

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»



**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")

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: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 35 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.

Затверджено на засіданні кафедри
“Електричні та електронні апарати”.
Протокол №8 від 31 січня 2024 р.

Рекомендовано до видання
на засіданні НМК ЕТФ
Протокол № 6 від 22 лютого 2024 р.

З М І С Т

Вступ	4
1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9. ДОСЛІДЖЕННЯ НАГРІВУ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ	5
1.1 Мета роботи	5
1.2 Предмет дослідження	5
1.3 Опис експериментальної установки	7
1.4 Завдання	8
1.5 Методичні вказівки	8
1.6 Питання для самоперевірки	11
2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №13. ДОСЛІДЖЕННЯ ОХОЛОДЖУВАЧІВ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ	13
2.1 Мета роботи	13
2.2 Предмет дослідження	13
2.3 Опис експериментальної установки	16
2.4 Завдання	18
2.5 Методичні вказівки	20
2.6 Питання для самоперевірки	22
3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ НЕОДНОРІДНОГО СТРУМОПРОВОДУ	23
3.1 Мета роботи	23
3.2 Предмет дослідження	23
3.3 Опис експериментальної установки	24
3.4 Завдання	26
3.5 Методичні вказівки	26
3.6 Питання для самоперевірки	28
Перелік посилань	29
Додаток А. Визначення температур за термо-ЕРС	30
Додаток Б. Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі прямокутних ребр.....	32
Додаток В. Схема пристрою для вимірювання температури	35

ВСТУП

Теплові явища відіграють важливу роль електричних апаратах. Причому, як позитивну, і негативну. Прикладом позитивної ролі може бути плавлення плавкої вставки запобіжника, яка вимикає електричне коло при виникненні перевантаження або короткого замикання. Можна навести багато інших прикладів використання теплових явищ для функціонування електричних апаратів. Негативна роль головним чином полягає в тому, що при проходженні струму по провіднику виділяється теплова енергія, яка має бути відведена (розсіяна) у навколишнє середовище. В іншому випадку елементи апарату нагріватимуться понад встановлені норми. У той самий час слід зазначити, якщо елементи апарату при номінальних навантаженнях нагріваються незначно, це свідчить про нераціональність конструктивних рішень. Отже виникає завдання оптимізації теплового режиму апарату.

Така задача особливо складна при конструюванні силових електронних апаратів (тобто апаратів, побудованих на силових напівпровідникових приладах). Оскільки теплові втрати у них значно більше, для розсіювання тепла у цьому випадку необхідні спеціальні *системи охолодження*: *радіатори*, тобто пристрої з розвиненою поверхнею охолодження; *примусове охолодження*, тобто. охолодження елементів за допомогою рухомого потоку повітря, води, трансформаторної оливи; *випарне охолодження*, тобто. охолодження при фазовому перетворенні рідини.

Таким чином, апарат або окремий його елемент являє собою *термодинамічну систему*, в якій виділяється теплова енергія і, з іншого боку, розсіюється у навколишнє середовище. Якщо потужність, що виділяється, дорівнює потужності, що розсіюється, то має місце теплова рівновага. У цьому випадку спостерігається так званий *сталій тепловий режим*, коли температура елементу з часом не змінюється. Такий режим зазвичай спостерігається при тривалій роботі апарата у номінальному режимі. Якщо ж такої рівності немає (тобто теплова рівновага відсутня), то в цьому випадку електричний апарат працює у *несталому тепловому режимі*. У цьому випадку температура елементів апарата змінюється у часі. Такий режим зазвичай спостерігається при різкій зміні режиму навантаження апарата.

1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9. ДОСЛІДЖЕННЯ НАГРІВУ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

1.1 Мета роботи

Вивчити методи вимірювання температури, а також експериментально і теоретично визначити розподіл температури та часові діаграми нагріву елементів електричних апаратів.

1.2 Предмет дослідження.

Відомо, що експериментальні дослідження та випробування теплових режимів електричних та електронних апаратів супроводжуються вимірюванням теплових параметрів, зокрема вимірюванням температур. На сьогоднішній день існує велике різноманіття методів вимірювання температури, які умовно поділяють на контактні та безконтактні. Враховуючі відносно невелику вартість, основними методами, що використовуються на сьогоднішній день у практиці експериментальних досліджень та випробувань електричного обладнання, залишаються *контактні методи*: метод термометра, метод термопари 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.

Метод опорів знайшов використання при випробуваннях котушок і для виміру в мостових схемах. Як відомо, опір лінійно зростає з температурою [1–3, 6–8], 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°C .

