаних по раніше діючому який і діє ГОСТ. Природно, вони вийшли різними. При зазначених у таблиці навантаженнях і температурах навколишнього середовища температура найбільш нагрітої

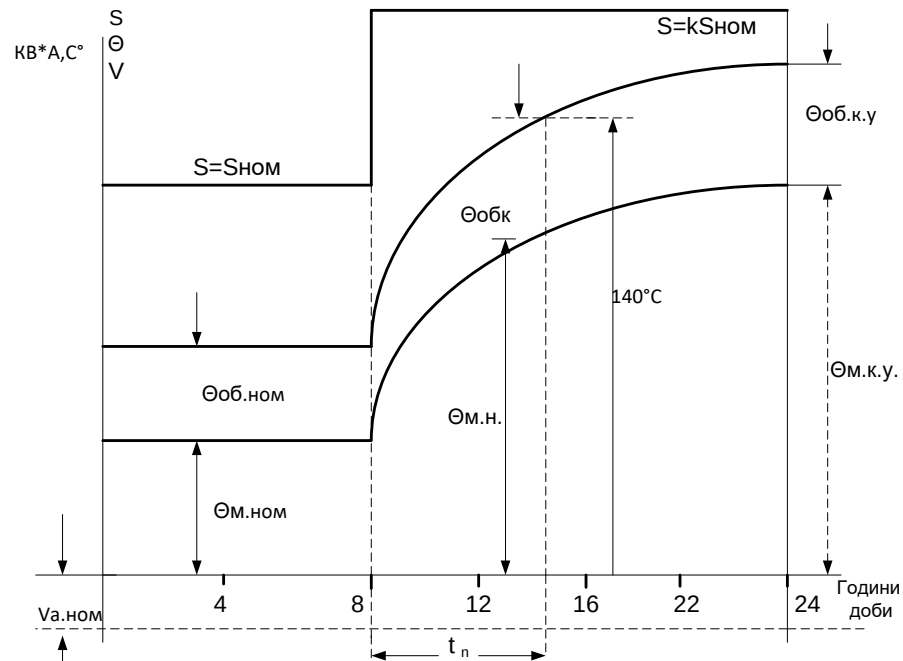


Рисунок 3.5 Визначення допустимого терміну короточасного аварійного перевантаження трансформатора.

Точки обмотки не перевищить тої, яка була б при номінальному навантаженні трансформатора й номінальній температурі охолоджуваного середовища. Отже, навантаження, певні нижче, можуть триматися скільки завгодно довго.

Таблиця 3.2 Відносні перевантаження

Температури Умова	Температура охолоджуючого середовища, $^\circ C$					
	-100	+10	+20	+30	+40	+60
Довгостроково відносно навантаження, що допускається, трансформаторів:						
За ГОСТ 11677-66	1,22	1,15	1,08	1,00	0,91	0,83
За ГОСТ 401-41	1,15	1,08	1	0,91	0,83	-

Короточасні перевантаження за критерієм температури є, як було сказано на початку параграфа, аварійними, тобто дуже рідкими. Вони

визначаються з наступних умов: перед перевантаженням трансформатор знаходився в номінальному режимі роботи (номінальне навантаження й номінальна температура навколишнього середовища); перевантаження знімається, коли температура найбільш нагрітої точки досягне 140° С.

Температура в 140° С значно перевищує номінальну, але короткочасно вона може бути допущена. Перевищення цієї температури небажано через її близькість до температури запалення пар масла. Крім того, знижується електрична міцність масляних проміжків, тому що з масла може початися виділення дрібних пухирців повітря, розчиненого в маслі при більш низьких температурах.(3.18)

Тривалість заданого навантаження, що допускається, с, може бути визначена за виразом, одержуваному аналогічно (3.12):

$$t_{\Pi} = T \ln \frac{\theta_{\text{м.к.у}} - \theta_{\text{м.ном}}}{\theta_{\text{м.к.у}} + \theta_{\text{об.к.у}} - (140 - 20)} \quad (3.18)$$

У табл. 3.3 наведені аварійні перевантаження для трансформаторів, виконаних за ГОСТ 11677-65 і ГОСТ 401-41. Ці перевантаження дані для трансформаторів всіх потужностей і систем охолодження. Це означає

Таблиця 3.3 Припустимі аварійні перевантаження

Навантаження, частки номінальної	Припустима тривалість, хв		
	за ГОСТ 11677-65	за ГОСТ 401-41 для установки	
		відкритої	закритої
1,3	120	120	60
1,45	80	-	-
1,6	45	30	15
1,75	20	15	8
2,0	10	1,5	4
3,0	1,5	1,5	1

що розраховані, як зазначено вище, перевантаження були усереднені й округлені. Правила технічної експлуатації рекомендують для короткочасних аварійних перевантажень для всіх трансформаторів користуватися вказівками ГОСТ11677-65, у тому числі й для трансформаторів, виконаних відповідно до ГОСТ 401-41.

4 АНАЛІЗ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ В СИЛОВОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ

Стандартом ДСТУ 14209-85 встановлені наступні температури і перевищення температури частин трансформатора за номінальних умов.

Перевищення температури масла у верхніх шарах над температурою середовища θ_M , що охолоджує:

для трансформаторів з системами охолодження М і Д 55°C

для трансформаторів з системами охолодження Ц і ДЦ 40°C

Перевищення температури обмотки в найбільш нагрітій крапці над температурою масла $\theta_{\text{ННТМ}}$:

для трансформаторів з системами охолодження М і Д 23°C

для трансформаторів з системами охолодження Ц і ДЦ 38°C

Номінальна температура середовища, що охолоджує (повітря, вода)

$\theta_{\text{охл}} = +20^\circ\text{C}$.

