

Міністерство освіти і науки України

**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ЯВИЩ  
В ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТАХ**

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни:

**"Основи теорії електричних апаратів"**

для студентів усіх форм навчання спеціальності

**141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**  
(освітня програма "Електричні та електронні апарати")

2018

Дослідження теплових явищ в електричних та електронних апаратах: Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Основи теорії електричних апаратів" для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (освітня програма "Електричні та електронні апарати")/ Уклали О.В. Близняков, Л.С. Скрупська – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 33 с.

Укладачі: О.В. Близняков, доцент, к.т.н.  
Л.С. Скрупська, ст. викладач

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

Відповідальний за випуск: Р.Е. Мохнач.

Ухвалено на засіданні кафедри  
“Електричні та електронні апарати”.  
Протокол № 4 від 11 березня 2018 р.

Затверджено на засіданні  
навчально-методичної комісії електро-  
технічного факультету.  
Протокол № 4 від 11 березня 2018 р.

## З М І С Т

<b>Лабораторна робота №9. Дослідження нагріву елементів електричних апаратів .....</b>	<b>4</b>
<b>9.1 Мета роботи .....</b>	<b>4</b>
<b>9.2 Предмет дослідження .....</b>	<b>4</b>
<b>9.3 Опис експериментальної установки .....</b>	<b>6</b>
<b>9.4 Завдання .....</b>	<b>7</b>
<b>9.5 Методичні вказівки .....</b>	<b>7</b>
<b>9.6 Питання для самоперевірки .....</b>	<b>11</b>
<b>Лабораторна робота №13. Дослідження охолоджувачів силових напівпровідникових приладів .....</b>	<b>12</b>
<b>13.1 Мета роботи .....</b>	<b>12</b>
<b>13.2 Предмет дослідження .....</b>	<b>12</b>
<b>13.3 Опис експериментальної установки .....</b>	<b>15</b>
<b>13.4 Завдання .....</b>	<b>17</b>
<b>13.5 Методичні вказівки .....</b>	<b>19</b>
<b>13.6 Питання для самоперевірки .....</b>	<b>21</b>
<b>Лабораторна робота № 14. Дослідження теплового режиму неоднорідного струмопроводу .....</b>	<b>21</b>
<b>14.1 Мета роботи .....</b>	<b>21</b>
<b>14.2 Предмет дослідження .....</b>	<b>22</b>
<b>14.3 Опис експериментальної установки .....</b>	<b>22</b>
<b>14.4 Завдання .....</b>	<b>25</b>
<b>14.5 Методичні вказівки .....</b>	<b>25</b>
<b>14.6 Питання для самоперевірки .....</b>	<b>27</b>
<b>Література .....</b>	<b>28</b>
<b>Додаток 1. Визначення температур за термо-ЕРС .....</b>	<b>29</b>
<b>Додаток 2. Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі прямокутних ребр.....</b>	<b>29</b>
<b>Додаток 3. Схема пристрою для вимірювання температури...33</b>	

## Лабораторна робота № 9. Дослідження нагріву елементів електричних апаратів

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

### 9.1 Мета роботи

Вивчити методи виміру температури в електричних апаратах та експериментально і теоретично визначити розподіл температури в обмотці з осердям у несталому та сталому режимах роботи.

### 9.2 Предмет дослідження.

Відомо, що експериментальні дослідження та випробування теплових режимів електричних та електронних апаратів супроводжуються вимірюванням теплових параметрів, зокрема вимірюванням температур. При цьому використовують різні методи, але найбільш поширеними є *метод термометра*, *метод термопар* та *метод опору*.

Метод термометра застосовується, головним чином для визначення температури повітря у приміщенні, у якому проводяться теплові дослідження або випробування. У деяких випадках цей метод використовують для визначення температури масивних деталей апаратів, але при цьому потрібно забезпечити його надійний тепловий контакт з деталлю. Треба також враховувати, що сам термометр за рахунок маси може змінити тепловий режим деталі, що досліджується. Отже, поверхня охолодження деталі та її маса повинні бути досить великими у порівнянні з термометром.

Для зменшення похибки при використанні термометра рекомендуються такі засоби:

- кулька термометра повинна бути обгорнута фольгою і надійно прижата до поверхні, температура якої вимірюється;
- ртутний термометр неможна застосовувати при наявності змінного магнітного поля в точці виміру (ртуть додатково нагрівається вихровими струмами).

Метод термопар широко застосовується, оскільки дає можливість дистанційного виміру і запису температури на спеціальному реєструвальному приладі, наприклад, на осцилографі, комп'ютері.

Переважають використовуються термопари таких видів: мідь-константан, хромель-копель, хромель-алюмель.

При невеликих температурах (до 100...120°C) можна вважати, що термо-ЕРС пропорційна різниці температур нагрітих і холодних кінців

термопари.

Враховуючи те, що опори мілівольтметра і термопари порівнянні, покази приладу будуть менші термо-ЕРС термопари:

$$e_{\Pi} = e_{\tau} \frac{r_{\Pi}}{r_{\tau} + r_{\Pi}} = \frac{\alpha \cdot r_{\Pi}}{r_{\tau} + r_{\Pi}} \tau$$

де  $r_{\tau}$  – опір термопари;

$r_{\Pi}$  – опір приладу.

Щоб отримати мінімальну похибку необхідно виконувати такі умови:

а) термопара повинна бути надійно придавлена до випробуваної деталі, якщо є можливість, то краще її запаяти, приварити чи в чеканити у поверхню; в деяких випадках термопара припаюється до мідної пластинки, яка придавлюється до дослідженої поверхні. Для зменшення відбору теплоти термопарою бажано, щоб на протязі 40...50 мм провідники термопари стикалися з поверхнею, температура якої вимірюється;

б) щоб уникнути появи наведеної ЄДС провідники від термопари повинні бути звиті і максимально віддалені від сфери дії магнітних полів;

в) для одержання надійних результатів термопари та вимірювальний прилад повинні бути попередньо відградуйовані при умовах, аналогічних досліджу;

г) для точних вимірів бажано використовувати компенсаційні методи виміру, або прилади з великим внутрішнім опором.

Метод опорів знайшов використання при випробуваннях котушок і для виміру в мостових схемах. Опір лінійно зростає з температурою [1–4], тому

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_0(1 + \alpha \vartheta_1)}{R_0(1 + \alpha \vartheta_2)} = \frac{1 + \alpha \vartheta_1}{1 + \alpha \vartheta_2},$$

де  $R_0$  – опір при  $0^{\circ}\text{C}$ .

Спочатку вимірюється  $R_1$  при відсутності струму. Температура елемента апарату повинна дорівнювати температурі навколишнього середовища. Тоді визначається  $R_2$  після досягнення температурою усталеного значення.

Розв'язавши рівняння відносно  $\vartheta_2$ , одержимо:

$$\vartheta_2 = \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{R_2}{R_1} (1 + \alpha \vartheta_1) - 1 \right],$$

але для провідників з міді  $1/\alpha = 234,5$ .

Тоді

$$\vartheta_2 = \frac{R_2}{R_1} (\vartheta_1 + 234,5) - 234,5. \quad (9.1)$$

### 9.3 Опис експериментальної установки.

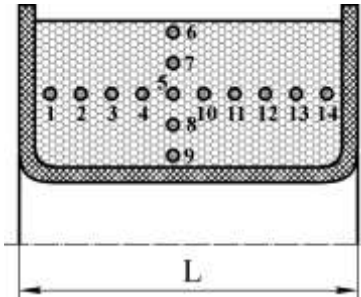


Рисунок 9.1 – Ескіз перерізу котушки з розташуванням термопар.