Спочатку вимірюється R_1 при відсутності струму; при цьому температура елемента апарату повинна дорівнювати температурі навколишнього середовища. Потім вимірюється R_2 при певному навантаженні після досягнення усталеного значення температури.

Слід відзначити, що таким методом може бути визначена середня

температура обмотки, проте добре відомо, що нагрів котушки не є рівномірним. Найвища температура спостерігається у середині котушки і зменшується з наближенням до її зовнішньої поверхні.

Метод термопар широко застосовується, оскільки дає можливість дистанційного вимірювання та запису температури за допомогою осцилографа або цифрової реєструвальної системи з візуалізацією на ПК. Переважно використовуються термопари таких видів: мідь-константан, хромель-копель, хромель-алюмель. При відносно невеликих температурах (до 100...120°C) можна вважати, що термо-ЕРС пропорційна різниці температур нагрітих і холодних кінців термопари. Враховуючи те, що вхідні опори реєструвального приладу r_{Π} і термопари r_T порівнянні, покази приладу будуть менші ніж термо-ЕРС:

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

Для забезпечення мінімальної похибки необхідно виконувати наступні умови:

а) термопара повинна бути надійно придавлена до випробуваної деталі; якщо є можливість, то краще її запаяти, приварити чи вчekanити у поверхню; в деяких випадках термопара припаюється до мідної пластинки, яка придавлюється до дослідженої поверхні;

б) щоб уникнути появи наведеної ЕРС провідники, що з'єднують термопару з реєструвальним приладом, повинні бути скручені у біфіляр і максимально віддалені від області дії магнітних полів;

в) для одержання точних вимірювань бажано використовувати компенсаційні методи виміру, або прилади з великим внутрішнім опором відградуйовані відповідно до умов досліду.

Безконтактні методи останнім часом набули інтенсивного розвитку. Це, по-перше, використання *пірометрів*, принцип дії яких полягає у аналізі фізичних характеристик електромагнітного випромінювання, що генерується нагрітими тілами і, по-друге використання методів *лазерної термометрії*. Їх основною перевагою є відсутність термочутливого елемента, тобто датчика температури; цю роль відіграє сам досліджуваний об'єкт.

Безконтактні методи, зокрема спектральні пірометри знайшли практичне використання у практиці випробувань електричного обладнання. Наявність певних дефектів обладнання спричиняє зміну темпе-

ратури дефектних елементів і, як наслідок, зміну інтенсивності інфрачервоного випромінювання. Використання технічних засобів *тепловізійної діагностики (тепловізійних камер)* дозволяє отримати візуальне зображення температурного поля на поверхні об'єкта і відразу визначити дефектний елемент. Істотним недоліком пірометрів є відносно високі похибки, крім того вони реагують на теплові перешкоди від сторонніх джерел тепла.

1.3 Опис експериментальної установки.

Перевищення температур у лабораторній роботі визначається методом термопар. Термопари розташовані рівномірно вздовж радіусу та осі поперечного перерізу обмотки, рис. 1.1, що дозволяє одержати розподіл температури всередині обмотки.

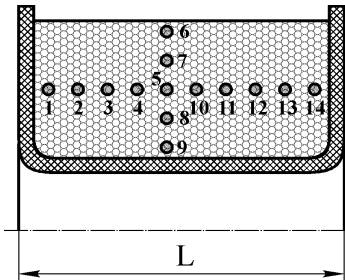


Рисунок 1.1 – Ескіз перерізу котушки з розташуванням термопар.

Електрична схема лабораторної установки надана на рис. 1.2. Живлення до схеми подається автоматичним вимикачем 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 до джерела живлення котушки (положення 1) або реостата (положення 2).

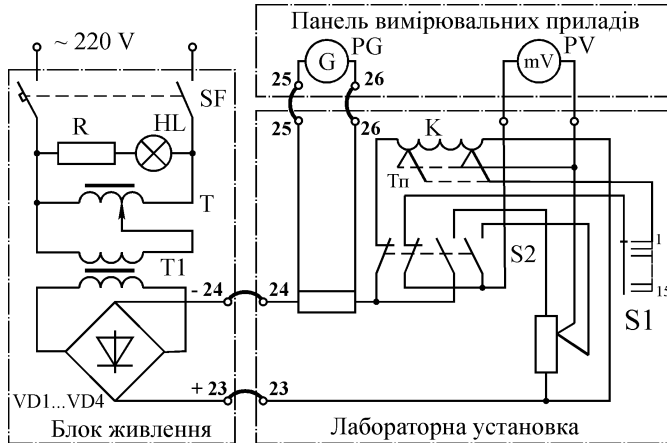


Рисунок 1.2 – Електрична схема установки.