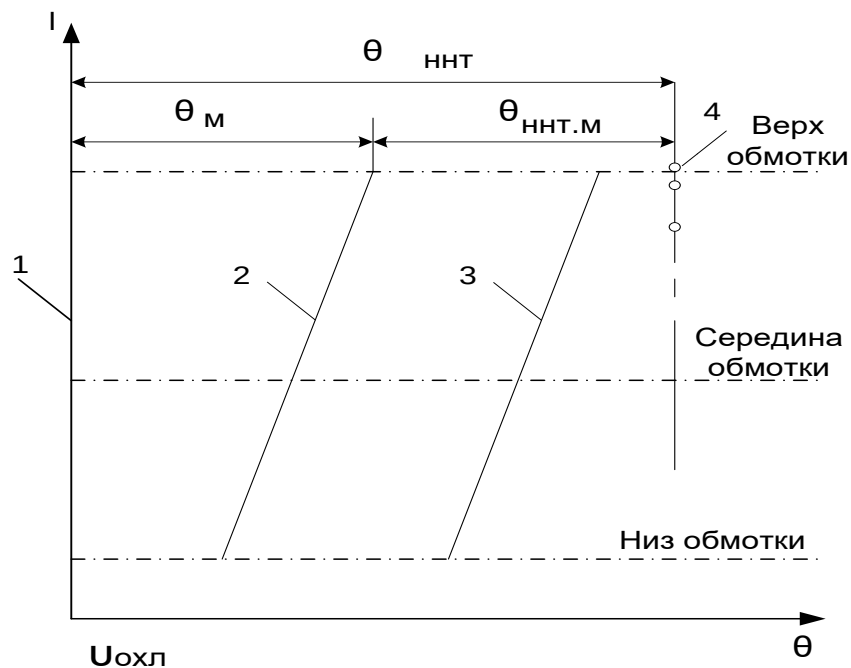


Рисунок 4.1 Спрощена схема розподілу перевищень температури масла і обмоток по висоті трансформатора: l - лінійний розмір по висоті; 1 -

середовище, що охолоджує; 2 - перевищення температури масла; 3 - перевищення середньої температури обмотки; 4 - найбільш нагріта точка обмотки.

Базисна умовна температура обмотки в найбільш нагрітій крапці, при якій знос ізоляції класу А дорівнює одиниці, що відповідає терміну служби трансформатора, $\vartheta_{\text{ннт.б}} = 98^\circ\text{C}$.

На рисунку 4.1 показана спрощена схема розподілу перевищення температури масла і обмоток по висоті трансформатора. Тут θ_M - перевищення температури масла у верхніх шарах над температурою середовища, що охолоджує; $\theta_{\text{ннтм}}$ - перевищення температури обмотки в найбільш нагрітій крапці над температурою масла. Найбільш нагріта точка обмотки може бути розташована на різних відстанях від верхнього краю обмотки.

Температура обмотки в найбільш нагрітій крапці:

$$\vartheta_{\text{ннт}} = \vartheta_{\text{охл}} + \theta_M + \theta_{\text{ннтм}}. \quad (4.1)$$

Перевищення температури масла і обмотки в сталому стані.

Перевищення температури масла в сталому стані при відносному навантаженні $K = S/S_{\text{ном}}$ може бути визначене з вираження

$$\theta_i = \theta_{i, \text{ннт}} \left(\frac{1 + dK^2}{1 + d} \right)^x, \quad (4.2)$$

де $d = P_{K, \text{ном}}/P_{X, \text{ном}}$ - відношення втрат короткого замикання до втрат холостого ходу при номінальному навантаженні.

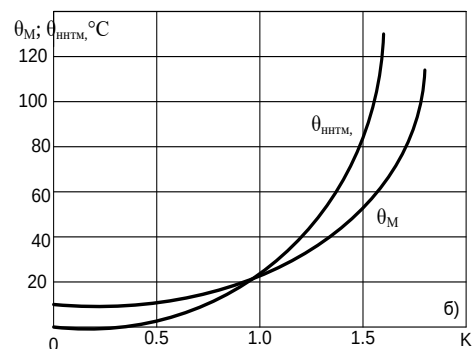
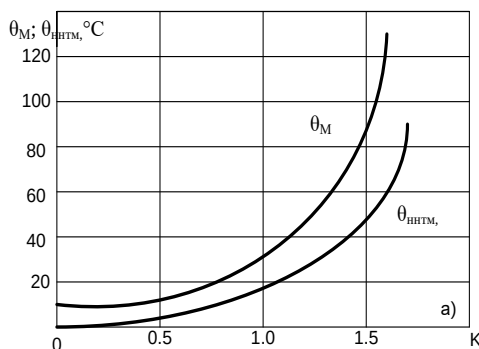


Рисунок 4.2 Залежність перевищень температури масла над температурою середовища, що охолоджує, а також перевищень температури обмотки в найбільш

нагрітій крапці над температурою масла в сталому стані :

a - трансформатори з системою охолодження М або Д; *б* - трансформатори з системою охолодження Ц або ДЦ.

Перевищення температури обмотки в найбільш нагрітій крапці над температурою масла у верхніх шарах при відносному навантаженні *K* в сталому стані може бути визначено з вираження

$$\theta_{\text{ннт.м}} = (\vartheta_{\text{ннт.б}} - \vartheta_{\text{ном}}) K^y = \theta_{\text{ннт.м. ном}} K^y \quad (4.3)$$

де $\theta_{\text{ннт.м. ном}}$ - перевищення температури обмотки в найбільш нагрітій крапці над температурою масла при номінальному навантаженні.

Значення показників *x* і *y* в виразах (4.2) і (4.3) залежать від системи охолодження, а саме:

Система охолодження.....	М і Д	Ц і ДЦ
<i>x</i>	0,9	1,0
<i>y</i>	1,6	1,8

Залежності перевищень температури $\theta_{\text{м}}$ і $\theta_{\text{ннт.м}}$ в сталому стані від навантаження *K* при *d* = 5 приведені на рисунку 4.2. Ці криві використовуються нижчим при обчисленні перевищень температури в перехідних режимах.

Перевищення температури масла і обмотки в перехідному режимі. Добовий графік навантаження трансформатора може бути представлений ступінчастим, з навантаженнями $K_1, K_2, \dots, K_n$ і тривалістю рівнів $\Delta t_1 = t_1,$

$\Delta t_2 = t_2 - t_1, \dots, \Delta t_n = t_n - t_{n-1}$ (рисунок 4.2). Відповідно повинна змінюватися температура масла і обмотки. Аби визначити графік перевищення температури масла над температурою середовища, що охолоджує, необхідно задатися початковим значенням θ_0 для першого рівня і визначити кінцеві

значення $\theta_1 \theta_2 \dots, \theta'_n$ для кожного рівня, починаючи від першої до останньої з наступних виразів:

$$\begin{aligned}\theta'_1 &= \theta_0 + (\theta_{y1} - \theta_0) (1 - e^{-\Delta t_1/\tau}); \\ \theta'_2 &= \theta'_1 + (\theta_{y2} - \theta'_1) (1 - e^{-\Delta t_2/\tau}); \\ \theta'_n &= \theta'_{n-1} + (\theta_{yn} - \theta'_{n-1}) (1 - e^{-\Delta t_n/\tau});\end{aligned}\quad (4.4)$$

де $\theta_{y1}, \theta_{y2}, \theta_{yn}$ - перевищення температури масла над температурою середовища, що охолоджує, в сталому стані при навантаженнях $K_1 K_2, \dots, K_n$.

