

**Міністерство освіти і науки України**  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**

**АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ  
В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ**

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни:  
**«Основи теорії електричних апаратів»**

для студентів усіх форм навчання  
спеціальності **G3 «Електрична інженерія»**  
(освітня програма «Електричні та електронні апарати»)

Аналіз теплових процесів в електричних апаратах. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Основи теорії електричних апаратів» для студентів усіх форм навчання спеціальності G3 «Електрична інженерія» (освітня програма «Електричні та електронні апарати») / Укл.: О.В. Близняков. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026. –41 с.

Укладач: О.В. Близняков, доцент, к.т.н.

Рецензент: Л.Б. Жорняк, доцент, к.т.н.

Відповідальний за випуск: Р.Е. Мохнач

Затверджено на засіданні кафедри  
«Електричні та електронні апарати».  
Протокол № 4 від 5 листопада 2025 р.

Рекомендовано до видання  
на засіданні НМК ЕТФ.  
Протокол № 5 від 18 грудня 2025 р.

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Практична робота №1. Джерела тепла в електричних апаратах.....	7
1.1 Мета роботи.....	7
1.2 Предмет дослідження.....	7
1.3 Завдання.....	10
1.4 Методичні вказівки.....	10
1.5 Контрольні питання.....	11
2 Практична робота №2. Передача тепла теплопровідністю.....	12
2.1 Мета роботи.....	12
2.2 Предмет дослідження.....	12
2.3 Завдання.....	14
2.4 Методичні вказівки.....	14
2.5 Контрольні питання.....	15
3 Практична робота №3. Передача тепла конвекцією.....	16
3.1 Мета роботи.....	16
3.2 Предмет дослідження.....	16
3.3 Завдання.....	20
3.4 Методичні вказівки.....	20
3.5 Контрольні питання.....	21
4 Практична робота №4. Передача тепла випромінюванням.....	22
4.1 Мета роботи.....	22
4.2 Предмет дослідження.....	22
4.3 Завдання.....	20
4.4 Методичні вказівки.....	25

4.5 Контрольні питання.....	25
5 Практична робота №5. Аналіз стаціонарних теплових режимів елементів електричних апаратів .....	26
5.1 Мета роботи .....	26
5.2 Предмет дослідження.....	26
5.3 Завдання .....	29
5.4 Методичні вказівки .....	29
5.5 Контрольні питання.....	30
6 Практична робота №6. Аналіз нестаціонарних та квазістаціонарних режимів елементів електричних апаратів .....	31
6.1 Мета роботи .....	31
6.2 Предмет дослідження.....	31
6.3 Завдання .....	34
6.4 Методичні вказівки .....	35
6.5 Контрольні питання.....	36
7 Практична робота №7. Нагрів елементів електричних апаратів струмами короткого замикання .....	37
7.1 Мета роботи .....	37
7.2 Предмет дослідження.....	37
7.3 Завдання .....	39
7.4 Методичні вказівки .....	39
7.5 Контрольні питання.....	40
Перелік джерел посилань.....	41

## ВСТУП

Теплові явища в електричних та електронних апаратах відіграють дуже важливу роль. Вона може бути як позитивною, так і негативною. Позитивна їхня роль полягає, перш за все, у використанні теплових явищ для функціонування електричних апаратів, наприклад:

- *теплове розширення тіл при нагріванні*: біметалічна пластинка, що згинається при нагріванні, здійснює контроль величини струму при тепловому його впливі;

- *плавлення матеріалу*: плавка вставка запобіжника плавиться, тим самим руйнується провідник струму і відключається електричний ланцюг при виникненні перевантаження або короткого замикання.

Слід також відзначити позитивну роль теплових явищ у процесі вимикання силових електричних кіл. При цьому здійснюється перетворення електромагнітної енергії, запасеної в індуктивних елементах електричного кола у теплову енергію електродугового розряду, який являє собою найбільш концентрований поглинач теплової енергії. Якщо уявити собі вимикання електричного кола без утворення електродугового розряду, то у цьому випадку весь запас електромагнітної енергії кола буде перетворюватись на електростатичну енергію. Це, у свою чергу, веде до утворення великої перенапруги, що у деяких випадках спостерігається на практиці при вимиканні малих індуктивних струмів.

Теплові явища в електричних та електронних апаратах відіграють також негативну роль. Вона полягає, перш за все, у тому, що будь-який апарат є провідником електричної енергії, частина якої перетворюється на теплову енергію і йде на нагрівання його елементів. При цьому виникає досить складне завдання відведення або розсіювання теплової енергії у навколишнє середовище та забезпечення оптимального теплового режиму апарату. Це завдання, головним чином, полягає у тому, щоб елементи апарату не нагрівалися надмірно, тобто, понад встановлені норми. Але, якщо елементи апарату при номінальних навантаженнях нагріваються незначно, то це свідчить про нераціональність конструктивних рішень апарата.

Це завдання особливо складне при конструюванні силових електронних апаратів (тобто, апаратів, побудованих на силових напівпровідникових приладах), бо теплові втрати в них значно більші; для розсіювання тепла в таких випадках необхідні спеціальні засоби – системи охолодження:

- *радіатори*, тобто, пристрої з розвиненою поверхнею охолодження;
- *примусове охолодження*, тобто, охолодження елементів за допомогою рухомого потоку повітря, води, трансформаторного масла;
- *випарне охолодження*, тобто, охолодження при фазовому перетворенні рідини.

# 1 ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1. ДЖЕРЕЛА ТЕПЛА В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ

Тривалість практичного заняття – 4 години

## 1.1 Мета роботи

Метою роботи є навчитись визначати джерела тепла в електричних, а також розраховувати потужність теплової енергії, що генерується цими джерелами.

## 1.2 Предмет дослідження

Основним джерелом тепла в електричних апаратах є струмопровідні елементи, які генерують теплову енергію при протіканні електричного струму, насамперед у результаті *джоулевих втрат*. Відповідно до закону Джоуля, потужність теплової енергії, що генерується при протіканні незмінного у часі струму  $I$  в однорідному (з постійним поперечним перерізом  $q$ ) провіднику у загальному випадку визначається наступним виразом:

$$P = I^2 R,$$

де  $R$  – активний опір провідника, який, у свою чергу, визначається наступним виразом:

$$R = \rho \frac{l}{q},$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу провідника;  $l$  – довжина провідника.

Питомий опір матеріалу провідників залежить від температури і визначається за звичаєм наступним виразом:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \vartheta),$$

де  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору матеріалу провідника.

При протіканні у провіднику змінного струму виникають додаткові втрати, зумовлені *поверхневим ефектом* (витісненням ліній

струму на поверхню провідника) та *ефектом близькості* (наявністю близько розташованих провідників зі струмом).

**Поверхневий ефект** обумовлений дією власного магнітного поля провідника і являє собою явище зменшення щільності електричного струму у міру віддалення від поверхні провідника, викликане загасанням проникаючого в провідник електромагнітного поля. Необхідно уточнити, що в даному випадку йдеться про відокремлений провідник, на який не діє магнітне поле інших провідників.

Збільшення втрат внаслідок поверхневого ефекту враховується *коефіцієнтом поверхневого ефекту*, який являє собою відношення опору провідника при проходження ним змінного струму для його опору при постійному струмі:  $k_{\text{пе}} = \frac{R_{\sim}}{R_{\text{п}}}$ .

Для провідників, вироблених з немагнітного матеріалу, я яких спостерігається слабо виражений поверхневий ефект, визначення  $k_{\text{пе}}$  найчастіше здійснюється за допомогою параметра:  $\sqrt{\frac{f}{R}}$ , де  $f$  – частота змінного струму;  $R$  – активний опір провідника певної довжини (найчастіше 100 м) постійному струму.

В провідниках, вироблених з феромагнітного матеріалу спостерігається сильно виражений поверхневий ефект. Вважається, що навіть при промисловій частоті (50 Гц) практично всі втрати на вихрові струми та перемагнічування зосереджені на поверхні провідника. Отже, втрати потужності будуть у цьому випадку будуть визначатись периметром поперечного перерізу провідника та його довжиною. Для практичних розрахунків втрат у феромагнітному провіднику часто використовують емпіричні формули, наприклад [2]:

$$P = (2,9 \dots 3,25) \cdot 10^{-4} \left(\frac{I}{p}\right)^{5/3} F \sqrt{f},$$

де  $I$  – величина струму у провіднику, А;

$p$  – периметр поперечного перерізу провідника, м;

$F$  – бокова поверхня провідника, м<sup>2</sup>;

$f$  – частота змінного струму, Гц.