1.4 Завдання

1.4.1 Зняти часові діаграми перевищення температури котушки для точок, що знаходяться на зовнішній та внутрішній поверхнях, у центральній частині перерізу, а також точки, що дотикається до магнітопроводу.

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

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

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

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

1.4.6 Визначити основні величини, що характеризують процес нагріву реостату.

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

1.5 Методичні вказівки

1.5.1. 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 I 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. 1.1;
- д) коли температура котушки досягне сталої, записати покази всіх 14 термопар занести до таблиці 1.2.
- е) вимкнути автомат SF і вивести автотрансформатор у нульове положення.

Таблиця 1.1 – Експериментальні дані несталою режиму котушки.

Час	Дані експерименту	Номери термопар				
		5	6	7	8	9
5 хвилин	U , мВ					
	ϑ , °C					
10 хвилин	U , мВ					
	ϑ , °C					
. . .						
130 хвилин	U , мВ					
	ϑ , °C					

Таблиця 1.2 – Експериментальні дані сталою режиму котушки.

Величини	Номери термопар													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
U , мВ														
ϑ , °C														

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

- 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. 1.3.

Таблиця 1.3 – Експериментальні дані нагріву резистора.

Час, хвилини	0	3	. . .	130
U , мВ				
ϑ , °C				

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 настання квазісталого режиму; дані досліду занести до табл. 1.3.

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

1.5.3. Обробка результатів експерименту, зокрема визначення температур за виміряними термо-ЕРС здійснюється за методикою, яка надана у додатку Б.

1.5.4. Середнє перевищення температури котушки визначити за наступною формулою:

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

де τ_{max} – максимальне перевищення температури у котушці;

τ_1 – перевищення температури зовнішньої поверхні котушки (за показами термопари 6).

1.5.5. Постійна часу нагріву визначається графічно використовуючи криву нагріву $\tau_{\text{сер}}(t)$, як це показано на рис. 1.3а. Постійну часу можна визначити також як час при якому перевищення температури складає приблизно дві третини від сталого перевищення.

1.5.6. Стале перевищення температури також може бути визначено графічно. При цьому може бути використана лише частина кривої нагріву $\tau_{\text{сер}}(t)$ у місті різкого вигину, як це показано на рис. 1.3б.

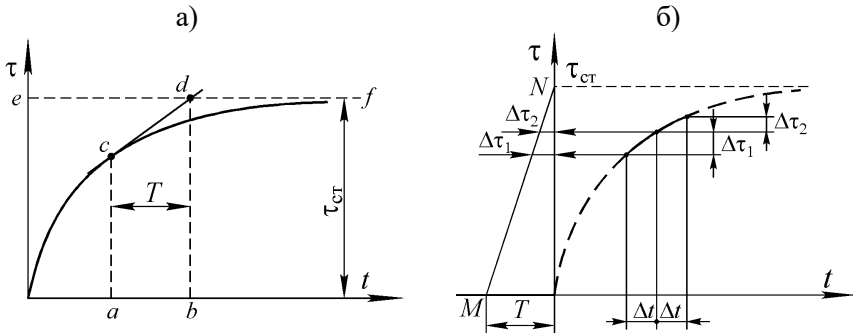


Рисунок 1.3 – Графічне визначення (а) постійної часу нагріву та (б) сталого перевищення температури

Стале перевищення температури може бути визначено також за емпіричною формулою [6–8]:

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

де τ_1 , τ_2 , τ_3 – перевищення температур, що виміряні через проміжки часу Δt .

1.5.7. Значення коефіцієнтів тепловіддачі з внутрішньої та зовнішньої поверхонь котушки визначаються за наступними формулами, відповідно:

$$\alpha_{r1} = \frac{P_1}{2\pi r_1 l (\vartheta_1 - \vartheta_0)}; \quad \alpha_{r2} = \frac{P_2}{2\pi r_2 l (\vartheta_2 - \vartheta_0)}$$

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

ϑ_1 і ϑ_2 – температура, відповідно, внутрішньої і зовнішньої поверхні;

Для котушки з теплоізовльованим 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 у сталому режимі, Вт;

r_0 – радіус, що відповідає максимальній температурі у котушці.

1.5.8. Криві нагріву побудувати для зовнішньої та внутрішньої поверхонь котушки, а також центральної частини її поперечного перерізу (термопари 6, 7, 5, 8, 9; див. рис. 1.1).

1.5.9. Побудувати криву розподілу перевищення температури обмотки у радіальному та осьовому напрямках. Визначити радіус, який відповідає максимальному перевищенню температури.