Ці значення можуть бути визначені по відповідних кривих на рисунку 4.2;

τ - теплова постійна часу трансформатора. Вона має бути прийнята по вказівці заводу виробника. За відсутності цих даних слід прийняти: $\tau = 3$ г для трансформаторів з системою охолодження М або Д і $\tau = 2$ г для трансформаторів з системою охолодження Ц або ДЦ.

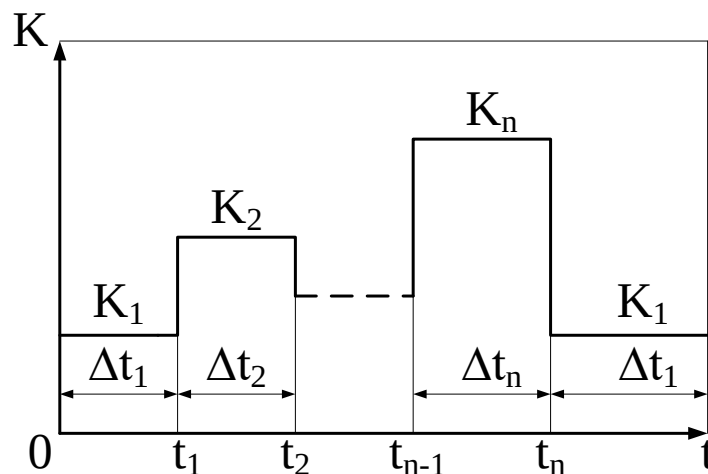


Рисунок 4.3 Зразковий добовий графік навантаження.

Перевищення температури масла на останньому рівні θ'_n , повинно дорівнювати початковому значенню θ_0 . Проте, як правило, це не має місця (початкове перевищення θ_0 зазвичай вибрано невірно). Тому необхідно задатися новим значенням θ_0 і повторити розрахунок. Такі обчислення мають бути продовжені до тих пір, поки θ'_n , не дорівнюватиме θ_0 .

Дане завдання за визначенням перевищень температури масла для кожного рівня добового графіка може бути вирішене простішим, особливо для трансформаторів з системами охолодження Ц і ДЦ, в яких перевищення

температури масла є лінійною функцією потужності втрат, тобто у формулі (4.2) показник міри $x = 1$.

Початкове перевищення температури масла при $t = 0$ може бути визначено з вираження

$$\theta_0 = \frac{1}{A_n - 1} \sum_{i=1}^n \theta_{yi} (A_i - A_{i-1}), \quad (4.5)$$

де $A_i = e^{t_i/\tau}$; i – номер рівня; n – число рівнів; t_i – час від початку відліку.

Перевищення температури масла θ'_i в кінці рівня з навантаженням K_i може бути визначене з вираження.

$$\theta'_i = \frac{1}{A_i} \left[\theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_{yi} (A_i - A_{i-1}) \right] \quad (4.6)$$

За початок відліку можна прийняти будь-яку крапку. Після того, як визначені перевищення температури масла в кінці кожного рівня, можна визначити проміжні значення в будь-якій точці графіка з вираження.

$$\theta_t = \theta_0 + (\theta_y - \theta_0)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.7)$$

Перевищення температури обмотки в найбільш нагрітій точці над температурою масла для кожного рівня добового графіка може бути визначене по відповідних кривих на рисунок 1.4. Теплова постійна часу обмотки мала, оскільки обмотка добре охолоджується і теплоємність її мала. Тому можна прийняти, що при зміні навантаження перевищення температури обмотки над температурою масла відразу набуває сталого значення. Таким чином, перевищення температури обмотки над температурою середовища $\theta_{\text{ннт}}$, що охолоджує, може бути визначене підсумовуванням ординат кривих θ_m і $\theta_{\text{ннт.м}}$. Порядок розрахунку показаний нижче.

Розглянемо приклад розрахунку. Визначити перевищення температури масла і перевищення температури обмотки над температурою масла для трансформатора з системою охолодження Ц (або ДЦ), що працює по чотириступінчастому добовому графіку навантаження, що повторюється. Вихідні дані прийняті згідно ДСТУ 14209 - 85: $\tau = 2$ г; $d = 5$; $\theta_{\text{м.ном}} = 40^\circ\text{C}$; x

$= 1,0$; $y = 1,8$. Початок відліку часу прийнятий при $t = 22$ г, у момент спаду максимального навантаження.

Визначимо початкове перевищення температури масла, а також кінцеві значення для кожного рівня по виразах (4.5) і (4.6):

$$\theta_0 = \frac{118236520}{1648000 - 1} = 72^\circ\text{C};$$

$$\theta_1 = \frac{72 + 1020}{54.6} = 20^\circ\text{C};$$

Таблиця 4.1 Визначення перевищень температури масла і обмотки трансформатора.

Рівень i	$t_i, \text{ч}$	$A_i = e^{t/\tau}$	$A_i - A_{i-1}$	K_i	$\theta_{y1},$ $^\circ\text{C}$	$\theta_{y1}(A_i - A_{i-1}),$ $^\circ\text{C}$	$\Sigma \theta_{y1}(A_i - A_{i-1})$ $^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{ННТ.М}},$ $^\circ\text{C}$
1	4	54,6	54,6	0,6	19	1020	1020	23
2	6	403,4	348,8	1,2	57	19900	20920	80
3	9	8103,1	7700	0,8	28	215600	236520	37
4	12	1648000	1640300	1,4	72	118000000	118236520	107