Перевищення температур у лабораторній роботі визначається методом термопар. Термопари розташовані в обмотці рівномірно вздовж радіусу та осі, що дозволяє одержати розподіл температури по радіусу котушки і вздовж її осі, рис. 9.1.

Електрична схема лабораторної установки надана на рис. 9.2. Схема включається автоматом SF. Всі термопари, що розташовані у котушці, виводяться на перемикач S2. Термо-ЕРС вимірюється мілівольтметром PV.

Необхідне значення струму у котушці або реостаті встановлюється за допомогою автотрансформатора Т. За допомогою перемикача S1 здійснюється підключення котушки до джерела живлення (положення 1) або резистора (положення 2).

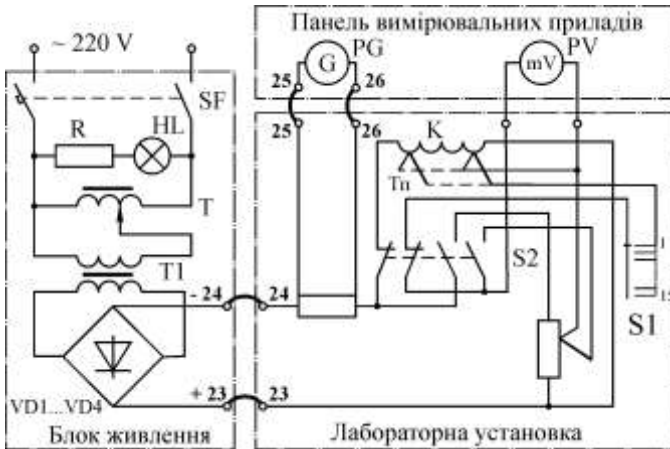


Рисунок 9.2 – Електрична схема установки.

## 9.4 Завдання

9.4.1 Зняти часові діаграми перевищення температури котушки для точок, що знаходяться на зовнішній поверхні, на внутрішній, що дотикається до осердя, та у центральній частині перерізу.

9.4.2 У сталому режимі нагріву визначити розподіл підвищення температури по радіусу котушки і вздовж її осі, а також середнє перевищення температури котушки.

9.4.3 Визначити сталє перевищення температури на поверхні котушки, а також її постійну часу нагріву по частині експериментальної кривої нагріву.

9.4.4 На основі експериментальних даних обчислити коефіцієнти тепловіддачі з внутрішньої і зовнішньої поверхні і коефіцієнт теплопровідності котушки.

9.4.5 Зняти часові діаграми перевищення температури реостату з повітряним охолодженням при тривалому і повторно-короткочасному режимах роботи.

9.4.6 Визначити основні величини, що характеризують процес нагріву реостату.

9.4.7. Визначити коефіцієнт перевантаження для реостата з повітряним охолодженням при повторно-короткочасному режимі роботи.

## 9.5 Методичні вказівки

9.5.1. Експериментальна частина роботи щодо нагріву обмотки здійснюється у такому порядку:

а) підключити лабораторну установку до джерела живлення (з'єднати короткими провідниками клеми 23-23 і 24-24);

б) перемикач S1 встановити у положення 1 і увімкнути автомат SF;

в) за допомогою автотрансформатора Т встановити струм 4 А і підтримувати його незмінним впродовж експерименту;

г) відлік показів термопар 5–9 здійснюються через кожні 5 хв. до сталої температури, результати вимірів занести в табл. 9.1;

д) коли температура котушки досягне сталої, записати покази всіх 14 термопар, дані занести до таблиці 9.2.

е) вимкнути автомат SF і вивести автотрансформатор у нульове положення.

9.5.2. Експериментальна частина роботи щодо нагріву резистору здійснюється у такому порядку:

Таблиця 9.1 – Експериментальні дані несталого режиму котушки.

Час	Дані експерименту	Номери термопар				
		5	6	7	8	9
5 хвилин	$U$ , мВ					
	$\vartheta$ , °С					
10 хвилин	$U$ , мВ					
	$\vartheta$ , °С					
. . .						
130 хвилин	$U$ , мВ					
	$\vartheta$ , °С					

Таблиця 9.2. Експериментальні дані сталої температури котушки.

Дані експерименту	Номери термопар													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$U$ , мВ														
$\vartheta$ , °С														

- а) перемикач S1 встановити у положення 2 і увімкнути автомат SF;  
 б) за допомогою автотрансформатора Т встановити струм 2,5 А і підтримувати його незмінним впродовж експерименту;  
 в) відлік показів термопар здійснюється через кожні 3 хв. до сталої температури, результати вимірів занести в табл. 9.3;  
 г) коли температура резистору досягне сталої, перевести його у повторно-короткочасний режим при тривалості паузи 8 хв і тривалості робочого періоду 6 хв;  
 д) нагрів проводиться до наступу квазісталого режиму; дані досліді занести до табл. 9.3.

Таблиця 9.3 – Експериментальні дані нагріву резистора.

Час, хвилини	0	3	. . .	130
$U$ , мВ				
$\vartheta$ , °С				

- е) вимкнути автомат SF і вивести автотрансформатор у нульове положення.

9.5.3. Обробка результатів експерименту, зокрема визначення те-



мператур за виміряними термо-ЕРС здійснюється за методикою, яка на- дана у додатку 2.

9.5.4. Постійна часу нагріву визначається графічним будованням кривої  $\tau_{\text{сеп}}(t)$ , рис. 9.3а. Для цього треба провести дотичну до будь-якої точки кривої нагріву, потім провести асимптоту до кривої нагріву паралельно осі абсцис. Проекція на вісь абсцис відрізка  $cd$ , вкладеного між точкою дотику  $c$  і точкою  $d$  перетину дотичної з асимптотою, визначає постійну часу нагріву. Постійну часу можна визначити також як час при якому перевищення температури складає приблизно дві третини від сталого перевищення.

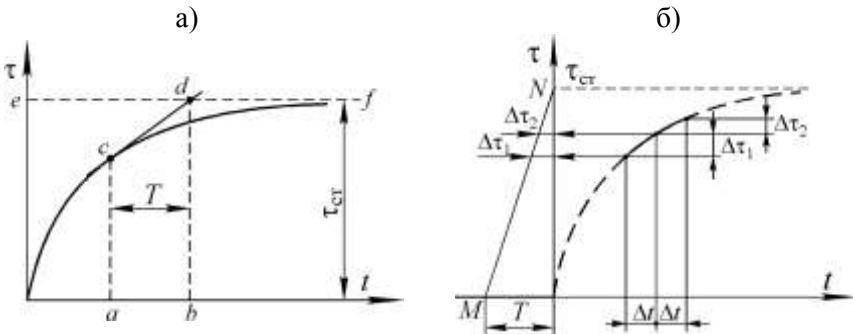


Рисунок 9.3 – Графічне визначення (а) постійної часу нагріву та (б) сталого перевищення температури

9.5.5. Визначення сталого перевищення температури посереднім шляхом показано на рис. 9.3б. Частина кривої  $\tau_{\text{сеп}}(t)$  у місті різкого вигину розбивається на декілька ділянок з однаковими  $\Delta t$ , через кінці яких проводяться ординати. Будовання виконується в лівій частині графіка. З'єднанням кінців відкладених відрізків, одержують пряму  $MN$ , яка уявляє собою залежність  $d\tau/dt = f(\tau)$ . Для  $\tau = \tau_{\text{cr}}$   $d\tau/dt = 0$ , тому перетином прямої  $MN$  з віссю ординат визначається відрізок, який дорівнює сталому перевищенню температури.

9.5.6. Стале перевищення температури може бути визначено також аналітичним методом за наступною формулою [1–3]:

$$\tau_{\text{cr}} = \frac{\tau_2^2 - \tau_1 \cdot \tau_3}{2\tau_2 - \tau_1 - \tau_3},$$

де  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  – перевищення температур, що виміряні через проміжки часу  $\Delta t$ .