1.5.10. По одержаним значенням сталої температури, постійної часу нагріву на тому ж графіку побудувати пунктиром розрахункову криву перевищення температури і порівняти з дослідними результатами.

1.5.11. Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

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

1.6 Питання для самоперевірки

1.6.1. Основні джерела теплоти в електричних апаратах.

1.6.2. Основні методи вимірювання температури елементів електричних апаратів.

1.6.3. Фізичний зміст коефіцієнта тепловіддачі з поверхні нагрітого тіла.

1.6.4. Визначення та фізичний зміст постійної часу нагріву.

1.6.5. Поняття усталеної температури.

1.6.6. Основні режими роботи електричних апаратів.

1.6.7. Теплопередача в обмотках постійного і змінного струму з феромагнітним осердям.

1.6.8. Що таке коефіцієнт теплопровідності тіла заміщення обмотки?

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

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

1.6.11. Що таке відносна тривалість вмикання повторно-короткочасного режиму роботи апарата?

2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №13 ДОСЛІДЖЕННЯ ОХОЛОДЖУВАЧІВ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

2.1 Мета роботи

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

2.2 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. Допустимі величини температури $p-n$ структури за звичаєм надаються у паспортних даних приладів і ні в якому разі не можуть бути перевищені в процесі їх функціонування. 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 [10].

У загальному випадку, тепловий стан СНП може бути визначений за допомогою теплової схеми заміщення, яка надана на рис. 2.1.

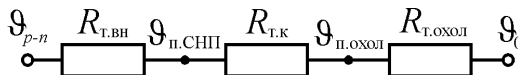


Рисунок 2.1 – Теплова схема заміщення СНП з одностороннім охолодженням

У схемі заміщення використовуються такі позначення:

ϑ_{p-n} – температура $p-n$ структури СНП;

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

ϑ_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 контактними поверхнями СНП і охолоджувача);

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

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

$$P_{\text{від}} = \frac{\vartheta_{\text{п.охол}} - \vartheta_0}{R_{\text{т.охол}}}. \quad (2.1)$$

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:

$$R_{\text{т.охол}} = \frac{1}{\alpha_{\text{т}} S_{\text{охол}}}, \quad (2.2)$$

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 випарних систем для охолодження СНП ще не доведена [10].

Таким чином, 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 збільшення теплообмінної поверхні 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 *оребрення*. 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]:

$$\eta = \frac{th\,bl}{bl}, \quad (2.3)$$

де l – висота ребра;

b – параметр ребра, що визначається за наступною формулою:

$$b = \sqrt{\frac{\alpha_r p}{\lambda S}}, \quad (2.4)$$

де α_r – коефіцієнт тепловіддачі с поверхні ребр, Вт/(м²·К);

S, p – поперечний переріз ребра радіатора у напрямку тепловіддачі та його периметр, відповідно, м²;

λ – 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 δ (тобто $h \gg \delta$) має наступний вигляд:

$$R_{th} = \frac{1}{h\sqrt{2\delta\lambda\alpha_r} \operatorname{th}\left(l\sqrt{\frac{2\alpha_r}{\lambda\delta}}\right)}. \quad (2.5)$$

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

$$G_{\tau\Sigma} = G_{\text{нр}} + Nh\sqrt{2\delta\lambda\alpha_{\tau}} \cdot \text{th}\left(l\sqrt{\frac{2\alpha_{\tau}}{\lambda\delta}}\right), \quad (2.6)$$

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; за величиною $\alpha_{\text{еф}}$ можна оцінити ефективність радіаторів, що розробляються або обираються для охолодження СНП.

$\vartheta_{\text{с}}$ – середнє поверхнева температура основи радіатора, °C;

A – площа основи радіатора, на якому розташовані ребра, м²;

Φ – тепловий потік, що розсіюється, Вт.

Зв'язок між параметрами радіатора визначається такими виразами:

$$G_{\tau\Sigma} = R_{\square\tau\Sigma}^{-1} = \alpha_{\text{еф}} \cdot A; \quad (2.7)$$

$$\Phi = G_{\tau\Sigma}(\vartheta_{\text{с}} - \vartheta_0) = \frac{\vartheta_{\text{с}} - \vartheta_0}{R_{\tau\Sigma}} = \alpha_{\text{еф}} A(\vartheta_{\text{с}} - \vartheta_0). \quad (2.8)$$

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

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

2.3 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 2.2, на якому також показані точки для визначення температур: **1** – зовнішньої поверхні нагрівача; **2** та **3** – контактних поверхонь нагрівача та радіатора, відповідно; **4** – основи радіатора.