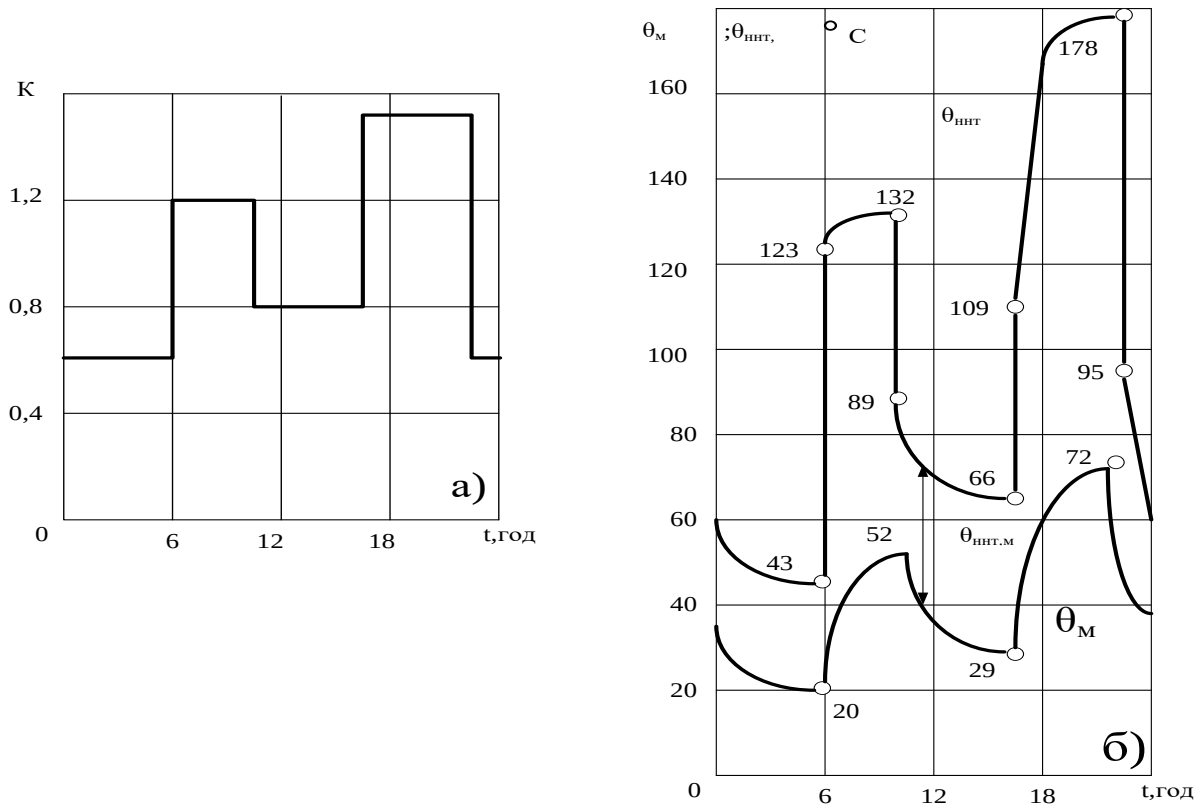


Рисунок 4.4 а - добовий графік навантаження; б - графіки перевищень температури масла і обмотки над температурою середовища, що охолоджує

$$\theta'_2 = \frac{72 + 20920}{403.4} = 52^\circ\text{C};$$

$$\theta'_3 = \frac{72 + 236520}{8103} = 29.2^\circ\text{C};$$

$$\theta'_4 = \frac{118236520}{1648000} = 72^\circ\text{C} = \theta_0.$$

Графік перевищень температури масла показаний на рисунку 4.4, б. Як видно з рисунку, перевищення температури поступово збільшується і досягає максимального значення 72°C в кінці четвертого рівня в 22 г.

Перевищення температури обмотки над температурою масла можуть бути визначені по відповідній кривій на рисунку 1.16, б. Вони вказані в останньому стовпці таблиці 4.1. Підсумовуючи ординати кривих θ_m і $\theta_{нтт,м}$, отримаємо графік перевищення температури обмотки над температурою середовища $\theta_{нтт}$, що охолоджує.

Хоча вирази (4.5) і (4.6) отримані для трансформаторів з системами охолодження Ц і ДЦ, в яких перевищення температури масла є лінійною функцією потужності втрат ($x = 1$), вони можуть бути використані як наближені вирази для визначення перевищення температури масла в трансформаторах з системами охолодження М і Д ($x = 0,9$). Точніші вирази для цих трансформаторів приведені нижче:

$$\theta_0 = \frac{1}{A_n - 1} \sum_{i=1}^n \theta_{yi} (A_i - A_{i-1}); \quad (4.8)$$

$$\theta'_i = \frac{1}{A_i} \left[\theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_{yi} (A_i - A_{i-1}) \right], \quad (4.9)$$

де

$$A_i = \exp \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i}{\tau_i}.$$

Тут

$$\tau_i = \tau \frac{\frac{\theta_i}{D_i} - \frac{\theta_{i-1}}{D_{i-1}}}{\frac{\theta_{i\hat{i}\hat{i}}}{D_i} - \frac{\theta_{i\hat{i}\hat{i}}}{D_{i-1}}}; \quad (4.10)$$

τ_i - коректована теплова постійна часу для рівня i ; $\theta_i / \theta_{\text{ном}}$ - відносне перевищення температури масла в сталому стані для рівня i ; $\theta_{i-1} / \theta_{\text{ном}}$ - те ж, але для рівня $i - 1$; P_i / P_M - відносна потужність втрат для рівня i ; $P_{i-1} / P_{\text{ном}}$ - те ж, але для рівня $i - 1$; $D_i = \frac{1 + dK_i^2}{1 + d}$ - потужності втрат на рівні i ; $P_{\text{ном}} = 1$;

$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ - тривалість рівня i .