Поряд із струмопровідними частинами, джерелами теплової енергії в електричних апаратах є також і елементи, що не несуть струмо-

вого навантаження. Такими елементами в електричних апаратах є *магнітні кола змінного струму*, у тому числі *короткозамкнені витки*; *елементи конструкції* електричних та електронних апаратів: корпусні деталі, кришки, фланці, кронштейни тощо.

Основною причиною теплових втрат в даному випадку є змінний магнітний потік, що проходить в даному елементі, та внаслідок чого виникають вихрові струми. Слід зазначити, що ці елементи, зазвичай, виконуються з феромагнітних матеріалів, тобто, матеріалів із невеликою глибиною проникнення електромагнітної хвилі. Тому слід вважають, що практично всі втрати потужності в них зосереджені на поверхні елемента. Розрахунок теплових втрат у них визначають за допомогою емпіричних залежностей.

Наприклад, для замкнутого суцільного магнітопроводу, що має намагнічувальну котушку, втрати потужності визначаються за наступною формулою [2]:

$$P = (2,9 \dots 3,25) \cdot 10^{-4} \left( \frac{Iw}{l_m} \right)^{5/3} F \sqrt{f},$$

де  $Iw$  – магніторушійна сила котушки;

$l_m$  – довжина середньої магнітної силової лінії магнітопроводу, м;

$F$  – бічна поверхня магнітопроводу, м<sup>2</sup>.

Для замкнутого шихтованого магнітопроводу [2]:

$$P = p_n \cdot m,$$

де  $p_n$  – питомі втрати;

$m$  – маса магнітопроводу;

Для феромагнітного кільця, що охоплює провідник зі струмом  $I$  [2]:

$$P = (2,9 \dots 3,25) \cdot 10^{-4} \left( \frac{I}{l_m} \right)^{5/3} F \sqrt{f},$$

де  $l_m$  – довжина середньої магнітної силової лінії, м;

$F$  – бічна поверхня кільця, м<sup>2</sup>.

### 1.3 Завдання

1.3.1 Визначити втрати потужності в одному метрі круглого алюмінієвого шинопроводу діаметром 40 мм, по якому тече змінний струм 2400 А промислової частоти 50 Гц. Робоча температура шинопроводу складає 90°C. Задачу вирішити для трубчастого шинопровід приблизно такого ж поперечного перерізу 75/85 мм; порівняти отримані результати.

1.3.2 Визначити коефіцієнт поверхневого ефекту та втрати потужності в одному метрі сталевій шини прямокутного перерізу 80×4 мм<sup>2</sup>, якщо по неї тече змінний струм 250 А промислової частоти 50 Гц. Температура шини складає 110°C. Задачу вирішити для мідної шини; порівняти отримані результати.

1.3.3 Визначити теплові втрати у чавунному кільці, що охоплює провідник зі струмом 2500 А промислової частоти 50 Гц. Внутрішній та зовнішній діаметр кільця складають 100 та 150 мм, відповідно; його висота – 150 мм.

1.3.4 Визначити теплову потужність, що виділяється у магнітопроводі електромагніту, котушка якого намотана круглим проводом діаметром 4 мм та має 250 витків. Магнітопровід виготовлений з листової трансформаторної сталі марки 1512, товщина листів – 0,5 мм. Коефіцієнт заповнення сталі магнітопроводу складає 0,9. При підключенні котушки до джерела змінної напруги частоти 50 Гц щільність струму складає 1,0 А/мм<sup>2</sup>. Ескіз магнітопроводу наданий на рис. 1.1, де  $a = b = 70$  мм,  $H = 320$  мм,  $B = 180$  мм.

### 1.4 Методичні вказівки

1.4.1 Для виконання завдання 1.3.1 слід використати формулу, яка визначає сумарні втрати потужності у провідниках:

$$P = I^2 R k_d,$$

де  $k_d$  – коефіцієнт додаткових втрат шинопроводу; оскільки у нашому випадку мається на увазі одиночний шинопровід, то слід враховувати додаткові втрати тільки внаслідок поверхневого ефекту.

1.4.2 Для виконання завдання 1.3.2 слід використати емпіричну формулу, яка визначає втрати потужності у феромагнітних провідниках

1.4.3 Для виконання завдання 1.3.3 слід використати емпіричну

формулу, яка визначає втрати потужності у феромагнітному кільці, що охоплює провідник зі струмом.

1.4.4 Для виконання завдання 1.3.4 слід використати формулу, яка визначає втрати потужності у замкнутому шихтованому магнітопроводі.

## **1.5 Контрольні питання**

1.5.1 Назвіть основні джерела тепла в електричних апаратах.

1.5.2 Що таке Джоулеві втрати?

1.5.3 Що таке поверхневий ефект та ефект близькості?

1.5.4 Яким чином враховуються втрати внаслідок поверхневого ефекту та ефекту близькості?

1.5.5 Чим відрізняються слабо виражений та сильно виражений поверхневий ефект?

1.5.6 Назвіть основну причину теплових втрат в конструктивних (неструмопровідних) елементах електричних апаратів.

## 2 ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ

Тривалість практичного заняття – 4 години

### 2.1 Мета роботи

Метою роботи є навчитись визначати випадки передачі теплової енергії теплопровідністю в електричних, а також набути практичних навичок розрахункового визначення теплових параметрів для цих випадків.

### 2.2 Предмет дослідження

*Теплопровідність* – це спосіб перенесення теплової енергії за допомогою взаємодії сусідніх частинок за відсутності течії середовища. Існують різні механізми передачі тепла теплопровідністю в залежності від характеру середовища. У рідинах (крім рідких металів) та неелектропровідних твердих тілах передача тепла здійснюється розповсюдженням пружних хвиль взаємодії між частинками. У газах передача тепла здійснюється за рахунок дифузії атомів та молекул. У металах (у т.ч., рідких металах) – дифузії вільних електронів. Отже, метали, внаслідок високої рухливості вільних електронів, є дуже хорошими провідниками тепла; рідини (за винятком рідких металів), а також гази та тверді ізоляційні матеріали є поганими провідниками тепла.

Основним законом, що описує процес передачі тепла теплопровідністю, є закон Фур'є, який встановлює співвідношення між температурним полем і тепловим потоком у будь-якій точці об'єкта, що розглядається:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}\vartheta,$$

де знак мінус вказує на те, що тепловий потік, завжди спрямований у бік зменшення температури;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності речовини.

Коефіцієнт теплопровідності є найважливішим теплофізичним параметром, що визначає властивості матеріалу проводити тепло. Він являє собою кількість теплоти, що проходить в одиницю часу через одиницю поверхні при зміні температури на 1 градус. Встановлено, що для більшості матеріалів відносно невеликого діапазону температур спостерігається лінійна залежність коефіцієнта теплопровідності

від температури:

$$\lambda = \lambda_0(1 + \beta\vartheta),$$

де  $\beta$  – температурний коефіцієнт теплопровідності;

$\lambda_0$  – теплопровідність при  $0^\circ\text{C}$ .

Для визначення температурного поля тіла, в якому передача тепла здійснюється шляхом теплопровідності, на основі закону Фур'є складається відповідне *рівняння теплопровідності*. У загальному випадку рівняння теплопровідності являє собою складну тривимірну задачу, проте в ряді практичних випадків рівняння суттєво спрощується і зводиться до двовимірних і навіть одновимірних задач.

У випадку одновимірної задачі, для практичних розрахунків використовують, як правило, закон Ома для теплопровідності, згідно якого тепловий потік між двома поверхнями з перепадом температур  $(\vartheta_1 - \vartheta_2)$  визначається за наступним виразом:

$$P = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{R_T},$$

де  $R_T$  – тепловий опір середовища між поверхнями.

Розрахунок теплових опорів визначають за допомогою формул, отриманих шляхом вирішення рівняння теплопровідності. Наприклад, для плоскої стінки товщиною  $\delta$ , яка не має внутрішніх джерел теплоти, тепловий опір визначаються за наступною формулою [1, 2]:

$$R_T = \frac{\delta}{\lambda \cdot S},$$

де  $S$  – площа поверхні стінки.