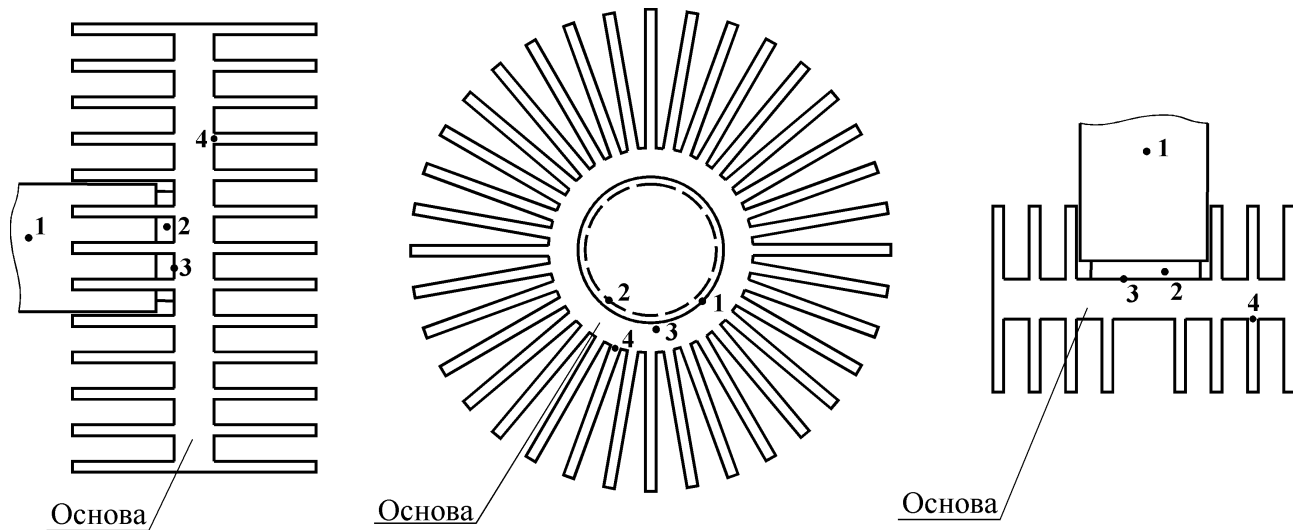


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд досліджуваних радіаторів
(цифрами 1–4 позначені точки для визначення температур)

Принципова схеми установки наведена на рис. 2.3. 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 охолоджувачів та нагрівачів використовується контактний метод, температурний датчик притискується до досліджуваної точки. У якості датчика температури використовується напівпровідниковий терморезистор LM35, який має вигляд термощупа, підключений до цифрового вольтметру. Схема підключення температурного датчика надана у додатку В.

2.4 Завдання.

2.4.1 Ознайомитись з основними видами систем охолодження та типами охолоджувачів, що використовуються для силових напівпровідникових приладів.

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

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

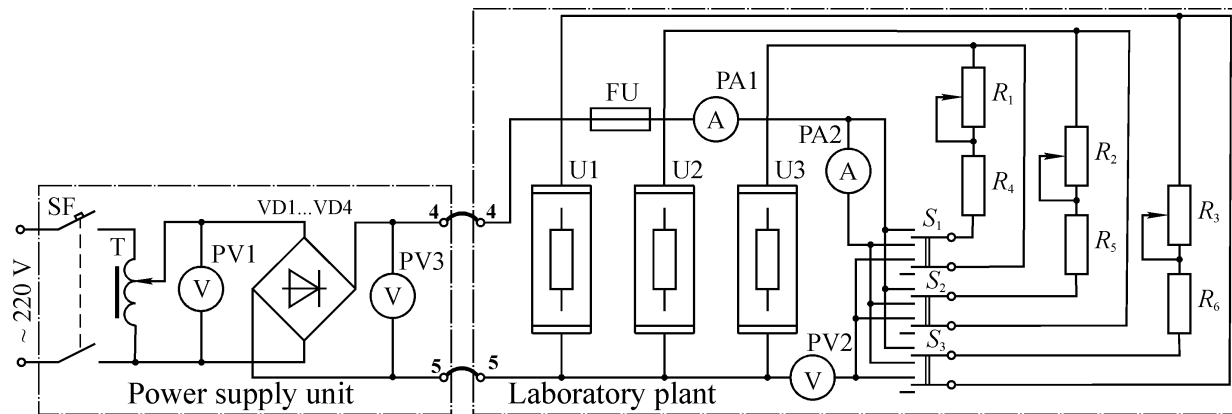


Рисунок 2.3 – Принципова схема установки.

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

2.4.5 Порівняти результати експерименту та розрахунку.