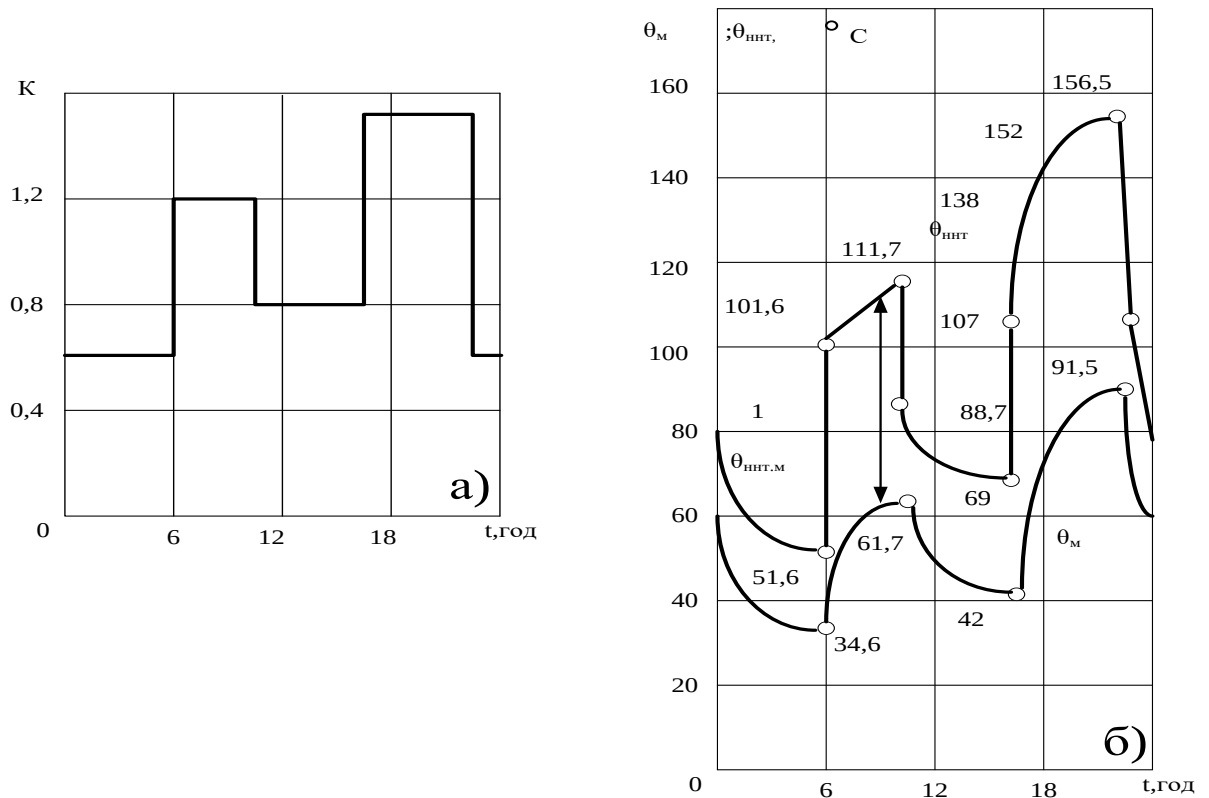


Рисунок 4.5 а - добовий графік навантаження; б - графіки перевищень температури масла і обмотки над температурою середовища, що охолоджує.

Визначити перевищення температури масла і перевищення температури обмотки над температурою масла для трансформатора з системою охолодження, що працює по чотириступінчастому добовому графіку, що повторюється (рисунок 4.5, а). Вихідні дані прийняті згідно ГОСТ 14209-85: $\tau = 3$ ч; $d = 5$; $x = 0,9$; $y = 1,6$. Початок відліку часу прийнятий при $t = 22$ г, у момент спаду максимального навантаження. Результати розрахунку зведені в таблиці 4.2.

Визначимо початкове перевищення температури масла, а також кінцеві значення для кожного рівня по виразах (4.8) і (4.9):

$$\theta_0 = \frac{2190260}{23026 - 1} = 91.5^\circ\text{C};$$

$$\theta_1' = \frac{91.5 + 600}{20} = 34.6^\circ\text{C};$$

$$\theta_2' = \frac{91.5 + 5460}{90} = 61.7^\circ\text{C};$$

$$\theta_3' = \frac{91.5 + 124200}{2981} = 42^\circ\text{C};$$

$$\theta_4' = \frac{91.5 + 2060000}{23026} = 91.5^\circ\text{C} = \theta_0.$$

Графік перевищення температури масла показаний на рисунку 4.5, б. Як видно з малюнка, максимальне перевищення температури масла складає $91,5^\circ\text{C}$. Перевищення температури обмотки над температурою масла можуть бути визначені по відповідній кривій на рисунку 4.2, а. Вони вказані в останньому стовпці таблиці 4.2, Підсумовуючи ординати кривих θ_m і $\theta_{\text{ннт.м}}$, отримаємо перевищення температури обмотки над температурою середовища $\theta_{\text{ннт}}$, що охолоджує.

Зіставляючи перевищення температури масла в трансформаторах з системами охолодження Ц, ДЦ (рисунок 1.16) і з системами охолодження, Д (рисунок 4.5), можна встановити, що перевищення температури масла в першому випадку помітно нижче, ніж в другому, що пояснюється значеннями нормованих перевищень температури масла 40°C і 60°C (див. положення кривих θ_m на рисунку 4.2).

Перевищення температури обмотки над температурою масла в трансформаторах з системами охолодження Ц і ДЦ вище, ніж в трансформаторах з системами охолодження М і Д, що пояснюється значеннями показника y , рівного 1,8 і 1,6 відповідно. В результаті перевищення температури обмотки $\theta_{\text{ннт}}$ над температурою середовища, що охолоджує, при однаковому навантаженні в трансформаторах з системами охолодження Ц і ДЦ вище, ніж в трансформаторах з системами М і Д, що особливо помітно в години списів.

Таблиця 4.2 Визначення перевищень температури масла і обмотки трансформатора.

Рі- вень i	$\Delta t_i, ^\circ\text{C}$	$\tau_i, \text{ч}$	$\sum \frac{\Delta t_i}{\tau_i}$	A_i	$A_i - A_{i-1}$	K_i	$\theta_{yi}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{yi}(A_i - A_{i-1}),$ $^\circ\text{C}$	$\sum_{i=1}^n \theta_{yi}(A_i - A_{i-1})$	$\theta_{\text{ннт.м}},$ $^\circ\text{C}$
1	8	2,65	3,02	20	20	0,6	30	600	600	17
2	4	2,66	4,52	90	70	1,2	78	5460	6060	50
3	6	1,74	7,97	2981	2891	0,8	43	124200	130260	27
4	6	2,1	10,73	23026	20045	1,4	103	2060000	2190260	65

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи розробляються заходи з охорони праці в процесі обслуговування електричної підстанції. Отже, на оперативно-ремонтний персонал, що здійснює експлуатацію обладнання підстанції, впливають такі шкідливі виробничі фактори [1, 2]: фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил); фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Роботи в діючих електроустановках слід проводити за нарядом, розпорядженням та в порядку поточної експлуатації. Роботи, які виконують в порядку поточної експлуатації працівники на закріплених за ними електроустановках, проводять без оформлення наряду або розпорядження. Перелік робіт, які виконують у порядку поточної експлуатації, затверджує керівництво підприємства. За нарядами слід виконувати всі роботи, які не ввійшли до переліку робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації та за розпорядженням.

Забороняється самовільне проведення робіт, а також розширення робочих місць та обсягу завдання, визначених нарядом або розпорядженням.

Виконання робіт в електроустановках в зоні дії іншого наряду слід узгоджувати з працівником, який видав попередній наряд. Узгодження оформлюється до підготовки робочого місця записом на полях наряду (біля таблиці 2) "Узгоджено" та за підписом працівника, який узгоджує.

Ремонт електроустановок із застосуванням вантажопідіймальних машин, механізмів або великогабаритних пристроїв, за винятком ямобурів і телескопічних пристроїв для піднімання людей, слід виконувати за технологічними картами або ППР.