9.5.7. Значення коефіцієнтів тепловіддачі з внутрішньої та зовнішньої поверхонь визначаються за наступними формулами:

$$\alpha_{\tau_1} = \frac{P_1}{2\pi r_1 l (\vartheta_1 - \vartheta_0)}; \quad \alpha_{\tau_2} = \frac{P_2}{2\pi r_2 l (\vartheta_2 - \vartheta_0)}$$

де  $P_1$  і  $P_2$  – потужність, яка передається котушкою через, відповідно, внутрішню і зовнішню циліндричні поверхні;

$\vartheta_1$  і  $\vartheta_2$  – температура, відповідно, внутрішньої і зовнішньої поверхні;

Для котушки з теплоізолюваним торцем потужності можна визначити за такими рівняннями:

$$P_1 = P_0 \frac{r_0^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}; \quad P_2 = P_0 \frac{r_2^2 - r_0^2}{r_2^2 - r_1^2},$$

де  $P_0$  – потужність, що споживається котушкою при сталому нагріві, Вт;

$r_0$  – радіус, що відповідає максимальній температурі нагріву.

9.5.8. Коефіцієнт теплопровідності обмотки визначається за формулою Аронова [1]:

$$\lambda = j \cdot \rho \cdot \left( r_1^2 - r_2^2 + 2r_0^2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right),$$

де  $j$  – щільність (густина) струму, А/м<sup>2</sup>;

$\rho$  – питомий електричний опір матеріалу провідника при сталій температурі нагріву котушки, Ом·м.

9.5.7. Криві  $\tau = f(t)$  побудувати для зовнішньої, внутрішньої поверхонь котушки й центральної частини перерізу (термопар 6,7,5,8,9; див. рис. 9.1).

9.5.9. Середнє перевищення температури котушки визначити по формулі

$$\tau_{\text{сер}} = \frac{\tau_{\text{max}} + \tau_1}{2},$$

де  $\tau_{\text{max}}$  – максимальне перевищення температури;

$\tau_1$  – перевищення температури зовнішньої поверхні котушки (за показами термопар 6).

9.5.10. Побудувати криву розподілу перевищення температури обмотки у радіальному напрямку. По кривій визначити радіус  $r_m$ , який відповідає максимальному перевищенню температури.

9.5.11. Побудувати криву розподілу температури у осьовому напрямку.

9.5.12. По одержаним значенням сталої температури, постійної часу нагріву поряд з дослідною кривою необхідно побудувати пунктиром розрахункову криву перевищення температури і порівняти з дослідними результатами.

9.5.13. Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

- а) завдання і вихідні дана для розрахунку;
- б) принципову схему випробувань;
- в) графіки дослідницьких залежностей;
- г) розрахунки й розрахункові формули;
- д) аналіз одержаних залежностей;

## **9.6 Питання для самоперевірки**

9.6.1. Основні джерела теплоти в електричних апаратах.

9.6.2. Методи виміру теплоти.

9.6.3. Фізичний зміст коефіцієнта тепловіддачі з поверхні нагрітого тіла.

9.6.4. Основне визначення і фізичний зміст постійної часу нагріву.

9.6.5. Приблизно якої частки від усталеної температури досягне тіло через час нагріву, рівний постійної часу нагріву?

9.6.6. Поняття усталеного перевищення температури.

9.6.7. Основні режими роботи електричних апаратів.

9.6.8. Джерела теплоти у котушці постійного і змінного струму з феромагнітним осердям.

9.6.9. Поняття коефіцієнту теплопровідності тіла заміщення.

9.6.10. У якому випадку найбільш нагрітий шар у котушці знаходиться на її внутрішній поверхні?

9.6.11. В якому випадку найбільш нагрітий шар у котушці знаходиться на її зовнішній поверхні?

9.6.12. Визначення коефіцієнта перевантаження по потужності і струму при короткочасному і повторно-короткочасному режимі.

9.6.13. Що таке відносна тривалість вмикання?

9.6.14. Що таке фіктивний час нагріву при короткочасному режимі нагріву?

## Лабораторна робота №13 Дослідження охолоджувачів силових напівпровідникових приладів

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

### 13.1 Мета роботи

Експериментально визначити ефективність використання радіаторів для забезпечення теплового режиму силових напівпровідникових приладів.

### 13.2 Предмет дослідження.

Нормальне функціонування, а отже і навантажувальна здатність, силового напівпровідникового приладу (СНП) цілком залежить від робочої температури його  $p-n$  структури, для якої встановлені досить жорсткі рамки. Відомо, що СНП, зокрема його  $p-n$  структура, є концентрованим джерелом тепла. У цьому випадку задача розсіяння (або відвід) великої кількості теплової енергії у навколишнє середовище є досить складною. Вона вирішується, головним чином, шляхом використання різноманітних охолоджувачів або систем охолодження.

Отже, у загальному випадку, тепловий стан СНП може бути визначений за допомогою теплової схеми заміщення, яка надана на рис. 13.1.

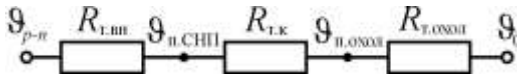


Рисунок 13.1 – Теплова схема заміщення СНП з одностороннім охолодженням

У схемі заміщення використовуються такі позначення:

$\vartheta_{p-n}$  – температура  $p-n$  структури СНП;

$\vartheta_{п.СНП}$  і  $\vartheta_{п.охол}$  – температура контактуючих поверхонь СНП і охолоджувача, відповідно;

$\vartheta_0$  – температура навколишнього середовища;

$R_{т.вн}$  – внутрішній тепловий опір СНП (між його  $p-n$  структурою та поверхнею, що контактує з охолоджувачем);

$R_{т.к}$  – контактний тепловий опір (між контактною поверхнею СНП і охолоджувача);

$R_{т.охол}$  – тепловий опір охолоджувача (між його контактною поверхнею і навколишнім середовищем).

Відповідно до схеми заміщення, теплова потужність, що відводиться охолоджувачем у навколишнє середовище буде визначатись наступним виразом:

$$P_{\text{від}} = \frac{q_{\text{п.охол}} - q_0}{R_{\text{т.охол}}}. \quad (13.1)$$

Отже, для отримання високих значень теплового потоку при однаковій різниці температур необхідно знижувати тепловий опір охолоджувача, який у загальному випадку може бути визначений за наступною формулою:

$$R_{\text{т.охол}} = \frac{1}{\alpha_{\text{т}} S_{\text{охол}}}, \quad (13.2)$$

де  $S_{\text{охол}}$  – площа поверхні, що охолоджується;  
 $\alpha_{\text{т}}$  – коефіцієнт тепловіддачі;

Таким чином, зниження величини теплового опору охолоджувача може бути здійснено за рахунок підвищення коефіцієнту тепловіддачі або нарощення поверхні тепловіддачі.

Підвищення коефіцієнту тепловіддачі може здійснюватися наступними шляхами. По-перше, це використання ефективного охолоджуючого середовища (наприклад, рідинного замість повітряного), а також підвищення швидкості його циркуляції (тобто використання примусової конвекції та турбулізації потоку охолоджуючого середовища). При цьому слід зазначити, що ці заходи потребують установки додаткових пристроїв (насос, вентилятор, трубопроводи, клапани, розширювальний бачок і т.п.), що часто призводить до значного зростання масогабаритних показників, ускладнення конструкції обладнання, а також значного збільшення витрат потужності на переміщення холодоносія у системі. По-друге, це застосування *випарного охолодження* (тобто відведення теплової енергії при зміні агрегатного стану холодоносія), яке дозволяє істотно збільшити коефіцієнт тепловіддачі у порівнянні з рідинним (в тому числі примусовим) охолодженням. Проте, ефективність застосування випарного охолодження для охолодження СНП ще не доведена [6].