Для циліндричної стінки без внутрішніх джерел тепла:

$$R_T = \frac{\ln(R/r)}{2\pi\lambda l},$$

де  $R$ ,  $r$  – зовнішній та внутрішній радіус стінки, відповідно;

$l$  – довжина стінки.

Тепловий опір суцільного циліндру між його віссю та зовнішньою

поверхнею при наявності у ньому рівномірно розподіленого джерела теплоти визначається за наступною формулою:

$$R_T = \frac{1}{4\pi\lambda l}$$

Інші випадки розрахунку теплових опорів надані у спеціальній літературі [3–6].

## 2.3 Завдання

2.3.1 Визначити температуру зовнішньої поверхні паперової ізоляції прямокутної мідної шини з розмірами поперечного перерізу  $100 \times 10 \text{ мм}^2$ , по якій тече змінний струм 2000 А промислової частоти 50 Гц. Товщина шару ізоляції складає 2 мм; температура її внутрішньої поверхні складає  $90^\circ\text{C}$ .

2.3.2 Визначити допустиме значення струму алюмінієвого провідника круглого поперечного перерізу діаметром 40 мм, вкритого двома шарами ізоляції: шаром паперу товщиною 4 мм та шаром лакотканини товщиною 6 мм. Перепад температури між внутрішньою та зовнішньою поверхнями ізоляції складає 10 К.

2.3.3 Визначити перепад температур між поверхнею та віссю круглої шини діаметром 15 мм, по якій тече струм 6000 А. Питомий опір матеріалу шини прийняти таким, що дорівнює  $2,2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ; теплопровідність  $400 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

## 2.4 Методичні вказівки

2.4.1 Для виконання завдання 2.3.1 необхідно, по-перше, визначити теплову потужність, що генерується в одному метрі шини з урахуванням додаткових втрат; по-друге, необхідно визначити тепловий опір ізоляційного шару в розрахунку на один метр довжини шини, вважаючи його плоскою стінкою без внутрішніх джерел теплоти. Використовуючи закон Ома для ділянки теплового кола визначити температуру зовнішньої поверхні ізоляційного шару.

2.4.2 Для виконання завдання 2.3.2 необхідно, по-перше, визначити теплові опори обох шарів ізоляції в розрахунку на один метр довжини провідника, вважаючи їх циліндричними стінками без внутрішніх

джерел теплоти; по-друге, використовуючи закон Ома для теплового кола, визначити тепловий потік, що проходить через ізоляційний шар, і дорівнює тепловій потужності, що генерується в одному метрі провідника. Використовуючи рівняння теплового балансу для стаціонарного теплового режиму, обчислити допустиме значення струму провідника.

2.4.3 Для виконання завдання 2.3.3 необхідно, по-перше, визначити тепловий опір шини в розрахунку на один метр її довжини, вважаючи її суцільною циліндричною стінкою з рівномірно розподіленим джерелом теплоти. по-друге, необхідно визначити теплову потужність, що генерується в одному метрі шини. Використовуючи закон Ома для ділянки теплового кола, визначити перепад температур між поверхнею та віссю шини.

## 2.5 Контрольні питання

2.5.1 Що таке теплопровідність?

2.5.2 Яким чином здійснюється передача тепла теплопровідністю у твердих, рідинних та газоподібних середовищах?

2.5.3 Назвіть основний закон, що описує передачу тепла теплопровідність та сформулюйте його сутність.

2.5.4 Що таке коефіцієнт теплопровідності та у чому полягає його фізичний сенс?

2.5.5 Як визначається температурне поле тіла, всередині якого передача тепла здійснюється теплопровідністю?

2.5.6 Сформулюйте закон Ома для теплового кола.

### 3 ПРАКТИЧНА РОБОТА №3. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА КОНВЕКЦІЄЮ

Тривалість практичного заняття – 4 годин

#### 3.1 Мета роботи

Метою роботи є навчитись визначати випадки передачі теплової енергії конвекцією в електричних апаратах, а також набути практичних навичок розрахункового визначення теплових параметрів для цих випадків.

#### 3.2 Предмет дослідження

Конвекція або конвективний теплообмін – це передача теплової енергії, яка поєднує у собі теплопровідність та передачу теплової енергії шляхом переміщення макроскопічних обсягів рідини або газу. Тобто, на відміну від теплопровідності у чистому вигляді конвективний теплообмін доповнюється наявністю потоків рідини чи газу. Цього не може спостерігатися в твердих тілах, оскільки молекули в них жорстко утримуються в просторі, отже ніякої течії речовини відбуватись не може. Слід зазначити, що при розгляді конвективного теплообміну часто одним терміном «рідина» об'єднують і безпосередньо крапельну рідину (нестискуване середовище) і газ (стискуване середовище), маючи на увазі при цьому охолоджувальне середовище.

Таким чином, конвективний теплообмін є найбільш характерним для випадку теплообміну між поверхнею твердого тіла і рідиною (рідинним або газовим середовищем). Передача тепла теплопровідністю у цьому випадку спостерігається у т.з. суміжному шарі, тобто, вузькому прошарку рідини, що безпосередньо межує з поверхнею твердого тіла.

Конвективний теплообмін описується складною системою диференціальних рівнянь: це по-перше, *рівняння теплопровідності*, яке в умовах конвективного теплообміну доповнюється швидкістю руху макрочастинок; по-друге, це *рівняння руху рідини Нав'є-Стокса*; і по-третє, це *рівняння нерозривності або суцільності*.

Вирішення такої системи рівнянь викликає великі математичні труднощі. Тому у практиці інженерних розрахунків конвективного теплообміну частіше використовується *закон теплопередачі Ньютона*,

який визначає величину теплового потоку від поверхні  $S$  з температурою  $\vartheta$  до рідини з температурою  $\vartheta_0$  (або навпаки):

$$P = \alpha_k(\vartheta - \vartheta_0)S_{\text{охол}},$$

де  $\alpha_k$  – конвективний коефіцієнт теплопередачі, що характеризує потужність, що розсіюється (або сприймається) одиницею поверхні твердого тіла шляхом конвекції при різниці температур між тілом і середовищем в 1 градус; саме цей параметр концентрує всю складність конвективного теплообміну.

Конвективний коефіцієнт тепловіддачі є дуже складною функцією великої кількості параметрів: по-перше, це температура нагрітої поверхні та «рідини» (охолоджуючого середовища); по-друге, це теплофізичні параметри «рідини» та швидкість її руху відносно поверхні; і по-третє, це комплекс параметрів, що характеризують форму, структуру, орієнтацію самої поверхні та її розміри.

Використання в інженерних розрахунках цієї функції дуже незручно внаслідок великої кількості змінних, які впливають процес конвективного теплообміну. Тому, враховуючи ступінь впливу тих чи інших параметрів та спираючись на результати експериментів, коефіцієнт тепловіддачі зазвичай надають більш простими виразами, які здобуті за допомогою *теорії подібності*.

Теорія подібності дозволяє характеризувати перебіг складних процесів за допомогою т.з. *критеріїв подібності*. При цьому, процес конвективного теплообміну найчастіше описують наступними параметрами (критеріями) [1, 2]:

- критерій Рейнольдса:  $Re = \frac{vl}{\nu}$ ;
- критерій Нуссельта:  $Nu = \frac{\alpha_k L}{\lambda}$ ;
- критерій Грасгофа:  $Gr = \beta g \frac{L^3}{\nu^2} (\vartheta - \vartheta_0)$ ;
- критерій Прандтля:  $Pr = \frac{\nu}{a}$ ,

де  $\nu$  – швидкість руху рідини відносно нагрітої поверхні.

Теплофізичні параметри «рідини»:

$\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;

$c_p$  – питома теплоємність при постійному тиску;

$\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості;

$L$  – геометричний параметр, характерний для тіла даної конфігурації – *визначальний розмір*.