В електроустановках до 1000 В електростанцій, підстанцій і на КЛ під час виконання роботи під напругою необхідно:

- відгородити розташовані поблизу робочого місця струмопровідні частини, що перебувають під напругою, до яких можливий випадковий дотик;
- працювати в діелектричних калошах, ботах або стоячи на ізолювальній підставці чи на гумовому діелектричному килимку;
- застосовувати інструмент з ізолювальними рукоятками (у викруток повинен бути ізольований стрижень). У разі відсутності такого інструменту слід користуватись діелектричними рукавичками.

Забороняється працювати в одязі з короткими або закоченими рукавами, користуватись ножівками, металевими метрами тощо.

В електроустановках понад 1000 В під час проведення робіт на струмопровідних частинах, що перебувають під напругою, за допомогою захисних ізолювальних засобів необхідно:

- користуватись тільки випробуваними сухими та чистими ізолювальними засобами з непошкодженим лаковим покриттям;
- тримати ізолювальні засоби за ручки-захвати не далі обмежувального кільця;

- розмістити ізолювальні засоби так, щоб не виникала небезпека перекриття між фазами або фази на землю.

Під час виконання роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги, електровимірювальні штанги та кліщі, покажчики напруги) допускається наближатись людині до струмопровідних частин на відстань, визначену довжиною їхньої ізолювальної частини.

Забороняється в електроустановках працювати в зігнутому положенні, якщо у разі випрямлення відстань до струмопровідних частин буде менша за зазначену в інструкціях з ОП. Забороняється в електроустановках електростанцій та підстанцій 6-110 кВ під час роботи біля неогороджених струмопровідних частин розміщуватись так, щоб вони були позаду або з обох боків.

На ПЛ, за винятком зовнішніх вводів 0,4 кВ до будівель, та ПЛЗ перед розриванням або з'єднанням електрично сполучених складників (проводів, тросів) необхідно встановлювати заземлення з обох боків розриву (передбачуваного розриву).

В темний період доби ділянки робіт, робочі місця, проїзди і підходи до них слід освітлювати. Забороняється працювати в неосвітлених місцях.

У випадку наближення грози слід припинити всі роботи на ПЛ, ПЛЗ; у ВРУ, ЗРУ на виводах та лінійних роз'єднувачах ПЛ; на КЛ, під'єднаних до ділянок ПЛ, а також на вводах ПЛЗ в приміщеннях вузлів зв'язку та на антенно-щоглових спорудах.

Всі працівники, які перебувають в діючих електроустановках (за винятком щитів керування, приміщень з релейними панелями та їм подібних), в колодязях, тунелях, траншеях, повинні користуватись захисними касками.

Працівникам підприємств, інших організацій, направлених у відрядження, одноособово можна записувати покази лічильників та інших вимірювальних приладів, встановлених на щитах керування і в РУ. У разі наявності місцевих оперативних працівників відряджені працівники повинні

мати групу II, а у разі відсутності місцевих оперативних працівників - групу III. Працівники, які обслуговують компресорні установки та повітрозбірники, електролізні установки, акумуляторні батареї та зарядні пристрої, повинні мати групу III.

Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.

1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:

- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;

- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмопровідні частини слід огороджувати;

- приєднати до "землі" переносні заземлення;

- перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмопровідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;

- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмопровідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;

- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмопровідні частини, що залишились під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. Залежно від місцевих умов струмопровідні частини огорожують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які повинні застосовуватись в електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірювальні кліщі, показчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (показчики напруги для фазування, показчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

Крім наведених вище засобів захисту в електроустановках повинні застосовуватись такі ЗІЗ: захисні каски – для захисту голови; захисні окуляри і щитки – для захисту очей і обличчя; протигази і респіратори – для захисту органів дихання; рукавиці – для захисту рук; запобіжні пояси та страхувальні канати.

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [3], а також іншими відповідними нормативними документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

За безпечність конструкції, правильність вибору матеріалів, якість виготовлення, а також за відповідність засобів захисту чинним в Україні

нормативним документам повинні нести відповідальність керівники підприємств, установ, організацій (незалежно від форми власності), що виготовляють ці засоби захисту, орган, який видав сертифікат на виробництво та на реалізацію захисних засобів, в тому числі і засобів захисту зарубіжного виробництва.

5.2. Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

Мікроклімат

Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт). Параметри мікроклімату в виробничому приміщенні, де встановлена лінія, наведено в таблиці 5.1.

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці технологічного персоналу передбачається:

- в холодну пору року використання калорифера;
- в літню пору застосування вентиляторів обдува;
- провітрювання приміщення.

Таблиця 5.1 – Нормування параметрів мікроклімату на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °C	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	Пб	15-29	70 при 25°C	0,2-0,5
Холодний	Пб	13-23	не більш 75	не більш 0,4

Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0.5	0.15	4
Вуглець (II) оксиду	20		4

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено:

- провітрювання приміщення;
- цілісність вікон для перешкоджання попадання пилу в приміщення під час роботи лінії;
- встановлення пиловловлюючих засобів.

Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт під час експлуатації електрообладнання – малої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «г».

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Х-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Х-ка фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Малої точності	Від 1,0 до 5 включно	V	г	середній великий великий	світлий світлий середній	-	200	3	1,8

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум. Загальні вимоги безпеки» (таблиця 5.4).

Таблиця 5.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Проектом передбачені засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі;
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

4.3. Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують ССБТ «Пожежна безпека. Загальні вимоги». Типові правила пожежної безпеки для промислових підприємств і інструкції на окремих об'єктах.

Приміщення підстанції за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами П-ІІІ (місця, де зберігаються тверді горючі речовини). Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується ІІІ ступенем вогнестійкості.

До ІІІ ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхів (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	2	REI 60	2	1

Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 3.7 (знаменник).

Таблиця 5.7

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств,

гаражами, а також до виробничих будинків, сільськогосподарських будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
III	8/9	8/12	10/15

Найбільшу відстань до евакуаційного виходу визначаємо за об'ємом приміщення та ступені вогнестійкості будівлі.

В приміщенні, відстань при щільності людського потоку в загальному проході, чол/м² наступна: до 1 – 100 м².

На території підстанції встановлено 12 вогнегасників ВП-5 [16].

ВИСНОВКИ

У складі енергосистем, на промислових підприємствах, а також у міських та сільських розподільчих мережах експлуатується значна кількість силових трансформаторів. Основним завданням, що стоїть перед експлуатаційним персоналом, є забезпечення надійної та довготривалої роботи цих пристроїв шляхом своєчасного виявлення відхилень у їхньому технічному стані та оперативного відновлення працездатності.