Отже, зниження теплового опору охолоджувача тільки за рахунок підвищення коефіцієнта тепловіддачі не завжди є доцільним. Досить ефективним методом досягнення зазначеної мети є збільшення (розвиток) теплообмінної поверхні шляхом оребрення (застосування на

ній ребр або шипів). Пристрої або деталі, що мають розвинуту (оребрену) поверхню за звичаєм називають *радіаторами*.

Звичайно, що використання радіаторів не веде до пропорційного зростання теплообмінних властивостей радіатора внаслідок нерівномірного розподілу температури по висоті ребра. Як показує практика, максимальна температура спостерігається біля основи ребра, тобто поверхні радіатора, на якій розташовуються ребра. Тому, для оцінки ефективності використання розвинутих (оребrenих) поверхонь в практиці розрахунку та конструювання радіаторів часто використовують поняття *ефективності ребра* або *оребrenня*. Її за звичаєм визначають як відношення теплової енергії, що розсіюється оребреною поверхнею до т.з. *ідеальної енергії*. Ідеальна енергія у даному випадку визначається як енергія, що розсіюється оребреною поверхнею за умови рівномірного розподілу температури основи по всій поверхні ребр. Ефективність ребра визначається за наступною формулою [6]:

$$\eta = \frac{\text{th}bl}{bl}, \quad (13.3)$$

де  $l$  – висота ребра;

$b$  – параметр ребра, що визначається за наступною формулою:

$$b = \sqrt{\frac{\alpha_r p}{\lambda S}}, \quad (13.4)$$

де  $\alpha_r$  – коефіцієнт тепловіддачі с поверхні ребр, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$S$ ,  $p$  – поперечний переріз ребра радіатора у напрямку тепловіддачі та його периметр, відповідно, м<sup>2</sup>;

$\lambda$  – теплопровідність матеріалу радіатора, Вт/(м·К).

Основним параметром, який характеризує теплообмінні властивості радіатора є його тепловий опір або теплова провідність. Вираз для теплового опору ребра прямокутного перерізу ширини  $h$ , яка набагато перевищує її товщину  $\delta$  (тобто  $h \gg \delta$ ) має наступний вигляд:

$$R_{\text{th}} = \frac{1}{h\sqrt{2\delta\lambda\alpha_r} \text{th}\left(l\sqrt{\frac{2\alpha_r}{\lambda\delta}}\right)}. \quad (13.5)$$

Отже, сумарна теплова провідність радіатора за таких умов буде визначатись наступним виразом:

$$G_{\tau\Sigma} = G_{\text{нр}} + Nh\sqrt{2\delta\lambda\alpha_{\tau}} \cdot \text{th}\left(l\sqrt{\frac{2\alpha_{\tau}}{\lambda\delta}}\right), \quad (13.6)$$

де  $G_{\text{нр}}$  – теплова провідність частини радіатора, де ребра відсутні; якщо вона не відводить тепло, її не потрібно враховувати;

$N$  – кількість ребр радіатора;

Для характеристики теплообмінних властивостей радіатора використовують також наступні параметри:

- $\alpha_{\text{еф}}$  – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, який визначається за умови заміни реальної поверхні з ребрами охолодження гладкою, яка дорівнює площі основи охолоджувача, Вт/(м<sup>2</sup>·К); за величиною  $\alpha_{\text{еф}}$  можна оцінити ефективність радіаторів, що розробляються або обираються для охолодження СНП.

- $\vartheta_s$  – середнє поверхнева температура основи, °С;

- $A$  – площа основи радіатора, на якому розташовані ребра, м<sup>2</sup>;

- $\Phi$  – тепловий потік, що розсіюється, Вт.

Зв'язок між параметрами радіатора визначається такими виразами:

$$G_{\tau\Sigma} = R_{\square\tau\Sigma}^{-1} = \alpha_{\text{еф}} \cdot A; \quad (13.7)$$

$$\Phi = G_{\tau\Sigma} (\vartheta_s - \vartheta_0) = \frac{\vartheta_s - \vartheta_0}{R_{\tau\Sigma}} = \alpha_{\text{еф}} A (\vartheta_s - \vartheta_0). \quad (13.8)$$

Якщо ребра розташовані на прямокутній основі зі сторонами  $L_1$  і  $L_2$

$$A = L_1 \cdot L_2,$$

на боковій поверхні циліндра діаметром  $D$  і довжиною  $L$

$$A = \pi DL$$

на круглій основі діаметром  $D$

$$A = \frac{\pi D^2}{4}.$$

### 13.3 Опис експериментальної установки

В лабораторній роботі досліджуються три радіатори з ребрами прямокутної форми, на яких встановлюються нагрівачі, які імітують силові напівпровідникові прилади. Зовнішній вигляд радіаторів з нагрівачами надано на рисунку 13.2. На ньому також надані точки для визначення температур: **1** – зовнішньої поверхні нагрівача; **2** та **3** – контактних поверхонь нагрівача та радіатора, відповідно; **4** – основи радіатора.

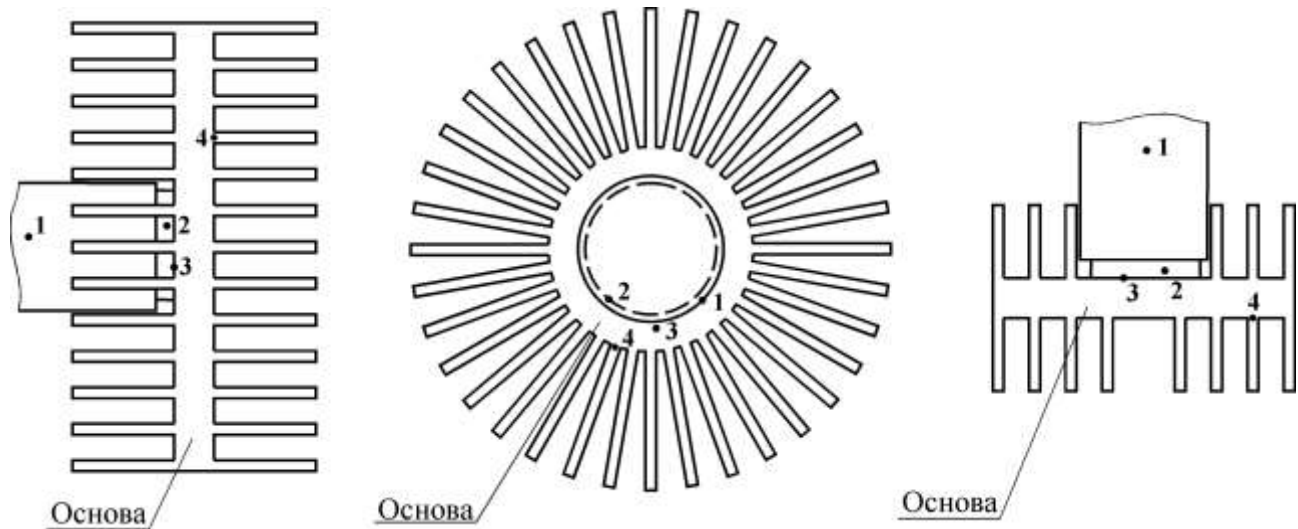


Рисунок 13.2 – Зовнішній вигляд досліджуваних радіаторів (цифрами 1–4 позначені точки для визначення температур)



Принципова схеми установки наведена на рис. 13.3. Установка передбачає можливість регулювання потужності втрат у кожному нагрівачеві U1, U2 та U3. Включення нагрівачів здійснюється за допомогою трипозиційних перемикачів S1–S3. У положенні "Контроль" за допомогою автотрансформатора Т за показаннями амперметра PA2 і вольтметра PV1 встановлюється задана потужність відповідного нагрівача. Більш ретельне налаштування нагрівача на задану потужність здійснюється резисторами R1–R3. Потім перемикач встановлюється у нейтральне положення, яке відповідає відключеному положенню відповідного нагрівача. Аналогічні операції здійснюються з іншими нагрівачами.