Конкретний вид критеріального рівняння визначається видом та умовами теплообміну. Для випадку природної конвекції у необмеженому просторі критеріальне рівняння матиме такий вигляд [1, 2]:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)_m^n,$$

де  $C$  і  $n$  – емпіричні коефіцієнти, зумовлені величиною добутку  $(Gr \cdot Pr)$ ;

$m$  – індекс що вказує те що, що значення теплофізичних параметрів «рідини» ( $\lambda$ ,  $a$ ,  $\nu$ ) слід обирати при т.з. *визначальній температурі* (середньої арифметичної між нагрітим тілом та середовищем):

$$\vartheta_m = 0,5 \cdot (\vartheta - \vartheta_0).$$

Величина добутку  $(Gr \cdot Pr)$  визначає чотири режими руху «рідини», проте на практиці дуже часто спостерігаються лише два з них: закон 1/4 ступеня або 1/3 ступеня. Якщо задовольняється нерівність:

$$(\vartheta - \vartheta_0) \leq \left(\frac{840}{L}\right)^3,$$

то слід використовувати закон 1/4 ступеня, інакше – закон 1/3.

На інтенсивність конвективного теплообміну істотно впливає орієнтація охолоджуваної поверхні. При горизонтальній орієнтації, зверненої вгору, розрахункове значення коефіцієнта тепловіддачі слід збільшувати на 30%, для зверненої вниз – знижувати на 30%.

Для випадку конвективного теплообміну в обмеженому просторі впроваджують ряд спрощень. Складний процес теплообміну у даному випадку прийнято розглядати як елементарне явище передачі тепла шляхом теплопровідності. Для цього вводиться поняття *еквівалентного коефіцієнту теплопровідності*, величина якого визначається відповідно до наступного виразу:

$$\lambda_{\text{екв}} = \lambda_p \varepsilon_k,$$

де  $\lambda_p$  – коефіцієнт теплопровідності «рідини» в прошарку при температурі, що дорівнює середньому арифметичному значенню температур твердих поверхонь, що обмежують прошарок;

$\varepsilon_k$  – коефіцієнт конвекції, який визначається за допомогою критеріального рівняння, яке для випадку циліндричної рідинної стінки має наступний вигляд:

$$Nu = 0,18(Gr \cdot Pr)_m^{0,25} \text{ при } Gr \cdot Pr > 1000.$$

Тепловий опір циліндричного прошарку рідини буде визначатись відповідно до випадку передачі тепла теплопровідністю і буде мати наступний вигляд:

$$R_T = \frac{\ln(R/r)}{2\pi\lambda_{\text{екв}}l}.$$

Величина теплового потоку через прошарок рідини може бути визначена за допомогою рівняння закону Ома:

$$P = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{R_T}.$$

Інші випадки конвективного теплообміну в обмеженому просторі надані у літературі [1, 2].

Для випадку конвективного теплообміну при примусовій конвекції критеріальне рівняння при поперечному обтіканні одиночного циліндра при ламінарній течії рідини ( $Re = 5 \dots 10^3$ ) буде мати такий вигляд:

$$Nu = 0,66Re_p^{0,5} Pr_p^{0,38} \left(\frac{Pr_p}{Pr}\right)^{0,25},$$

де індекс «р» вказує на те, що відповідні параметри слід приймати за середньої температури «рідини»; відсутність індексу вказує на те, що відповідні параметри слід приймати при температурі охолоджуваної поверхні.

Якщо ж  $Re = 10^3 \dots 2 \cdot 10^5$ , то буде мати місце турбулентній режим течії рідини, отже критеріальне рівняння буде мати такий вигляд:

$$Nu = 0,037 Re_p^{0,6} Pr_p^{0,38} \left( \frac{Pr_p}{Pr} \right)^{0,25}.$$

Для визначення коефіцієнта конвективної тепловіддачі в інших умовах і форм охолоджуваної поверхні при примусовій конвекції необхідно користуватися даними з літератури [1–6].

### 3.3 Завдання

3.3.1 Визначити коефіцієнт тепловіддачі конвекцією з поверхні циліндричного провідника, розташованого горизонтально у спокійному трансформаторному маслі, температура якого складає 20°C. Температура поверхні провідника складає 75°C, діаметр провідника – 45 мм. Визначити також, як зміниться коефіцієнт тепловіддачі, якщо провідник помістити у повітря та у воду з такою ж температурою.

3.3.2 Визначити тепловий потік у зазорі, заповненим трансформаторним маслом, між провідником діаметром 30 мм з температурою 80°C та трубою з температурою 35°C. Величина зазору складає 3 мм. Довжина системи провідник–труба складає 1 м.

3.3.3 Визначити коефіцієнт тепловіддачі з поверхні мідного круглого шинопроводу діаметром 15 мм, а також допустиме тривале навантаження постійним струмом, якщо шинопровід охолоджується поперечним потоком сухого повітря при швидкості обдуву 1 м/с. Температура шинопроводу складає 80°C, а температура повітря – 20°C. Визначити також, як зміниться коефіцієнт тепловіддачі та допустиме навантаження при відсутності обдуву повітрям з такою ж температурою.

### 3.5 Методичні вказівки

3.4.1 Для виконання завдання 3.3.1 необхідно скористатись критеріальним рівнянням для випадку природної конвекції у необмеженому просторі, бо провідник знаходиться у спокійному трансформаторному маслі, об'єм якого не надано; оскільки провідник розташований горизонтально, визначальним розміром у даному випадку є діаметр провідника.

3.4.2 Для виконання завдання 3.3.2 необхідно скористатись критеріальним рівнянням для випадку природної конвекції в обмеженому

просторі (циліндричної рідинної стінки), а також поняттям еквівалентного коефіцієнту теплопровідності.

3.4.3 Для виконання завдання 3.3.3 необхідно скористатись критеріальним рівнянням для випадку примусової конвекції при поперечному обтіканні одиночного циліндра (див. підрозділ 3.2). Допустиме тривале навантаження визначити за формулою Ньютона.

### **3.5 Контрольні питання**

3.5.1 Які складові містить у собі конвективний теплообмін?

3.5.2 Що містить у собі термін «рідина»?

3.5.3 У якому випадку конвективний теплообмін є найбільш характерним?

3.5.4 У чому полягає закон теплопередачі Ньютона?

3.5.5 Для чого використовують критерії подібності?

3.5.6 Чим відрізняється природна конвекція від примусової?

3.5.7 З якою метою використовують поняття еквівалентного коефіцієнту теплопровідності?

3.5.8 У чому полягає закон Ома для теплового кола?

## 4 ПРАКТИЧНА РОБОТА №4. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

### 4.1 Мета роботи

Метою роботи є навчитись визначати випадки передачі теплової енергії випромінюванням в електричних апаратах, а також набути практичних навичок розрахункового визначення теплових параметрів для цих випадків.

### 4.2 Предмет дослідження

Теплове або температурне випромінювання являє собою передачу теплової енергії за допомогою електромагнітного випромінювання (електромагнітних хвиль). Відомо, що будь-яке тіло є джерелом електромагнітного (а отже, і теплового) випромінювання (електромагнітних хвиль).

Електромагнітне випромінювання має одну й ту ж природу, проте містить якісно різні види, в залежності від довжини хвиль: *космічне випромінювання* –  $0,05 \cdot 10^{-12}$  м; *γ-випромінювання* –  $(0,5-1,0) \cdot 10^{-12}$  м; *рентгенівське* –  $10^{-12}-20 \cdot 10^{-9}$  м; *ультрафіолетове* –  $20 \cdot 10^{-9}-0,4 \cdot 10^{-6}$  м; *видиме* –  $(0,4-0,8) \cdot 10^{-6}$  м; *інфрачервоне* –  $(0,8-200) \cdot 10^{-6}$  м; *радіохвилі* – більше  $200 \cdot 10^{-6}$  м.

Теплова енергія переноситься переважно інфрачервоним випромінюванням, яке має досить широкий діапазон довжини хвиль. Отже, , на відміну інших способів теплообміну, промениста енергія характеризується як кількісно (тобто, потужністю випромінювання), так і якісно (тобто, спектром). Залежно від цього розрізняють *монохроматичне* випромінювання та *складне* випромінювання.

Закономірності теплового випромінювання описуються різними залежностями. Найчастіше за практичних розрахунків користуються законом Стефана-Больцмана, який встановлює залежність щільності інтегрального випромінювання від температури чорного тіла:

$$q_{\text{в}} = \varepsilon \sigma T^4,$$

де  $\varepsilon$  – ступінь чорноти випромінюваного тіла;

$\sigma$  – постійна Стефана-Больцмана;

$T$  – температура випромінюючої поверхні.