2.5 Методичні вказівки

2.5.1 Для виконання пунктів 2.4.1 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 [10].

2.5.2 Для виконання теоретичних розрахунків необхідно користуватись співвідношеннями, що надані у підрозділі 2.2 [9, 10]. Коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулами, які надані у додатку Б. 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 питомо теплопровідністю $\lambda = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

2.5.3 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. 2.2; дані занести до таблиці 2.1 (процес нагріву можна вважати сталим, якщо послідовні вимірювання через 5 хв. відрізняються не більш як на 1°C);

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

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;

Таблиця 2.1 – 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				
...				

і) експериментальне значення теплового опору радіаторів визначити за формулою (2.1), 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:

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

де $P_{\text{н.від}}$ – 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.

2.5.6 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.

2.6 Питання для самоперевірки

2.6.1 Які фактори впливають на спроможність тепловіддачі радіатора?

2.6.2 Яким чином можна зменшити тепловий опір контакту між вентилям та охолоджувачем?

2.6.3 Що таке ефективність ребра і від чого вона залежить?

2.6.4 Від чого залежить тепловий опір охолоджувача?

2.6.5 Як впливає колір радіатора на його спроможність тепловіддачі?

2.6.6 Як обрати радіатор для природного повітряного охолодження?

2.6.7 Чому ефективний коефіцієнт тепловіддачі є критерієм оцінки ефективності радіатора?

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

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

3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №14. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ НЕОДНОРІДНОГО СТРУМОПРОВОДУ

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

3.1 Мета роботи

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

3.2 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 [11, 12]. 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 реальних апаратів частіш усього мають неоднорідне температурне поле внаслідок неоднорідності конструкційних та теплофізичних чинників. Наприклад, струмопровідний контур комутаційних апаратів, як мінімум, містить: декілька провідників, які можуть відрізнятись геометричною конфігурацією, матеріалом, умовами тепловіддачі; комутаційні контакти та контактні з'єднання. Безконтактні комутаційні апарати містять додатково силові напівпровідникові прилади з охолоджувачами.

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.

3.3 Опис експериментальної установки.

На стенді для експериментальних досліджень установлені 6 варіантів струмопроводів, рис. 3.1.

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

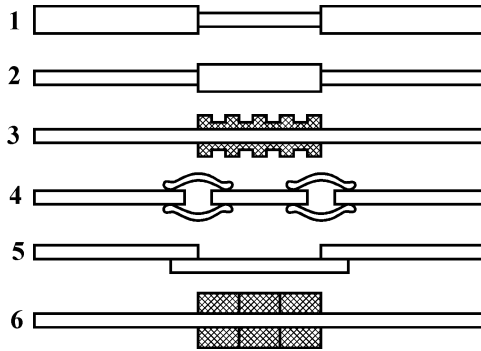


Рисунок 3.1 – Варіанти струмопроводів.

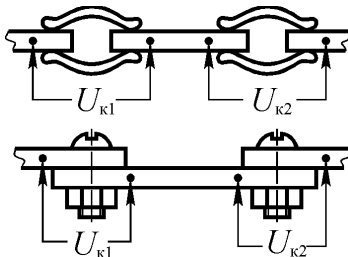


Рисунок 3.2 – Схема вимірювання падіння напруги на контактах.

Вимірювання падіння напруги на контактах струмопроводів здійснюється цифровим вольтметром. З цієї 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. 3.2.

Нагрів струмопроводів здійснюється постійним струмом, схема їх підключення надана на рис. 3.3. 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.