***УВАГА! У положенні «Контроль» повинен знаходитись тільки один перемикач, оскільки межі вимірювання амперметра PA2 розраховані на навантаження тільки одного нагрівача.***

Дослідження теплових режимів радіаторів відповідно завдання здійснюється у робочому положенні нагрівачів. Для цього перемикачі S1–S3 встановлюються у положення "Пуск" у будь-якій комбінації. При цьому амперметр PA1 показує сумарну величину струму усіх включених нагрівачів і дозволяє візуально контролювати стабільність струмового навантаження.

Для вимірювання температури охолоджувача та нагрівача використовується контактний метод, температурний датчик притискується до досліджуваної точки. У якості датчика температури використовується напівпровідниковий терморезистор LM35, який має вигляд термощупа, підключений до цифрового вольтметра. Схема підключення температурного датчика надана у додатку 3.

### **13.4 Завдання.**

13.4.1 Ознайомитись з основними видами систем охолодження та типами охолоджувачів (радіаторів), що використовуються для силових напівпровідникових приладів.

13.4.2 Експериментально визначити криву нагріву і постійну часу блоків нагрівач–радіатор, розташованих на лабораторному стенді.

13.4.3 Експериментально визначити розподіл температури блоків нагрівач–радіатор, розташованих на лабораторному стенді, у сталому режимі і побудувати його графік.

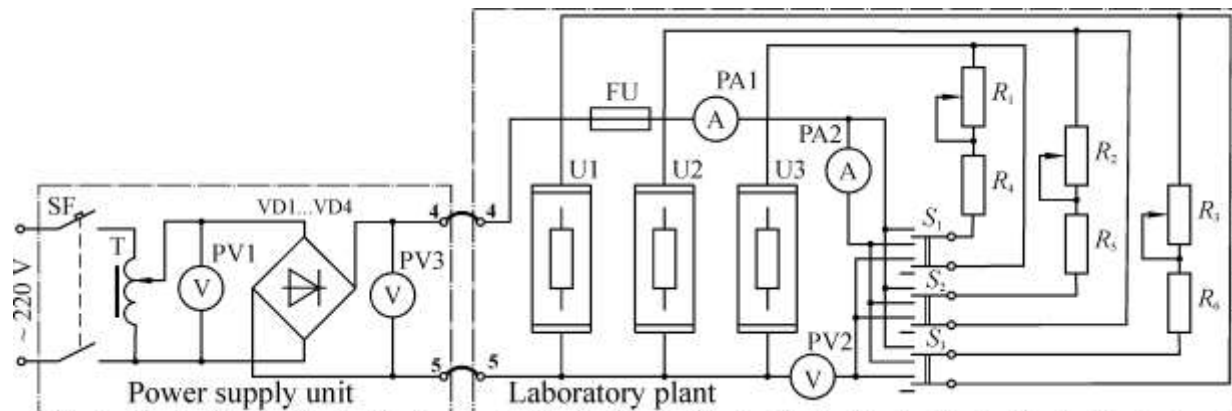


Рисунок 13.3 – Принципова схема установки.

13.4.4 На основі експериментальних даних та розрахунковим шляхом визначити основні параметри радіаторів, розташованих на лабораторному стенді: тепловий опір, ефективний коефіцієнт тепловіддачі та ефективність оребрення.

13.4.5 Порівняти результати експерименту та розрахунку.

### 13.5 Методичні вказівки

13.5.1 Для виконання пунктів 13.4.1 треба, по перш за все, вивчити теоретичний матеріал й звернути увагу на основні фактори, що впливають на працездатність системи прилад–охолоджувач. При цьому не слід обмежуватись тільки системами природного повітряного охолодження, а й звернути увагу на більш ефективні системи охолодження СНП [6].

13.5.2 Для виконання теоретичних розрахунків необхідно користуватись співвідношеннями, що надані у підрозділі 13.2 [5, 6]. Коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулами, які надані у додатку 2. Усі необхідні геометричні розміри радіаторів та нагрівачів визначаються шляхом вимірювання безпосередньо на експериментальній установці. Радіатори, що розташовані на лабораторному стенді, виготовлені з алюмінієвого сплаву АД-31 з питома теплопровідністю  $\lambda = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

13.5.3 Експериментальна частина роботи виконується у такому порядку:

а) підготувати температурний датчик до роботи; для цього необхідно включити цифровий вольтметр і встановити діапазон вимірювання 2 вольт (2000 мВ);

б) увімкнути автоматичний вимикач SF та за допомогою автотрансформатора Т встановити напругу задану викладачем напругу (за показаннями вольтметра PV1)

в) увімкнути під навантаження один з нагрівачів; для цього потрібно відповідний перемикач S1, S2 або S3 встановити у положення «Контроль»; при цьому інші нагрівачі повинні бути відімкнуті;

г) за допомогою резистора R1, R2 або R3 встановити на підключеному нагрівачі задану потужність (за показаннями амперметра PA2) і відімкнути його;

д) аналогічні операції здійснити з іншими нагрівачами;

е) за вказівкою викладача перемикачі S1–S3 встановити у положення «Раб» фіксуючі початок нагріву досліджуваних блоків за допомогою таймеру;

є) використовуючи щуп з температурним датчиком, зняти часову

діаграму температури для точок 1–4 блоку нагрівач–радіатор, що вказані на рис. 13.2; дані занести до таблиці 13.1 (процес нагріву можна вважати сталим, якщо послідовні вимірювання через 5 хв. відрізняються не більш як на  $1^{\circ}\text{C}$ );

**Увага!** Для одержання точних вимірювань термоцуп потрібно держати у досліджуваній точці до одержання стійкого значення температури (приблизно 25–30 с)

Таблиця 13.1 – Експериментальні дані часової діаграми нагріву блоку нагрівач–радіатор,  $^{\circ}\text{C}$

Час	Температури блоку нагрівач–радіатор			
	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4
5 хвилин				
10 хвилин				
15 хвилин				
...				

ж) після досягнення сталого режиму визначити розподіл температури радіатора за вказівкою викладача; дані занести до таблиці;

з) експериментальне значення середньо поверхневої температури визначається як середнє арифметичне значення декількох температур, що вимірюються у різних точках основи охолоджувача;

і) експериментальне значення теплового опору радіаторів визначити за формулою (13.1), в якій теплова потужність, що відводиться радіатором  $P_{\text{від}}$ , це тепловий потік що проходить через його контактну поверхню з нагрівачем; вона визначається як різниця:

$$P_{\text{від}} = P_{\text{н.вид}} - P_{\text{н.роз}},$$

де  $P_{\text{н.вид}}$  – теплова потужність, що виділяється у нагрівачі;

$P_{\text{н.роз}}$  – теплова потужність, що розсіюється безпосередньо через поверхню нагрівача, що не контактує з радіатором; відповідно до закону теплопередачі Ньютона, вона може бути визначена за наступною формулою:

$$P_{\text{н.роз}} = \alpha_{\text{т.нагр}} S_{\text{н.охол}} (\vartheta_{\text{нагр}} - \vartheta_0),$$

де  $\alpha_{\text{т.нагр}}$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі з поверхні нагрівача;  $S_{\text{н.охол}}$  – площа поверхні нагрівача, що не контактує з радіатором;

$\vartheta_{\text{нагр}}$  – температура на поверхні нагрівача; при розрахунках використовують експериментальне значення сталої температури у точці 1.