Сьогодні впроваджено сучасні методи та засоби діагностики трансформаторного обладнання, які у поєднанні з традиційними підходами дають змогу ефективно виявляти ранні ознаки відхилень і запобігати розвитку серйозних пошкоджень.

У цій бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто основні типи пошкоджень силових трансформаторів, проаналізовано методи діагностики їх технічного стану, а також висвітлено питання, пов'язані з проведенням профілактичних та інших видів випробувань трансформаторів, їхніх складових елементів і допоміжного обладнання. Окрема увага приділена процедурам оцінювання стану трансформатора з метою визначення доцільності проведення ремонту або можливості подальшої безпечної експлуатації.

Література

1. Melnikova O., Nazarychev A., Suslov K. Enhancement of the Technique for Calculation and Assessment of the Condition of Major Insulation of Power Transformers. *Energies*. 2022;15(4):1572. doi:10.3390/en15041572.[mdpi.com](https://doi.org/10.3390/en15041572)
2. Zahra S.T., Imdad S.K., Khan S., Khalid S., Baig N.A. Power Transformer Health Index and Life Span Assessment: A Comprehensive Review of Conventional and Machine Learning based Approaches. arXiv preprint. 2025. arXiv:2504.15310.[arxiv.org](https://arxiv.org/abs/2504.15310)
3. Tembo F., Bragone F., Laneryd T., Barreau M., Morozovska K. Data-Driven vs Traditional Approaches to Power Transformer's Top-Oil Temperature Estimation. arXiv preprint. 2025. arXiv:2501.16831.[arxiv.org+1arxiv.org+1](https://arxiv.org/abs/2501.16831)
4. Черкашина В.В., Баклицький В.М. Дослідження техніко-економічних показників силових трансформаторів з урахуванням умов експлуатації. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024;(1):32–36.visnyk.vntu.edu.ua
5. Berestovyy D.O. Діагностика ізоляції сухих силових трансформаторів: бакалаврська робота. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського; 2024.ela.kpi.ua
6. Majzoobi A., Mahoor M., Khodaei A. Machine Learning Applications in Estimating Transformer Loss of Life. arXiv preprint. 2017. arXiv:1703.01397.[arxiv.org](https://arxiv.org/abs/1703.01397)
7. Zhang Z., Li Y., Chen H., et al. Innovative Transformer Life Assessment Considering Moisture and Oil Circulation. *Energies*. 2024;17(2):429. doi:10.3390/en17020429.[mdpi.com+1arxiv.org+1](https://doi.org/10.3390/en17020429)
8. Mokhnache K., et al. A Review of Reliability Assessment and Lifetime Prediction Methods for Electrical Machine Insulation Under Thermal Aging. *Energies*. 2025;18(3):576. doi:10.3390/en18030576.[mdpi.com](https://doi.org/10.3390/en18030576)
9. Wani N.U.I., Ranga C., Manoj T., Gopi M. Dielectric Behavior of Power Transformers Installed in Kashmir Valley: Case Studies and Challenges. In: Proceedings of 4th International Conference on Machine Learning, Advances in

Computing, Renewable Energy and Communication (MARC 2021). Singapore: Springer; 2024. p. 343–350.link.springer.com

10. Ramirez I., Pino J., Pardo D., et al. Residual-based Attention Physics-informed Neural Networks for Spatio-Temporal Ageing Assessment of Transformers Operated in Renewable Power Plants. arXiv preprint. 2024. arXiv:2405.06443.arxiv.org

11. Zhorniak L.B., Afanasyev O.I., Shchus V.M., Bakhmetyev V.V. Дослідження надійності тиристорного модулю пристроїв регулювання напруги під навантаженням силових трансформаторів. In: Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки: тези доповідей 27-го Міжнародного симпозіуму SIEMA-2024; 2024 жовтня 24–25; Харків, Україна. Харків: НТУ «ХПІ»; 2024. p. 42.repository.kpi.kharkov.ua

12. Li J., Wang Y., Zhang H., et al. Thermal-flow Characteristics Analysis of a Novel Resilient Capacity Ceramic Insulated Winding Dry Type Transformer. AIP Advances. 2024;14(4):045042. doi:10.1063/5.0181572.pubs.aip.org.

13. ou Y., Liu X., Wang Q., et al. Thermal Aging Assessment of Transformer Insulation Using Artificial Neural Networks. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2023;30(2):1234–1242.mdpi.com+arxiv.org+1

14. Kim S., Park J., Lee H. Predictive Maintenance of Power Transformers Based on Thermal and Electrical Parameters. Electric Power Systems Research. 2022;198:107003.

15. Singh R., Sharma A., Gupta N. Impact of Environmental Conditions on Transformer Insulation Performance. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021;129:106778.

16. . ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

17. . ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних

матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

18. . ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.

19. . ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

20. . НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

21. . ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

22. . ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

23. . ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

24. . ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

25. . ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

26. . НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

27. . ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

28. . ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення.

Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.

29. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.

30. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

31. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Функціонування силових трансформаторів за температурними та ізоляційними критеріями експлуатаційної надійності»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота

(кваліфікаційна робота, курсовий проект (робота), реферат, аналітичний огляд, інше (зазначити))

Підрозділ: Кафедра електричних станцій та систем

(кафедра, факультет (інститут), навчальна група)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри ЕСС Лесько В. О.

(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

StrikePlagiarism	
Оригінальність	85,2 %
Загальна схожість	14,8 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☐ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи

Автор

(підпис)

Коваль О. М.