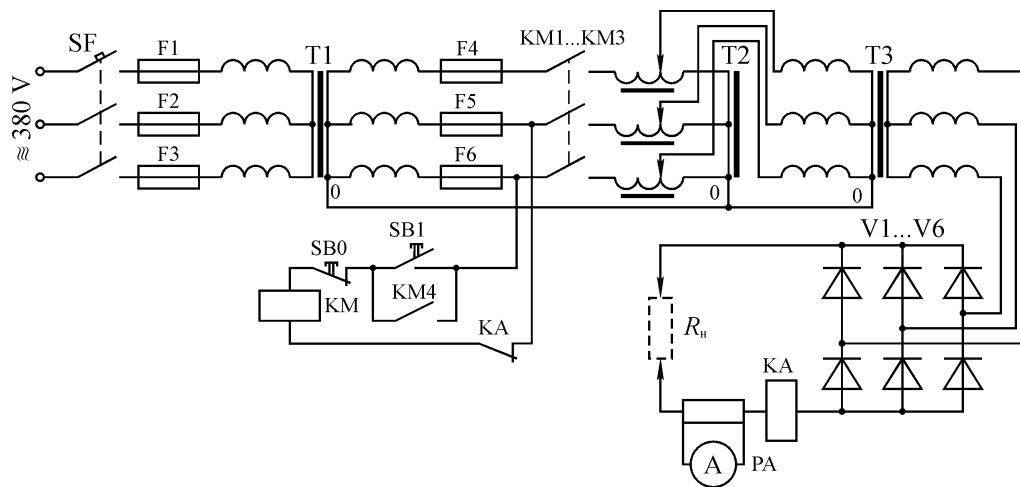


Рисунок 3.3 – Електрична схема підключення струмопроводів

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

Регулювання струму здійснюється автотрансформатором Т₂. 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.

3.4 Завдання

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

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

3.4.3 Експериментально визначити постійну часу нагріву і час виходу струмопроводу до сталого режиму; побудувати криву нагріву струмопроводу.

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

3.4.5 Провести порівняльний аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

3.4.6 Зробити висновки з роботи.

3.5 Методичні вказівки

3.5.1 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 [2, 3, 6–9].

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

3.5.3 Експериментальна частина лабораторної роботи виконується у такому порядку:

а) зібрати схему, підготувати струмопровід 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 Т2 установити допустимий струм навантаження, визначений розрахунком (п. 3.5.1);

д) для виконання п. 3.4.3 завдання необхідно провести вимірювання температур у 3–4 точках струмопроводу через рівні проміжки часу (визначити самостійно); для одержання точних вимірювань термощуп потрібно утримувати у точці до одержання стійкого значення температури – приблизно 25–30 с; дані занести до таблиці (скласти самостійно);

е) процес нагріву вважається сталим, якщо упродовж 5 хвилин значення температур в кожній з точок не відрізняються більше, ніж на 1 °С;

ж) по досягненні сталого режиму провести вимірювання температури по всій довжині струмопроводу; кількість точок вимірювання визначити самостійно, враховуючи необхідність побудування графіку розподілу температури;

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

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

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

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

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

q – потужність втрат на одиницю довжини струмопроводу на відповідній ділянці, Вт/м;

Останні два параметра визначаються розрахунковим методом.

3.5.5 Уточнений розрахунок струмопровідного контуру в сталому режимі виконується у такому порядку [2, 3, 13]:

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 ко-

нтуру з розрахунком нелінійності параметрів тепловиділення і тепло-
віддачі (з використанням метода послідовних наближень), орієнтую-
чись на наступну приблизну послідовність:

- визначити вираз для розрахунку параметрів тепловіддачі;
 - скласти систему диференціальних рівнянь;
 - визначити граничні умови та умови безперервності температу-
рного поля на межах елементарних ділянок;
 - визначити метод вирішення системи рівнянь;
 - надати алгоритм розрахунку розподілення температури по контуру.
- г) провести розрахунок розподілу температури по довжині кон-
туру відповідно початковим даним.

3.5.7 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.

3.6 Питання для самоперевірки

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

3.6.2 Що таке постійна часу нагріву струмопроводу?

3.6.3 Як визначається час виходу струмопроводу до сталого ре-
жиму нагріву?

3.6.4 Як впливає наявність шару ізоляції на спроможність тепло-
віддачі струмопроводу?

3.6.5 Назвіть основні етапи перевірного теплового розрахунку
струмопроводу.

3.6.6 Як визначається температура ділянки струмопроводу пок-
ритої шаром ізоляції?

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

Перелік посилань

1. Козлов В.Д. Электричні апарати. Загальні питання електричних апаратів: Посібник [Електронний ресурс] – К.: НАУ, 2005. – 92 с.
2. Рассальський О.М. Аналіз і розрахунок теплових режимів силового електроустаткування: Навчальний посібник / О.М. Рассальський. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 146 с.
3. 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.
4. Heat transfer handbook / Edited by Adrian Bejan and Allan D. Kraus, John Wiley & Sons, Inc., 2003. – 1481 p.
5. Nellis, G. Heat transfer / Edited by Gregory Nellis, Sanford Klein, Cambridge University Press, 2009. – 1143 p.
6. Основы теории электрических аппаратов: Учеб. для вузов [Електронний ресурс] / Под ред. П.А. Курбатова – СПб.: Лань, 2015. – 590 с.
7. 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.
8. Буткевич Г.В. Задачник по электрическим аппаратам / Буткевич Г.В., Дегтярь В.Г., Сливинская А.Г. – М.: Высшая школа, 1987. – 232 с.
9. Залесский А.М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А.М. Залесский, Г.А. Кукеков. – Л.: Энергия, 1967. – 380с.
10. Исаев А.И. Эффективные способы охлаждения силовых полупроводниковых приборов / Исаев А.И., Киселев И.Г., Филатов В.В. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 136 с.
11. IEC 60947-1: 2020 Low-voltage switchgear and controlgear – Part 1: General rules, 2020. – 577 p.
12. IEC 62271-1: 2017 High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear, 2017. – 256 p.
13. Bliznykov A.V. Stationary Thermal Behavior Analysis of Current-Carrying Systems of Power Electric and Electronic Equipment / А.В. Близняков // Електротехніка та електроенергетика. – 2012. – №1. – С. 19–22.