Таким чином, щільність випромінювання пропорційна 4-го ступеня температури випромінюючого тіла.

При розрахунку теплопередачі випромінюванням від одного тіла до іншого враховується не тільки власне випромінювання обох тіл, що визначається за законом Стефана-Больцмана, а й їхнє взаємне розташування. Якщо теплообмін випромінюванням здійснюється між тілом з температурою  $T_1$  та його оболонкою з температурою  $T_2$  (тіло, і оболонка непрозорі,  $T_1 > T_2$ ), то результуючий тепловий потік з тіла на оболонку при взаємному опроміненні представляється як різниця:

$$P_{12} = P_{\text{еф}1}\varphi_{12} - P_{\text{еф}2}\varphi_{21},$$

де  $P_{\text{еф}1}$  і  $P_{\text{еф}2}$  – ефективні випромінювання тіла та оболонки, відповідно, що являють собою суму власного та відбитого випромінювань;

$\varphi_{12}$  і  $\varphi_{21}$  – коефіцієнти опроміненості, що показують яка частина теплового потоку, що випускається тілом, сприймається оболонкою; у даному випадку  $\varphi_{12} = 1$ , а  $\varphi_{21} < 1$ .

Враховуючи закон Стефана-Больцмана, вираз для результуючого теплового потоку буде мати наступний вигляд:

$$P_{12} = 5,67 \cdot \varepsilon_{\text{п}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot S_1,$$

де  $\varepsilon_{\text{п}}$  – приведений ступінь чорноти, який визначається відповідно до наступного виразу:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \varphi_{21}},$$

де  $\varphi_{21} = \frac{S_1}{S_2}$ ;

$S_1$  та  $S_2$  – площі поверхонь тіла та оболонки, відповідно;

$\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  – ступені чорноти тіла та оболонки, відповідно.

Якщо вираз, що визначає результуючий тепловий потік, розділити на площу поверхні тіла  $S_1$  та різницю температур тіла та оболонки,

отримаємо вираз для коефіцієнта тепловіддачі випромінюванням:

$$\alpha_{\text{в}} = 5,67 \cdot \varepsilon_{\text{п}} \frac{\left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2}.$$

Цей вираз може бути використаний для випадку, якщо випромінююче тіло знаходиться на достатньому віддаленні від інших тіл (в оточуючому середовищі з температурою  $T_2$ ). У цьому випадку  $\varepsilon_{\text{п}}$  буде дорівнювати власному ступеню чорноти випромінюючого тіла.

Інші випадки теплообміну випромінюванням представлені у відповідній літературі з теплообміну.

Слід зазначити, що у більшості випадків тепловіддача з поверхні твердих тіл у рідкому чи газоподібному середовищі здійснюється т.з. складний теплообмін, який поєднує теплообмін випромінюванням та конвекцією. У таких випадках визначають сумарний коефіцієнт тепловіддачі, який визначається сумою коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією та випромінюванням:  $\alpha_{\text{т}} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{в}}$ , який може бути використаний для розрахунків теплових процесів за формулою Ньютона.

### 4.3 Завдання

4.3.1 Визначити теплову потужність, що передається випромінюванням з поверхні шини круглого поперечного перерізу діаметром 25 мм, довжиною один метр. Шина розташована у повітрі з температурою 35°C на великій відстані від інших тіл. Поверхня шини є шорсткою, а її температура складає 95°C. Виконати завдання також за умови, що поверхня шини в одному випадку полірована, а в іншому – пофарбована масляною фарбою.

4.3.2 Визначити допустиму щільність струму у мідній круглій шині діаметром 20 мм, розташованій концентрично у сталевій трубі з внутрішнім діаметром 25 мм. Між поверхнею шини та труби – глибокий вакуум. Відповідно до технічних умов, температура шини не повинна перевищувати 100°C, а температура внутрішньої поверхні труби – 35°C. Поверхня труби вкрита білим лаком, а поверхня шини – чорним матовим.

4.3.3 Визначити сумарний коефіцієнт тепловіддачі з поверхні шини, виготовленої у вигляді сталевій пофарбованої масляною фарбою

труби, розташованої горизонтально у спокійному повітрі з температурою 35°C. Температура поверхні шини складає 95°C, а її зовнішній діаметр – 60 мм.

#### 4.4 Методичні вказівки

4.4.1 Для виконання завдання 4.3.1 слід скористатись формулою, що визначає коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням для випадку, коли випромінююче тіло знаходиться на достатньому віддаленні від інших тіл в оточуючому середовищі з відповідною температурою.

4.4.2 Для виконання завдання 4.3.2 слід, по-перше, визначити величину теплового потоку з поверхні шини, скористатись відповідною формулою для випадку, коли теплообмін випромінюванням здійснюється між тілом з та його оболонкою за умови що температура тіла більше ніж температура оболонки; по-друге, визначити допустиму щільність струму, скориставшись рівнянням теплового балансу для стаціонарного теплового режиму шини.

4.4.3 Для виконання завдання 4.3.3 необхідно визначити конвективний коефіцієнт тепловіддачі для випадку природної конвекції у необмеженому просторі, а також коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням для випадку тепловіддачі у навколишнє середовище при відсутності поблизу сторонніх тіл; сумарний коефіцієнт тепловіддачі визначається сумою коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією та випромінюванням.

#### 4.5 Контрольні питання

4.5.1 Що являє собою теплове випромінювання?

4.5.2 Назвіть та охарактеризуйте тип випромінювання, яким переважно переноситься тепла енергія.

4.5.3 Чим відрізняється складне випромінювання від монохроматичного?

4.5.4 Назвіть та охарактеризуйте закон, яким найчастіше користуються для практичних розрахунків теплового випромінювання.

4.5.5 Що таке ефективне випромінювання?

4.5.6 Що таке складний теплообмін?

## 5 ПРАКТИЧНА РОБОТА №5. АНАЛІЗ СТАЦІОНАРНИХ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Тривалість лабораторного заняття – 6 годин

### 5.1 Мета роботи

Метою роботи є набуття практичних навичок розрахункового визначення стаціонарного теплового режиму елементів електричних апаратів з урахуванням усіх способів теплопередачі.

### 5.2 Предмет дослідження

Визначення теплового режиму або тепловий розрахунок струмопровідних (та інших, тепловиділяючих) елементів є важливою практичною задачею, яка вирішується в процесі проектування електричних та електронних апаратів. У загальному випадку задача теплового розрахунку полягає у тому, щоб визначити потужність джерел тепла апарата та його температурне поле. Тепловий розрахунок проводять, як правило, у два послідовні етапи: попередній розрахунок (якісний аналіз теплового режиму) та перевірочний розрахунок, (уточнений аналіз теплового режиму).

На попередній стадії розрахунку необхідно визначити джерела тепла, їх сумарну потужність, а також можливість її зниження за умови найменшої витрати матеріалів та оптимальності теплового режиму. Проведення перевірочного розрахунку передбачає вирішення наступних завдань:

➤ *1-а пряма задача* полягає у визначенні допустимого струмового навантаження при відомих геометричних розмірах елементів апаратів та відомому способі їх охолодження;

➤ *1-а зворотна задача* полягає у визначенні необхідної охолоджуючої поверхні при відомій величині струмового навантаження і відомому способі охолодження;

➤ *2-а пряма задача* – визначення способу та параметрів системи охолодження при відомому струмовому навантаженні та геометричних розмірах елементів електричних апаратів;

➤ *2-а зворотна задача* – визначення температурного поля елементів апаратів при відомому струмовому навантаженні та відомих геометричних розмірах, та способі їх охолодження.

Необхідно відзначити, що незалежно від задачі, що вирішується, завжди відомі допустимі значення температур.

При виконанні теплових розрахунків будь-який елемент електричних та електронних апаратів розглядають як *термодинамічну систему*, в якій з одного боку виділяється тепла енергія, а з іншого боку, нагріті елементи апарату віддають (розсіюють) теплову енергію в навколишнє середовище.

*Стаціонарний (сталий)* тепловий режим має місце при тепловій рівновазі, коли тепла потужність, що виділяється даним елементом дорівнює потужності, яка розсіюється їм у навколишнє середовище. Такий режим зазвичай спостерігається при тривалій роботі апарата у номінальному режимі. У цьому випадку температура елемента протягом часу залишається незмінною; її за звичаєм називають *сталою температурою*, яку визначають за допомогою рівняння теплового балансу для стаціонарного теплового режиму.