13.5.6 Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

- а) найменування та мету роботи;
- б) ескізи блоків з необхідними розмірами ;
- в) розрахунки потужностей нагрівачів;
- г) таблиці експериментальних залежностей і відповідні графіки;
- д) порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних значень основних показників радіаторів відповідно до завдання.
- е) висновки з роботи.

### **13.6 Питання для самоперевірки**

13.6.1 Які фактори впливають на спроможність тепловіддачі радіатора?

13.6.2 Яким чином можна зменшити тепловий опір контакту між вентиляем та охолоджувачем?

13.6.3 Що таке ефективність ребра і від чого вона залежить?

13.6.4 Від чого залежить тепловий опір охолоджувача?

13.6.5 Як впливає колір радіатора на його спроможність тепловіддачі?

13.6.6 Як обрати радіатор для природного повітряного охолодження?

13.6.7 Чому ефективний коефіцієнт тепловіддачі є критерієм оцінки ефективності радіатора?

13.6.8 Які типи конструкцій радіаторів використовуються для природного охолодження напівпровідникових пристроїв?

13.6.9 Як впливає потужність, що виділяється у приладі і розсіюється радіатором на температуру корпусу приладу?

## **Лабораторна робота №14.**

### **Дослідження теплового режиму неоднорідного струмопроводу**

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

#### **14.1 Мета роботи**

Оволодіти теоретичними і експериментальними методами дослідження теплового стану струмоведучих систем електричних апаратів у різних режимах роботи.

### **14.2 Предмет дослідження**

Незалежно від конкретного призначення однією з функцій електричних апаратів є проведення електричного струму при номінальному режимі (тривалому, короткочасному, повторно-короткочасному). Протікання номінального струму у струмопровідних частинах апарата викликає їх нагрів, а також нагрів поряд розташованих елементів. Під дією електромагнітних полів струми можуть протікати також і у неструмопровідних частинах апарата, також викликаючи їх нагрів.

Відомо, що температури нагріву струмопровідних систем електричних апаратів обмежуються діючими стандартами та технічними умовами [10, 11 та інші]. Тому визначення температур нагріву струмопровідних систем і взагалі теплового режиму апарата є дуже важливою задачею, що вирішується під час їх проектування і реконструкції.

При тривалому протіканні струму навантаження струмопровідні системи частіш усього мають неоднорідне температурне поле внаслідок впливу конструкційних, теплофізичних чинників, контактних з'єднань та умов охолодження.

Наприклад, струмопровідний контур комутаційних апаратів, як мінімум, містить: декілька провідників, які можуть відрізнитись геометричною конфігурацією, матеріалом, умовами тепловіддачі; контакти нерознімні і контакти комутації. Безконтактні комутаційні апарати містять додатково силові напівпровідникові прилади, які працюють під навантаженням у тривалому режимі.

Необхідно відзначити, що теплові розрахунки навіть простих, однорідних за структурою струмопровідних систем апаратів достатньо складні, що не дозволяє з задовільною точністю визначати на стадії проектування температури окремих елементів і взагалі тепловий режим апарата з урахуванням усіх факторів. За цих обставин, експериментальне визначення теплового режиму є найбільш об'єктивним і точним.

### **14.3 Опис експериментальної установки.**

На стенді для експериментальних досліджень установлені 6 варіантів струмопроводів, рис. 14.1.

Для вимірювання температури струмопроводу, як і у попередній лабораторній роботі, використовується температурний датчик LM35, підключений до цифрового вольтметра (див. додаток 3).

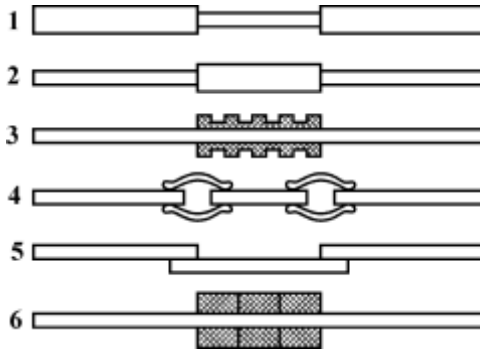


Рисунок 14.1 – Варіанти струмопроводів.

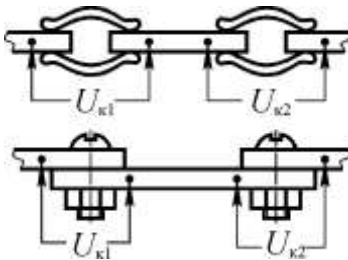


Рисунок 14.2 – Схема вимірювання падіння напруги на контактах.

Вимірювання падіння напруги на контактах струмопроводів здійснюється цифровим вольтметром. З цією метою може бути використано будь-який вольтметр постійного струму з високим внутрішнім опором (не менше 100 кОм). До клем приладу необхідно підключити провідники з щупами на кінцях. Щупи під час вимірювання слід розташовувати поводитись поблизу контакту відповідно до рис. 14.2.

Нагрів струмопроводів здійснюється постійним струмом, схема їх підключення надана на рис. 14.3. Під навантаження  $R_n$  може вмикається від одного до шести послідовно з'єднаних струмопроводів.

**УВАГА! Якщо розрахункове струмове навантаження струмопроводів різне, то їх дослідження потрібно виконувати роздільно. Підключення струмопроводів до досліджуваного контуру здійснюється болтовим з'єднанням.**

Вмикання установки під навантаження здійснюється автоматичним вимикачем SF, загального для усієї лабораторії, і магнітного пускача КМ натисненням кнопки SB1 (Пуск).

Регулювання струму здійснюється автотрансформатором  $T_2$ . Величина струму визначається по показанням амперметра РА. При збільшенні струму більш ніж 100 А спрацьовує струмове реле КА і його контакт розмикання вимикає котушку магнітного пускача КМ.

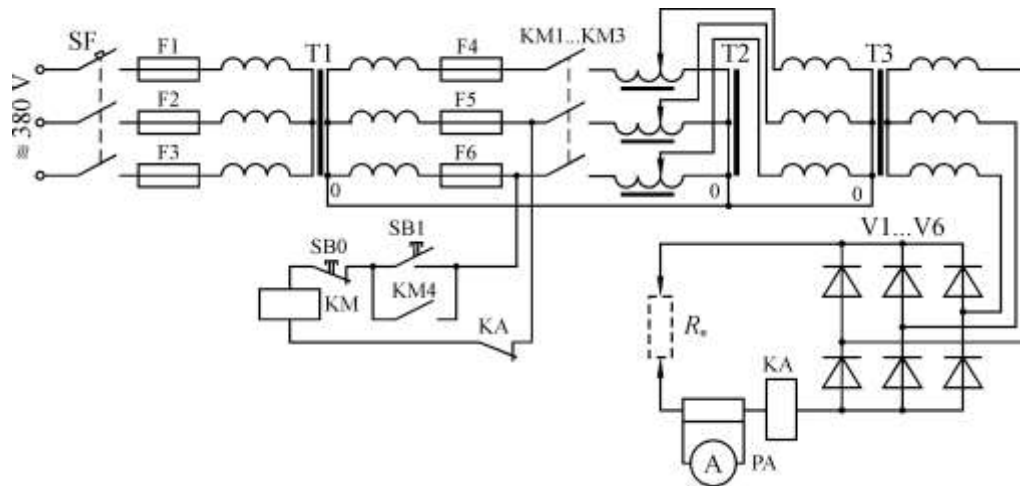


Рисунок 14.3 – Електрична схема підключення струмопроводів



## **14.4 Завдання**

14.4.1 Визначити допустиме струмове навантаження струмопроводу (варіант визначається за вказівкою викладача).