Додаток А.

Визначення температур за термо-ЕРС

Для визначення температур в лабораторних роботах використовується градуїровочна функція, яка для термопар хромель-копель надана у таблиці А.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 градуїровочною таблицею для температури холодного спаю (температури повітря поблизу лабораторної установки).

За величиною e_t і градуїровочною функцією визначається температура гарячого спаю термопар. Температура повітря визначається за допомогою лабораторного термометра.

Таблиця А.1 – Градувальна характеристика термопарі хромель-копель.

Температура гарячого спаю, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Т е р м о - Е Р С									
0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,76	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,16	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,60	3,63	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,34	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,83	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,95
180	13,03	13,11	13,19	13,29	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,25	14,33	14,41	14,49	14,57
200	14,65	14,73	14,81	14,89	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38
210	15,47	15,55	15,63	15,71	15,79	15,88	15,56	16,04	16,12	16,20
220	16,29	16,37	16,45	16,53	16,61	16,70	16,78	16,86	16,94	17,02
230	17,11	17,19	17,27	17,36	17,44	17,52	17,61	17,69	17,77	17,86
240	17,94	18,02	18,10	18,18	18,27	18,35	18,43	18,51	18,60	18,68
250	18,76	18,84	18,82	19,01	19,09	19,17	19,26	19,34	19,42	19,51

Додаток Б

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 $\rightarrow 31$ / повітря, м;

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

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

β – коефіцієнт об'ємного розширення повітря, К⁻¹;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, який розраховується за такою формулою;

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

ϑ_s – середньоповерхнева температура, °С;

ϑ_0 – температура повітря, °С.

Конвективний коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_\kappa = \frac{Nu_m \lambda_m}{w},$$

де λ – питома теплопровідність повітря, яка визначається за такою формулою

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

m – індекс, який вказує та те, що даний параметр взято при температурі визначення, яка за звичаєм визначається як:

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

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням ребр та інших поверхонь радіатора:

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

де σ – ступінь чорноти поверхні тіл;

φ – кутовий коефіцієнт опромінювання, який визначається за такою формулою

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

h – висота ребр у напрямку від основи радіатора до торця ребра, м.
Ефективність оребрення:

$$C_{\text{еф}} = \frac{\text{th} \left(h \cdot \sqrt{\frac{2\alpha_{\text{т}}}{\lambda_p \delta_p}} \right)}{h \cdot \sqrt{\frac{2\alpha_{\text{т}}}{\lambda_p \delta_p}}} ,$$

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

λ_p – – питома теплопровідність матеріалу радіатора, Вт/(м·°C);

δ_p – товщина ребр біля основи, м.

Тепловий опір радіатора

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

де S – сумарна площа поверхні ребр радіатора, м²;

Для горизонтально розташованих циліндрів критерій Нуссельта визначається за такою формулою:

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

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 Б.1.

Таблиця Б.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 В

Схема пристрою для вимірювання температури

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

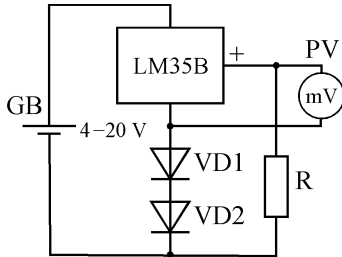


Рисунок В.1 – Схема цифрового термометра

Терморезистивний напівпровідниковий датчик температури типу LM35CZ/NOPB забезпечує робочий діапазон температур від -40 до $+150^{\circ}\text{C}$ (10 мВ/К) з точністю до $0,1^{\circ}\text{C}$. В якості вольтметра може бути використаний будь-який цифровий мілівольтметр з достатньо високим входним опором (в тому числі недорогий мультиметр китайського виробництва). При вимірюванні температури потрібно встановити

діапазон вимірювання вольтметра 2 В (2000 мВ). У якості джерела живлення може бути використовуватись 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 кОм). Слід зазначити, що для вимірювання позитивних температур може бути використана спрощена схема, яка не містить ці елементи.