Однією з простих, але дуже важливих задач теплового розрахунку є аналіз стаціонарного теплового режиму однорідного струмопроводу. Однорідним вважають струмопровід, який має однакові по всій довжині умови виділення тепла та віддачі його у навколишнє середовище, а саме: провідник має постійний поперечний переріз і виготовлений з одного і того ж матеріалу; тепловий опір між провідником та оточуючим докільлям по всій довжині струмопроводу є незмінним. Основними припущеннями під час аналізу є:

- струмопровід має нескінченну довжину, внаслідок чого температура по всій довжині незмінна, отже теплопередача в осьовому напрямку провідника відсутня і йде тільки в радіальному;

- коефіцієнт додаткових втрат, сумарний коефіцієнт тепловіддачі або тепловий опір не залежать від температури провідника;

- внаслідок високої теплопровідності матеріалу провідника у площині його поперечного перерізу температура незмінна.

Таким чином, рівняння теплового балансу у даному випадку буде мати наступний вигляд:

$$\frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta) k_d}{q} = \frac{\vartheta - \vartheta_0}{r_{\tau\Sigma}},$$

де  $I$  – струмове навантаження струмопроводу;

$q$  – поперечний переріз провідника;

$\rho_0$  – питомий електричний опір при температурі  $0^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт опору;

$k_d$  – коефіцієнт додаткових втрат;

$\vartheta$  – температура провідника;

$\vartheta_0$  – температура навколишнього середовища;

$r_{\tau\Sigma}$  – сумарний тепловий опір між поверхнею провідника і навколишнім середовищем на одиницю довжини.

Дане рівняння дозволяє знайти величину сталої температури провідника:

$$\vartheta_{\text{ст}} = \frac{\frac{I^2 \rho_0 k_d}{q} + \vartheta_0}{\frac{1}{r_{\tau\Sigma}} - \frac{I^2 \rho_0 k_d \alpha}{q}},$$

а також допустиме струмове навантаження, за умови, що стала температура провідника дорівнює його допустимій температурі  $\vartheta_{\text{доп}}$ :

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{q(\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0)}{\rho_0(1 + \alpha\vartheta_{\text{доп}})k_d r_{\tau\Sigma}}}.$$

Якщо віддача тепла у навколишнє середовище відбувається безпосередньо з поверхні провідника, вираз для сумарного теплового опору має такий вигляд:

$$r_{\tau\Sigma} = \frac{1}{\alpha_{\tau} p},$$

де  $p$  – периметр поперечного перерізу провідника (у випадку, коли теплопередача здійснюється з усієї його поверхні); у загальному випадку,

це поверхня охолодження провідника, що припадає на одиницю його довжини;

$\alpha_T$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі з поверхні провідника.

У загальному випадку, теплопередача з поверхні провідника може здійснюватися усіма трьома видами, отже необхідно скласти теплову схему заміщення та розраховувати сумарний тепловий опір між провідником та навколишнім середовищем.

### 5.3 Завдання

5.3.1 Визначити тривало допустимий змінний струм частоти 50 Гц для мідної окисленої шини прямокутного поперечного перерізу  $60 \times 6$  мм<sup>2</sup>, розташованої горизонтально на ребро у спокійному повітрі з температурою 35°C. Допустима температура шини складає 90°C.

5.3.2 Визначити сталу температуру нагріву поверхні круглої мідної окисленої шини діаметром 20 мм, по якій тече змінний струм 1100 А частоти 50 Гц. Шина обдувається поперечним потоком повітря швидкістю 0,5 м/с з температурою 40°C.

5.3.3 Визначити тривало допустимий змінний струм частоти 50 Гц для мідної шини прямокутного поперечного перерізу  $100 \times 10$  мм<sup>2</sup>, яка ізольована шаром лакотканини товщиною 2 мм. Допустима температура нагріву шини складає 90°C.

### 5.4 Методичні вказівки

5.4.1 Для виконання завдання 5.3.1 необхідно спочатку визначити сумарний тепловий опір між поверхнею шини та оточуючим середовищем; величину тривало допустимого струму можна визначити, використовуючи формулу, що надана у підрозділі 5.2.

5.4.2 Для виконання завдання 5.3.2 необхідно спочатку визначити сумарний тепловий опір між поверхнею шини та оточуючим середовищем; для цього потрібно попередньо задати температуру поверхні шини, наприклад, задати допустиму температуру нагріву; сталу температуру нагріву шини можна визначити, використовуючи формулу, що надана у підрозділі 5.2. Остаточне значення температури поверхні шини слід визначати послідовними наближеннями.

5.4.3 Для виконання завдання 5.3.3 необхідно спочатку визначити

сумарний тепловий опір між поверхнею шини та оточуючим середовищем; для цього потрібно скласти теплову схему заміщення, яка має враховувати передачу теплової енергії, що генерується у шині, через ізоляційний шар та з зовнішньої його поверхні у навколишнє середовище; при визначенні коефіцієнтів тепловіддачі з зовнішньої поверхні ізоляційного шару в ньому у першому наближенні можна знехтувати; наступні наближення допустимого струму можна визначити за формулою, що надана у підрозділі 5.2, але при цьому слід враховувати перепад температури в ізоляційному шарі.

## **5.5 Контрольні питання**

5.5.1 У чому взагалі полягає задача теплового розрахунку?

5.5.2 Назвіть та поясніть зміст основних етапів теплового розрахунку.

5.5.3 Що являє собою стаціонарний тепловий режим апарата або окремого його елемента?

5.5.4 Що таке стала температура елемента?

5.5.5 Що таке однорідний струмопровід?

5.5.6 Чому у поперечному перерізу провідника температурне поле вважають однорідним?

## 6 ПРАКТИЧНА РОБОТА №6. АНАЛІЗ НЕСТАЦІОНАРНИХ ТА КВАЗІСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Тривалість практичного заняття – 6 годин

### 6.1 Мета роботи

Метою роботи є набуття практичних навичок розрахункового визначення нестационарного та квазістационарного теплового режиму елементів електричних апаратів з урахуванням усіх способів теплопередачі.

### 6.2 Предмет дослідження

Як вже зазначалось, будь-який елемент апарата являє собою термодинамічну систему, в якій виділяється тепла енергія, яка розсіюється у навколишнє середовище. При наявності теплової рівноваги має місце стаціонарний режим. Якщо ж тепла рівновага відсутня і тепла потужність, що виділяється даним елементом, не дорівнює потужності, яка розсіюється їм у навколишнє середовище, то має місце *нестационарний (несталий)* тепловий режим. Такий режим зазвичай спостерігається при зміні навантаження апарата. У цьому випадку температура елемента протягом часу змінюється. У загальному випадку аналіз нестационарного теплового режиму є дуже складною задачею. Отже розглянемо окремі, але дуже важливі для практики випадки.

**Нагрівання однорідного провідника:** рівняння теплового балансу для одиниці довжини провідника з поперечним перерізом  $q$ , яким тече струм  $I$ , має наступний вигляд:

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3,$$

де  $dQ_1$  – кількість тепла, що виділяється в одиниці довжини провідника за відрізок часу  $dt$ ;

$dQ_2$  – кількість тепла, що витрачається на нагрівання провідника за час  $dt$ ;

$dQ_3$  – кількість тепла, що відводиться за час  $dt$  з бічної поверхні провідника.

Складові даного рівняння визначаються такими виразами:

$$dQ_1 = \frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta) k_d}{q} dt; \quad dQ_2 = c \gamma q d\vartheta; \quad dQ_3 = \frac{\vartheta - \vartheta_0}{r_{T\Sigma}} dt,$$

де:  $\vartheta$  – температура провідника, що змінюється протягом часу;

$c$  – питома теплоємність,

$\gamma$  – щільність матеріалу; (інші параметри описані у попередній роботі).