14.4.2 Провести перевірний розрахунок струмопроводу, встановленого на стенді, у сталому режимі.

14.4.3 Експериментально визначити час виходу до сталого режиму і постійну часу нагріву струмопроводу; побудувати часову діаграму нагріву.

14.4.4 Експериментально визначити розподіл температури по довжині струмопроводу, а також температури на кінцях струмопроводу та потужність втрат на контактних з'єднаннях у сталому режимі.

14.4.5 Провести порівняльний аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

14.4.6 Зробити висновки з роботи.

## **14.5 Методичні вказівки**

14.5.1 Для визначення допустимого струмового навантаження струмопроводу треба при необхідності скласти теплові схеми заміщення і скористатись законами Ома або Ньютона, а також спрощеними залежностями для визначення коефіцієнтів тепловіддачі [1–4].

14.5.2 Результати попереднього розрахунку (допустиме струмове навантаження) потрібно узгодити з викладачем і відповідно одержати дозвіл на проведення експериментальної частини роботи.

14.5.3 Експериментальна частина лабораторної роботи виконується у такому порядку:

а) зібрати схему, підготувати контур відповідно до заданого варіанту;  
б) підготувати температурний датчик до роботи; для цього необхідно включити цифровий вольтметр і встановити діапазон вимірювання 2 вольт (2000 мВ);

в) увімкнути автоматичний вимикач SF і натисненням кнопки SB1 (Пуск) увімкнути магнітний пускач КМ;

г) за допомогою автотрансформатора T2 установити допустимий струм навантаження, визначений розрахунком (п. 14.5.1);

д) для дослідження перехідного режиму нагріву і визначення часу виходу на сталий режим провести вимір температури у 3–4 точках контуру через рівні проміжки часу (інтервали визначити самостійно; для одержання точних вимірювань термощуп потрібно держати у точці до одержання стійкого значення температури – приблизно 25–30 с);

дані занести до таблиці;

е) процес нагріву вважається сталим, якщо послідовно (приблизно через 3–5 хвилин) значення температур в кожній з точок не відрізняються більше, ніж на 1°C;

ж) по досягненні сталого режиму провести вимір температури по всій довжині струмопроводу; дані занести до таблиці; кількість точок заміру визначити самостійно, виходячи з необхідності побудування графіку;

з) зафіксувати значення температур на кінцях струмопроводу та падіння напруги на контактних з'єднаннях

14.5.4 Прямий замір температури поверхні провідника, покритого шаром ізоляції, є неможливим; тому вимірюється температура на поверхні ізоляції, а температура поверхні струмопроводу розраховується за наступною формулою:

$$\vartheta_{п.с} = \vartheta_{п.із} + r_{т.із} \cdot q,$$

де  $\vartheta_{п.із}$  – температура у точці дослідження на поверхні ізоляції, яка визначається експериментально;

$r_{т.із}$  – тепловий опір одиниці довжини шару ізоляції на ділянці виміру температури, (м·К)/Вт;

$q$  – потужність втрат на одиницю довжини струмопроводу у площині виміру температури, Вт/м;

Останні два параметра визначаються розрахунковим методом.

14.5.5 Уточнений розрахунок струмопровідного контуру в сталому режимі виконується у такому порядку [7–9]:

а) визначити ділянки струмопроводу, тепловий стан яких можливо описати диференціальними рівняннями;

б) розробити теплову схему заміщення струмопроводу;

в) розробити блок-схему та алгоритм уточненого розрахунку контуру з розрахунком нелінійності параметрів тепловиділення і тепловіддачі (з використанням метода послідовних наближень), орієнтуючись на наступну приблизну послідовність:

- визначити вираз для розрахунку параметрів тепловіддачі;

- скласти систему диференціальних рівнянь;

- визначити граничні умови та умови спряження на межах елементарних ділянок;

- визначити метод вирішення системи рівнянь;

- надати алгоритм розрахунку розподілення температури по контуру.

г) провести розрахунок розподілу температури по довжині контуру відповідно початковим даним.

14.5.7 Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

а) найменування та мету роботи;

б) ескіз досліджуваного струмопроводу;

в) розрахунок допустимого струмового навантаження;

г) результати експериментальних і теоретичних залежностей у вигляді таблиць і графіків;

д) аналіз проведених досліджень і висновки з роботи.

#### **14.6 Питання для самоперевірки**

14.6.1 У чому полягає мета попереднього (перевірного) теплового розрахунку струмопроводу?

14.6.3 Що таке постійна часу нагріву струмопроводу?

14.6.4 Як визначається час виходу струмопроводу до сталого режиму нагріву?

14.6.5 Як впливає наявність шару ізоляції на спроможність тепловіддачі струмопроводу?

14.6.6 Назвати основні етапи перевірного теплового розрахунку струмопроводу?

14.6.7 Як визначається температура ділянки струмопроводу покритої шаром ізоляції?

14.6.8 Як впливають з'єднувальні проводи на тепловий режим струмопроводу?

## Література

1. Основы теории электрических аппаратов: Учеб. для вузов/ [И.С. Таев, Б.К. Буль, А.Г. Годжелло и др.]; под ред. И.С. Таева. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.
2. Буткевич Г.В. Задачник по электрическим аппаратам / Буткевич Г.В., Дегтярь В.Г., Сливинская А.Г. – М.: Высшая школа, 1987. – 232 с.
3. Теория электрических аппаратов/ [Г.Н. Александров, В.В. Борисов, Г.С. Каплан и др.]; под ред. Г.Н. Александрова. – [2-е изд., перераб и доп.] – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – 540 с.
4. Залесский А.М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А.М. Залесский, Г.А. Кукеков. – Л.: Энергия, 1967. – 380с.
5. Мартыненко О.Г. Свободно-конвективный теплообмен: Справочник / О.Г. Мартыненко, Ю.А. Соковишин. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 400с.
6. Исакеев А.И. Эффективные способы охлаждения силовых полупроводниковых приборов / Исакеев А.И., Киселев И.Г., Филатов В.В. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 136 с.
7. Близняков А.В. Расчет тепловых режимов неоднородных токоведущих систем электрических аппаратов / А.В. Близняков, В.М. Кораблев // Электрический журнал. – 1997. – №1. – С. 18–22.
8. Близняков А.В. Анализ установившегося теплового режима токоведущего контура избирателя устройства регулирования напряжения трансформатора / А.В. Близняков, В.М. Кораблев // Электротехника та електроенергетика. – 2009. – №1. – С. 53–57.
9. Bliznykov A.V. Stationary Thermal Behavior Analysis of Current-Carrying Systems of Power Electric and Electronic Equipment / А.В. Близняков // Электротехника та електроенергетика. – 2012. – №1. – С. 19–22.
10. Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Допустимые температуры нагрева частей аппаратов: ГОСТ 403-73 (2003). – [Действует с 1974-01-01] – М.: Издательство стандартов, (переиздание 2003 г.). – 4 с. – (Межгосударственный стандарт)
11. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний: ГОСТ 8024-84. – [Действует с 1991-01-01] – М.: Издательство стандартов, 1990. – 19 с. – (Государственный стандарт Союза ССР)

## Додаток 1

**Визначення температур за термо-ЕРС**

Для визначення температур в лабораторних роботах використовується градуїрочна функція, яка для термопар хромель-копель надана у таблиці Д1.1. Вона отримана при температурі холодного спаю 273,15 К.

Оскільки в процесі вимірювання у лабораторії підтримується інша температура, то у величину термо-ЕРС вноситься поправка, яка додається до вимірюваної термо-ЕРС:

$$e_T = e'_T + e_{T0},$$

де  $e'_T$  – термо-ЕРС, виміряна приладом;

$e_{T0}$  – термо-ЕРС, що визначається за градуїрочною таблицею для температури холодного спаю (температури повітря поблизу лабораторної установки).