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Робота допущена до захисту

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Вишневський С.Я

(прізвище, ініціали)

Эксперт

(за потреби)

(підпис)

(прізвище, ініціали, посада)

Додаток Б
Ілюстративна частина

Метою бакалаврської роботи є контроль параметрів силових трансформаторів, реалізація якої буде розглянута в наступній послідовності:

- Вимоги що до функціонування силових трансформаторів за умов експлуатації;
- - Випробування і визначення стану ізоляції ;
- Температурний режим силових трансформаторів в процесі експлуатації ;
- - Вимір температури і її перевищення ;
- - Перевантаження електроустаткування, припустимі за критерієм граничної температури ;
- Перевантаження трансформаторів по граничній температурі ;
- Аналіз теплового балансу в силовому трансформаторі ;

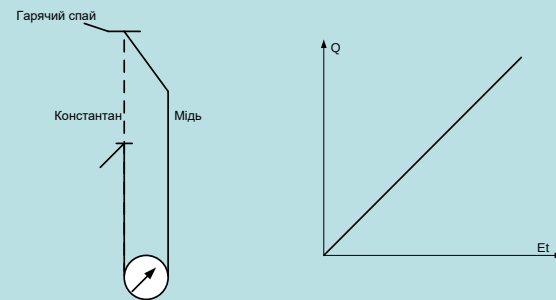
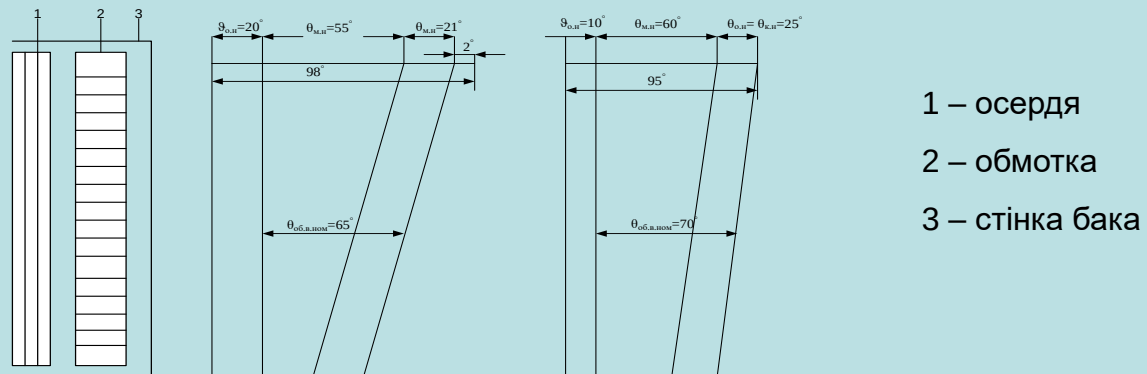
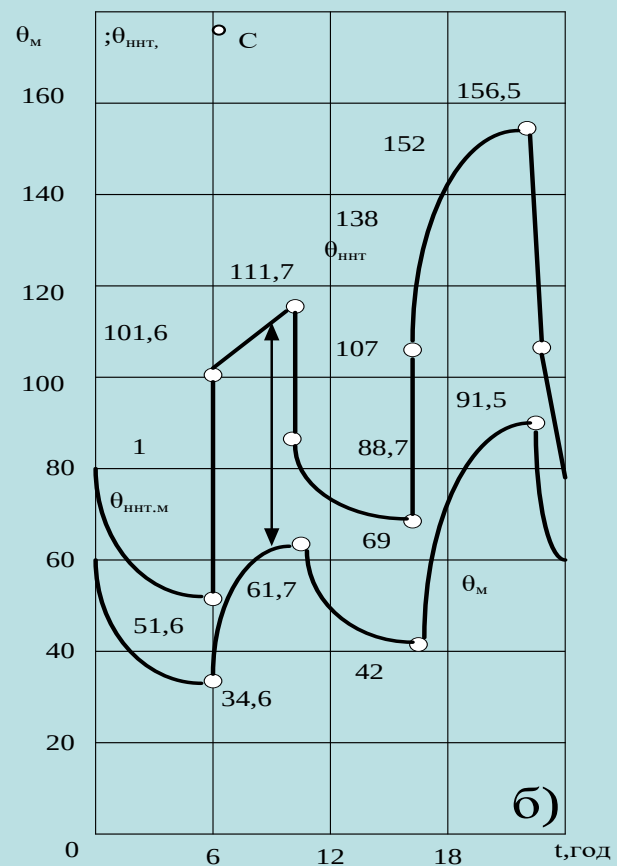
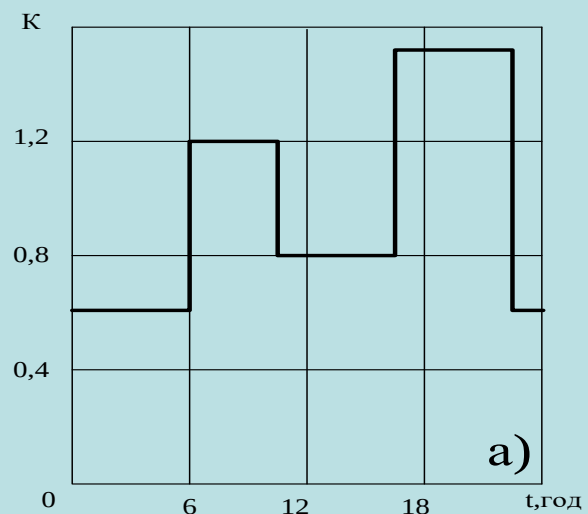


Схема з'єднань при вимірі температури термопарою і
градуйована характеристика

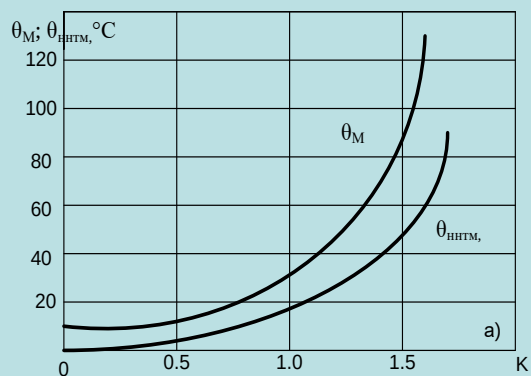


Розподіл перевищень температур по висоті обмотки
трансформаторів

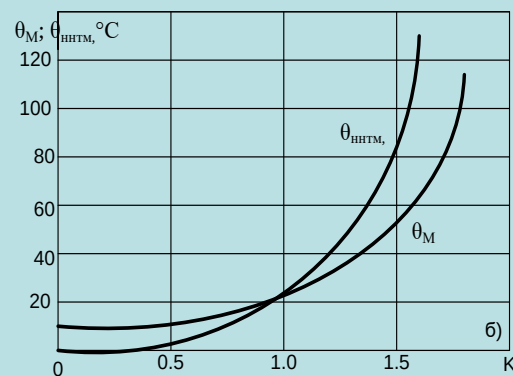


а) добовий графік навантаження; б) графіки перевищень температури масла над температурою середовища, що охолоджується

Залежність перевищень температури масла над температурою середовища, що охолоджується, а також перевищень температури обмотки в найбільш нагрітій точці над температурою масла в сталому стані



а - трансформатори з системою охолодження М або Д



б - трансформатори з системою охолодження Ц або ДЦ.