Якщо підставити складові у рівняння теплового балансу, та поділити обидві частини рівняння на  $dt$ , отримаємо диференціальне рівняння, яке описує процес нагрівання провідника:

$$c \gamma q \frac{d\vartheta}{dt} + \left( \frac{1}{r_{T\Sigma}} - \frac{I^2 \rho_0 k_d \alpha}{q} \right) \vartheta = \frac{I^2 \rho_0 k_d}{q} + \frac{\vartheta_0}{r_{T\Sigma}}.$$

Якщо знехтувати залежністю  $r_{T\Sigma}$  від температури провідника, рішення даного рівняння при  $\vartheta(0) = \vartheta_n$  буде мати такий вигляд:

$$\vartheta = \vartheta_{ст} (1 - e^{-t/T}) + \vartheta_n e^{-t/T},$$

де  $\vartheta_{ст}$  – стала температура провідника, тобто температура, яка встановлюється на поверхні провідника при тривалому струмовому навантаженні, коли настає стаціонарний тепловий режим (її визначення надано у попередній роботі);

$\vartheta_n$  – температура провідника у початковий момент часу (при  $t = 0$ );

$T$  – постійна часу нагріву струмопроводу.

*Постійна часу нагріву* або *теплова постійна часу* є одним з важливих параметрів, який характеризує властивості струмопроводу у нестационарному режимі. Якщо знехтувати температурною зміною питомого опору, то вираз для визначення постійної часу нагріву струмопроводу буде мати наступний вигляд:

$$T = \frac{c \gamma q}{1/r_{T\Sigma}}.$$

Таким чином, постійна часу нагріву є відношенням здатності провідника сприймати тепло до його здатності розсіювати тепло.

**Квазістаціонарний тепловий режим** спостерігається у тому випадку, коли апарат, або його окремий елемент тривалий час функціонує при циклічному навантаженні. Такий режим за звичаєм називають *повторно-короткочасним*, який характеризується періодичним включенням та вимкненням апарата. При цьому, за час навантаження  $t_{\text{вкл}}$  провідник не встигає нагрітись до сталої температури, за час її відсутності  $t_{\text{вимк}}$  не встигає охолонути до температури навколишнього середовища.

Основним параметром повторно короткочасного режиму є т.з. відносна тривалість включення:

$$\text{ПВ}\% = \frac{t_{\text{вкл}}}{t_{\text{вкл}} + t_{\text{вимк}}} \cdot 100\% = \frac{t_{\text{вкл}}}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\%$$

Через певну кількість циклів після початку циклічного навантаження встановлюється такий стан, коли перевищення температури в кінці включеного стану і в кінці безструмової паузи будуть відповідно рівні. Такий режим називають *квазісталім* або *квазістаціонарним*; саме цей режим є розрахунковим, оскільки в цьому режимі досягається температурний максимум для апарату.

При проведенні теплових розрахунків у короткочасному та повторно-короткочасному режимах користуються *еквівалентними значеннями струму або потужності*, які у тривалому режимі викликають такий же нагрів, що й тривале протікання короткочасного або повторно-короткочасного струму. Їх величини визначаються наступними співвідношеннями:

$$I_{\text{екв}} = \frac{I}{k_I}; P_{\text{екв}} = \frac{P}{k_P},$$

де  $I, P$  – струм та потужність у короткочасному або повторно-короткочасному режимі, відповідно;

$k_I, k_P$  – коефіцієнт перевантаження по струму та потужності, відповідно.

Для короткочасного режиму коефіцієнти перевантаження визначаються наступними виразами:

$$k_I = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-\frac{t_{\text{КОП}}}{T}}}}; k_P = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_{\text{КОП}}}{T}}}.$$

Для повторно-короткочасного режиму:

$$k_I = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_{\text{Ц}}}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_{\text{ВКЛ}}}{T}}}}; k_P = \frac{1 - e^{-\frac{t_{\text{Ц}}}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_{\text{ВКЛ}}}{T}}}.$$

### 6.3 Завдання

6.3.1 Визначити постійну часу нагріву та побудувати криву нагріву сталеві шини прямокутного перерізу  $90 \times 4 \text{ мм}^2$ , якщо по ній протікає струм 500 А, шина розташована у спокійному повітрі, температура якого складає  $35^\circ\text{C}$ , а коефіцієнт тепловіддачі з поверхні шини –  $15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Питомий опір стали прийняти таким, що дорівнює  $12 \cdot 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

6.3.2 Визначити допустимий час навантаження мідної неізольованої шини з розмірами поперечного перерізу  $100 \times 6 \text{ мм}^2$ , якщо її початкова температура  $50^\circ\text{C}$ , а допустима –  $100^\circ\text{C}$ ; струм навантаження 5000 А; шина знаходиться у спокійному повітрі, температура якого  $35^\circ\text{C}$ ; сумарний коефіцієнт тепловіддачі з поверхні шини  $15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

6.3.3 Визначити значення коефіцієнтів по струму та потужності сталеві шини прямокутного перерізу  $100 \times 4 \text{ мм}^2$ , що нагрівається переривистим струмом 600 А через встановлені проміжки часу. Шина знаходиться у спокійному повітрі, температура якого складає  $35^\circ\text{C}$ ; коефіцієнт тепловіддачі з поверхні шини  $12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; максимальна температура в результаті протікання переривистого струму досягає  $95^\circ\text{C}$ .

6.3.4 Визначити максимальну температуру нагріву круглого пофарбованого провідника діаметром 30 мм, розташованого у спокійному повітрі з температурою  $40^\circ\text{C}$ ; по провіднику тече переривистий струм 2500 А з періодом 10 с і тривалістю включення 60%.

## 6.4 Методичні вказівки

6.4.1 Для виконання завдання 6.3.1 необхідно, окрім постійної часу  $T$ , визначити сталу температуру шини  $\vartheta_{ст}$  і скористатись кривою нагріву, що надана у загальному вигляді:

$$\vartheta = \vartheta_{ст}(1 - e^{-t/T}) + \vartheta_{п}e^{-t/T},$$

де  $\vartheta_{п}$  – початкова температура, яка у даному випадку дорівнює температурі навколишнього середовища.

6.4.2 Для виконання завдання 6.3.2 необхідно, по-перше, визначити теплову постійну часу і сталу температуру шини. Для визначення допустимого часу навантаження слід скористатись рівнянням нагріву однорідного провідника:

$$\vartheta_{доп} = \vartheta_{ст}(1 - e^{-t/T}) + \vartheta_{п}e^{-t/T}.$$

6.4.3 Для виконання завдання 6.3.3 необхідно, по-перше, визначити еквівалентний струм:

$$I_{екв} = \sqrt{\frac{qp(\vartheta_{макс} - \vartheta_0)\alpha_T}{\rho_0(1 + \alpha\vartheta_{макс})}},$$

де  $\vartheta_{макс}$  – максимальна температура нагріву шини;

$\vartheta_0$  – температура повітря;

$q, p$  – поперечний переріз та периметр шини, відповідно;

$\alpha_T$  – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні шини.

Для визначення коефіцієнту перевантаження по струму та потужності слід скористатись відповідними виразами, що надані у підрозділі 6.2.

6.4.4 Для виконання завдання 6.3.4 необхідно:

- задати початкове наближення максимальної температури провідника (наприклад, допустиму температуру нагріву);

- визначити сумарний тепловий опір з поверхні провідника з урахуванням конвекції та випромінювання;

- визначити початкове наближення еквівалентного струму провідника за наступною формулою:

$$I_{\text{екв}} = \frac{I}{\sqrt{100/\text{ПВ}\%}};$$

- визначити теплову постійну часу нагріву провідника за наступною формулою:

$$T = \frac{c\gamma q}{\frac{1}{r_{\text{т}\Sigma}} - \frac{I_{\text{екв}}^2 \rho_0 \alpha}{q}};$$

- визначити коефіцієнт перевантаження по струму та перше наближення величини еквівалентного струму;

- визначити перше наближення максимальної температури нагріву провідника за наступною формулою:

$$\vartheta_{\text{макс}} = \frac{\frac{I_{\text{екв}}^2 \rho_0}{q} + \frac{\vartheta_0}{r_{\text{т}\Sigma}}}{\frac{1}{r_{\text{т}\Sigma}} - \frac{I_{\text{екв}}^2 \rho_0 \alpha'}{q}}$$

- остаточне значення температури нагріву провідника визначити послідовними наближеннями.

## 6.5 Контрольні питання

6.5.1 В якому випадку спостерігається нестационарний (квазістаціонарний) тепловий режим і чим він характеризується?