За величиною  $e_T$  і градуїрочною функцією визначається температура гарячого спаю термопари. Температура повітря визначається за допомогою лабораторного термометра.

## Додаток 2

**Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі прямокутних ребр**

Критерії Нуссельта і Грасфгофа розраховуються за наступними формулами:

$$Nu_m = \frac{1}{24} \cdot \frac{w}{L} \cdot (Pr \cdot Gr)_m \left[ 1 - \exp \left( - \frac{35}{(Pr \cdot Gr)_m \frac{w}{L}} \right) \right]^{0,75};$$

$$Gr_m = \frac{g w^3 \beta}{\nu_m^2} (\vartheta_s - \vartheta_0),$$

де  $w$  – ширина зазору між ребрами біля основи, м;

$L$  – довжина ребр у напрямку потоку повітря, м;

$Pr$  – критерій Прандтля, що для повітря дорівнює 0,7;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

Таблиця Д1.1 – Градууювальна характеристика терморпарі хромель-копель.

Температура гарячого спаю, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Т е р м о - Е Р С									
<b>0</b>	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
<b>10</b>	0,65	0,72	0,76	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,16	1,24
<b>20</b>	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
<b>30</b>	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
<b>40</b>	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
<b>50</b>	3,35	3,42	3,49	3,56	3,60	3,63	3,77	3,84	3,91	3,98
<b>60</b>	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
<b>70</b>	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
<b>80</b>	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
<b>90</b>	6,21	6,29	6,36	6,34	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
<b>100</b>	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
<b>110</b>	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
<b>120</b>	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
<b>130</b>	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
<b>140</b>	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
<b>150</b>	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
<b>160</b>	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,83	12,00	12,08	12,16
<b>170</b>	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,95
<b>160</b>	13,03	13,11	13,19	13,29	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
<b>190</b>	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,25	14,33	14,41	14,49	14,57
<b>200</b>	14,65	14,73	14,81	14,89	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38
<b>210</b>	15,47	15,55	15,63	15,71	15,79	15,88	15,56	16,04	16,12	16,20
<b>220</b>	16,29	16,37	16,45	16,53	16,61	16,70	16,78	16,86	16,94	17,02
<b>230</b>	17,11	17,19	17,27	17,36	17,44	17,52	17,61	17,69	17,77	17,86
<b>240</b>	17,94	18,02	18,10	18,18	18,27	18,35	18,43	18,51	18,60	18,68
<b>250</b>	18,76	18,84	18,82	19,01	19,09	19,17	19,26	19,34	19,42	19,51

$\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення повітря,  $K^{-1}$ ;

$\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості, який розраховується за такою формулою;

$$\nu = 10^{-9} \frac{(\vartheta_m + 273)^{1,75}}{1,387}, \text{ м}^2/\text{с};$$

$\vartheta_s$  – середньоповерхнева температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\vartheta_0$  – температура повітря,  $^{\circ}\text{C}$ .

Конвективний коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_k = \frac{Nu_m \lambda_m}{w},$$

де  $\lambda$  – питома теплопровідність повітря, яка визначається за такою формулою

$$\lambda_m = 1,95 \cdot 10^{-4} (\vartheta_m + 273)^{0,861}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

$m$  – індекс, який вказує та те, що даний параметр взято при температурі визначення, яка за звичаєм визначається як середньоарифметичне значення між температурами тіла та охолоджуючого середовища; для даного випадку вона визначається за таким виразом:

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_s + \vartheta_0}{2}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням ребр та інших форм:

$$\alpha_b = 5,67 \cdot 10^{-8} \sigma \frac{(\vartheta_s + 273)^4 - (\vartheta_0 + 273)^4}{\vartheta_s - \vartheta_0} \varphi$$

де  $\sigma$  – ступінь чорноти поверхні тіл;

$\varphi$  – кутовий коефіцієнт опромінювання, який визначається за такою формулою

$$\varphi = w \frac{L + 2h}{wL + 2Lh};$$

$h$  – висота ребр у напрямку від основи до торця, м.

Ефективність оребрення

$$C_{\text{еф}} = \frac{\text{th} \left( h \cdot \sqrt{\frac{2\alpha_{\text{т}\square}}{\lambda_{\text{п}}\delta_{\text{п}}}} \right)}{h \cdot \sqrt{\frac{2\alpha_{\text{т}\square}}{\lambda_{\text{п}}\delta_{\text{п}}}}},$$

де  $\alpha_{\text{т}}$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі з поверхні радіатору;

$\lambda_{\text{п}}$  – питома теплопровідність матеріалу ребра, Вт/(м·°С);

$\delta_{\text{п}}$  – товщина ребр біля основи, м.

Тепловий опір радіатора

$$R_{\text{т.рад}} = \frac{1}{\alpha_{\text{т}\square} S C_{\text{еф}}},$$

де  $S$  – сумарна площа поверхні ребр радіатора, м<sup>2</sup>;

Для горизонтально розташованих циліндрів критерій Нуссельта визначається за такою формулою:

$$Nu = 0,36^{0,5} + \left\{ \left( \frac{Gr_d \cdot Pr_d}{300} \right) / \left[ 1 + (0,5/Pr)_{16}^9 \right]^{16} \right\}^{\frac{1}{6}}.$$

Для вертикально розташованих циліндрів:

$$Nu = C_2 \left( Gr_d Pr_d \cdot \frac{d}{l} \right)^{n_2},$$

де  $d$  – діаметр циліндра, м;

$l$  – довжина циліндра, м;

$C_2, n_2$  – коефіцієнти, значення яких надані у таблиці Д2.1.

Таблиця Д2.1 – значення коефіцієнтів  $C_2, n_2$ .

$\left( Gr_d Pr_d \frac{d}{l} \right)$	$C_2$	$n_2$
$10^{-4}$ –0,05	0,87	0,8
0,05– $10^4$	1,3	0,36
$>10^4$	0,57	0



## Додаток 3

**Схема пристрою для вимірювання температури**

Пристрій для вимірювання температури на поверхні досліджуванних елементів являє собою цифровий термометр, схема якого надана на рисунку ДЗ.1. Основними елементами термометра є температурний датчик LM35B, мілівольтметр PV та джерело живлення GB.

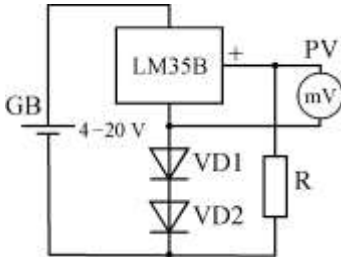


Схема цифрового термометра

Терморезистивний напівпровідниковий датчик температури типу LM35CZ/NOPB забезпечує робочий діапазон температур від  $-40$  до  $+150^{\circ}\text{C}$  з  $(10\text{ мВ/К})$  точністю до  $0,1^{\circ}\text{C}$ . В якості вольтметра може бути використаний будь-який цифровий мілівольтметр з достатньо високим вхідним опором (в тому числі недорогий мультиметр китайського виробництва). При вимірюванні температури потрібно встановити діапазон вимірювання вольтметра  $2\text{ В}$  ( $2000\text{ мВ}$ ). У якості джерела живлення може бути використований елемент типу «Крона», або три пальчикові послідовно з'єднані батарейки.

Схема містить також діоди VD1 VD2 (використовуються кремнієві діоди КД509, КД521 і т.д.), а також резистор R ( $18\text{ кОм}$ ). Слід зазначити, що для вимірювання позитивних температур може бути використана спрощена схема, яка не містить ці елементи.