6.5.2 Що являє собою постійна часу нагріву апарата або окремого його елемента?

6.5.3 В якому випадку спостерігається короткочасний (повторно-короткочасний) режим роботи апарата?

6.5.4 Назвіть та охарактеризуйте основні параметри, які використовують при проведенні теплових розрахунків у короткочасному та повторно-короткочасному режимах.

## 7 ПРАКТИЧНА РОБОТА №7. НАГРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ СТРУМАМИ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Тривалість практичного заняття – 4 години

### 7.1 Мета роботи

Метою роботи є набуття практичних навичок розрахункового визначення нагріву та параметрів елементів електричних апаратів в режимі протікання струмів короткого замикання.

### 7.2 Предмет дослідження

*Коротке замикання* (к.з.) є аварійним режимом для електричних апаратів та їх елементів. При виникненні к.з. спрацьовує захист і пошкоджена ділянка відключається. Таким чином, протікання струмів к.з. (величина яких у десятки разів перевищує струми нормального режиму) обмежено у часі. Тривалість протікання струму к.з., як правило, не перевищує кількох секунд, проте, слід зазначити, що теплова потужність, що генерується в елементах електричних апаратів впродовж к.з. зростає у сотні разів, в той час як тепловіддача збільшується незначно. Отже, при к.з. нагрів провідників відбувається у т.з. адіабатичному режимі. У загальному випадку, режим нагріву вважають адіабатичним, якщо час нагріву не перевищує 10% від постійної часу нагріву елемента.

*Адіабатичний нагрів* провідника має місце у тому випадку, коли віддача тепла від елемента у навколишнє середовище відсутня. За таких умов (тобто, при  $r_{\Sigma} = \infty$ ) вихідне рівняння теплового балансу для однорідного провідника без урахування температурної залежності питомого опору та питомої теплоємності від матиме наступний вигляд:

$$\frac{I^2 \rho k_d}{q} dt = c \gamma q d\tau.$$

Рішення цього рівняння при  $\tau(0) = 0$  матиме наступний вигляд:

$$\tau = \frac{I^2 \rho k_d}{c \gamma q^2} \cdot t.$$

Таким чином, при адиабатичному нагріванні температура змінюватиметься в часі лінійно. Проте, реальна крива адиабатична крива нагріву дещо відрізняється від лінійної внаслідок температурної залежності опору та теплоємності.

При проведенні теплового розрахунку нагріву однорідних провідників струмами к.з. використовується рівняння теплового балансу. Якщо величина струму к.з. не змінюється в часі, то воно має наступний вигляд:

$$j_{кз}^2 t_{кз} = A(\vartheta_к) - A(\vartheta_п),$$

де  $j_{кз}$  – щільність струму короткого замикання;

$t_{кз}$  – час короткого замикання;

$\vartheta_п$  – температура провідника на початок к.з.;

$\vartheta_к$  – температура струмоведучих частин у момент відключення к.з. , яка не повинна перевищувати допустиму величину;

$A(\vartheta)$  – крива адиабатичного нагріву, яка у даному випадку являє собою залежність температури провідника від величини діючого теплового імпульсу.

Криві адиабатичного нагріву для різних провідникових матеріалів (без урахування додаткових втрат) надані у літературі [5, 6].

Якщо ж діюча величина струму к.з. змінюється в часі  $I_{кз}(t)$ , то тепловий розрахунок суттєво ускладнюється. Існує декілька методів, що дозволять врахувати змінення величини струму к.з. у часі. Найбільшого поширення набув метод використання т.з. *фіктивного часу к.з.*  $t_{ф}$ , який являє собою відрізок часу, за який сталий струм к.з.  $I_{кз\infty}$  виділяє стільки ж тепла, скільки й струм к.з., що змінюється, за час к.з.  $t_{кз}$ , тобто:

$$\int_0^{t_{кз}} I_{кз}^2(t) dt = I_{кз\infty}^2 t_{ф}.$$

Фіктивний час к.з., у загальному випадку, визначається за наступною формулою:

$$t_{\phi} = t_{\phi,п} + t_{\phi,а}$$

де  $t_{\phi,п}$  – фіктивний час к.з., обумовлений періодичною складовою струму к.з.;

$t_{\phi,а}$  – фіктивний час к.з., обумовлений аперіодичною складовою струму к.з.;

Фіктивний час періодичної складової визначається із сімейства кривих:  $t_{\phi,п} = f(\beta'', t_{кз})$  при  $t_{кз} \leq 5$  с. [1, 2], де  $\beta''$  – відношення початкового струму к.з.  $I_{кз0}$  до його сталого значення  $I_{кз\infty}$ .

Якщо  $t_{кз} > 5$  с., то фіктивний час к.з. визначається за такою формулою:

$$t_{\phi,п} = t_{\phi,п}(5 \text{ с.}) + (t_{кз} - 5).$$

Що стосується теплової дії аперіодичної складової струму к.з., то вона суттєво проявляється лише при  $t_{кз} < 1$  с., що на практиці спостерігається дуже рідко.

### 7.3 Завдання

7.3.1 Визначити температуру алюмінієвої шини прямокутного перерізу  $40 \times 5$  мм<sup>2</sup> після протікання по неї струму 20 кА протягом 1 с. Початкова температура шини складає 0°C.

7.3.2 Визначити температуру нагріву мідної прямокутної шини з розмірами поперечного перерізу  $80 \times 10$  мм<sup>2</sup> в результаті протікання по неї протягом 8 с. струму к.з., початкове діюче значення якого 90 кА, а стало – 40 кА. Температура шини до початку к.з. складала 90°C.

7.3.3 Визначити струм десятисекундної термічної стійкості для сталевих шин прямокутного перерізу  $1000 \times 4$  мм<sup>2</sup>, якщо її початкова температура складає 60°C. Допустима температура для режиму к.з. 300°C.

### 7.4 Методичні вказівки

7.4.1 При виконанні завдання 7.3.1 слід взяти до уваги, що великий струм протікає протягом відносно невеликого відрізка часу, отже нагрівання шини буде відбуватись в адіабатичному режимі. Для визначення температури шини у цьому випадку можна скористатись кривою

адіабатичного нагріву:

$$j^2 t_{\pi} = A(\vartheta_{\text{ш}}),$$

де  $j$  – щільність струму;

$t_{\pi}$  – час протікання струму;

$\vartheta_{\text{ш}}$  – температура шини, яка визначається по кривій адіабатичного нагріву матеріалу.

7.4.2 При виконанні завдання 7.3.2 слід взяти до уваги, що діюче значення струму к.з. змінюється протягом часу, отже його тепловий імпульс можна визначити за допомогою фіктивного часу к.з.

7.4.3 При виконанні завдання 7.3.3 слід взяти до уваги, що струм термічної стійкості вважається незмінним протягом к.з., отже у цьому випадку його тепловий імпульс слід визначати за реальним часом к.з.

## 7.5 Контрольні питання

7.5.1 Що таке коротке замикання?

7.5.2 Чому при к.з. процес нагріву провідників можна вважати адіабатичним?

7.5.3 Як змінюється температура провідника при адіабатичному нагріві?

7.5.4 Що таке крива адіабатичного нагріву

7.5.5 Як змінюється діюче значення струму в процесі короткого замикання?

7.5.6 Що таке фіктивний час короткого замикання?

## ПЕРЕЛІК ДжЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Рассальський О.М. Аналіз і розрахунок теплових режимів силового електроустаткування: навчальний посібник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 146 с.
2. Близняков О. В. Thermal Behavior Analysis of Power Electric and Electronic Equipment = Аналіз теплових режимів силового електричного та електронного обладнання: навчальний посібник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – 146 с.
3. Константінов С.М. Тепломасообмін: Підручник. – К. ВПІ ВПК: «Політехніка»: Інрес. – 2005. – 304 с.
4. Лабай В.Й. Тепломасообмін: підруч. Для студ теплотехн. Спец. / В.Й. Лабай. – Львів: Тріада Плюс, 2004. – 260 с.
5. Heat transfer handbook / Edited by Adrian Bejan and Allan D. Kraus, John Wiley & Sons, Inc., 2003. – 1481 p.
6. Nellis, G. Heat transfer / Edited by Gregory Nellis, Sanford Klein, Cambridge University Press, 2009. – 1143 p.