

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет "Запорізька політехніка"**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**до лабораторних робіт**  
**з дисципліни**

**“Тепломасообмін в радіоелектронних апаратах”**

для студентів спеціальності  
172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітні програми  
«Радіоелектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні  
технології мікросистемної радіоелектронної техніки»)  
усіх форм навчання

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Тепломасообмін в радіоелектронних апаратах" для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітні програми «Радіоелектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки») усіх форм навчання / Уклад.: Ірина ПОСПЕЄВА, Тетяна КУЛЯБА-ХАРИТОНОВА, Ксенія ПИЛИПЕНКО – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 42 с.

Укладачі: Ірина ПОСПЕЄВА, ст. викладач,  
Тетяна КУЛЯБА-ХАРИТОНОВА, ст. викладач,  
Ксенія ПИЛИПЕНКО, зав. лаб.

Рецензент: Тетяна БУГРОВА, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск: Микола ЄФІМЕНКО, д.т.н,  
в.о. зав. каф. ІТЕЗ

Затверджено  
на засіданні кафедри ІТЕЗ  
протокол № 2 від 07.09.21 р.

Рекомендовано до видання  
на засіданні НМК ФРЕТ  
протокол № 3 від 11.11.21 р.

## ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ.....	4
1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ КОРПУСУ ЕЛЕКТРОННОГО АПАРАТА .....	5
1.1 Теоретичні відомості.....	5
1.2 Порядок виконання роботи.....	11
1.2.1 Дослідження теплового режиму корпусу електронного апарата при вільній конвекції .....	11
1.2.2 Дослідження теплового режиму корпусу електронного апарата при вимушеній конвекції.....	14
1.2.3 Оформлення результатів розрахунків .....	16
1.3 Завдання до роботи .....	16
1.4 Зміст звіту .....	16
1.5 Контрольні запитання .....	17
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ВУЗЛА.....	19
2.1 Теоретичні відомості.....	19
2.1.1 Принцип суперпозиції (накладення).....	19
2.1.2 Принцип місцевих впливів.....	20
2.1.3 Принцип квазіізотермічних поверхонь .....	21
2.1.4 Принцип електротеплової аналогії .....	22
2.1.5 Розрахунок теплових режимів електрорадіоелементів.....	24
2.1.6 Розрахунок теплових опорів найпростіших моделей .....	28
2.2 Завдання до роботи .....	32
2.3 Зміст звіту .....	36
2.4 Контрольні запитання .....	36
ЛІТЕРАТУРА .....	37
Додаток А .....	39
Додаток Б.....	41
Додаток В.....	42
Додаток Г .....	43

## ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

**Основна мета лабораторних робіт з дисципліни: вивчити механізми передачі тепла, ознайомитись з конструктивними рішеннями, що забезпечують нормальний тепловий режим конструкцій РЕЗ та їх окремих компонентів, засвоїти методики розрахунків теплових режимів.**

Перед початком виконання кожної лабораторної роботи студент повинен ознайомитись з теоретичними відомостями до роботи та відповідати на контрольні запитання.

*Студенти, не підготовлені до роботи, до занять не допускаються.*

При виконанні розрахунків використовується теоретичний матеріал, що вивчається безпосередньо у курсі “Тепломасообмін в РЕЗ” та у попередніх курсах: “Фізичні основи електронних апаратів”, “Основи проектування електронних апаратів”.

Засвоєні методики можуть бути використані при виконанні конструкторських розрахунків в курсовому та дипломному проектуванні.

Для розрахунків оєклмендується застосувати математичний пакет Mathcad, або електронні таблиці Excel.

Для отримання заліку з роботи кожен студент пред’являє викладачеві звіт, оформлений згідно з вимогами, приведеними в методичних вказівках до роботи, і проходить співбесіду з викладачем.

*Студент, що не здав попередньої роботи, не може бути допущений до виконання наступної.*

Протягом семестру студенти виконують дві лабораторні роботи.

Лабораторна робота № 1. Дослідження теплового режиму корпусу електронного апарата.

Лабораторна робота № 2. Дослідження теплового режиму функціонального вузла.

# 1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ КОРПУСУ ЕЛЕКТРОННОГО АПАРАТА

**Мета роботи:** дослідження впливу матеріалу та швидкості руху теплоносія на тепловий режим корпусу електронного апарата.

## 1.1 Теоретичні відомості

Тепловий потік від корпусу електронного апарата відводиться теплопровідністю, конвекцією і випромінюванням.

**Передача тепла теплопровідністю** відбувається переважно в твердих тілах і описується **законом Фур'є**, який в інтегральній формі має вигляд:

$$P = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot S = \frac{\Delta t}{R_m} = G_m \cdot \Delta t \quad , \quad (1.1)$$

де  $P$  - тепловий потік (потужність);

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності;

$\Delta t = t_1 - t_2$  - перепад температури між частинами твердого тіла з температурами  $t_1$  і  $t_2$ ;

$S$  - площа поперечного перерізу твердого тіла, через який проходить тепловий потік.

$R_m = \frac{\Delta x}{\lambda \cdot S}$  - тепловий опір конструкції тепловідводу на основі твердого тіла;

$G_m = \frac{\lambda \cdot S}{\Delta x}$  - теплова провідність конструкції тепловідводу на основі твердого тіла.

Коефіцієнт теплопровідності залежить від різних властивостей матеріалу твердого тіла.

**Передача тепла випромінюванням** відбувається через прозорі для теплових променів середовища. Процеси теплообміну випромінюванням описуються **законом Стефана-Больцмана**, який в інтегральній формі набуває вигляду:

$$P_{\epsilon} = \sigma_0 \cdot \epsilon_{1,2} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot S_{1,2}, \quad (1.2)$$

де  $\sigma_0 = 5,668 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup> К - стала Стефана-Больцмана;  
 $\epsilon_{1,2}$  - зведений коефіцієнт чорноти поверхонь двох тіл, між якими відбувається теплообмін випромінюванням;  
 $T_1$  і  $T_2$  - абсолютна температура поверхонь двох тіл;  
 $S_{1,2}$  - взаємна поверхня теплообміну випромінюванням двох тіл.

Для зручності обчислень (1.2) застосовують у вигляді співвідношення:

$$R_{\epsilon} = \alpha_{\epsilon} \cdot \Delta t \cdot S_{1,2} = \frac{\Delta t}{R_{m\epsilon}} = G_{m\epsilon} \cdot \Delta t, \quad (1.3)$$

де  $\alpha_{\epsilon}$  - коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням;  
 $\Delta t = t_1 - t_2$  - перепад температур між двома тілами;

$$R_{m\epsilon} = \frac{1}{\alpha_{\epsilon} \cdot S_{1,2}} \quad - \quad \text{тепловий опір теплопередачі}$$

випромінюванням;

$G_{m\epsilon} = \alpha_{\epsilon} \cdot S_{1,2}$  - теплова провідність теплопередачі випромінюванням.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням обчислюється за допомогою співвідношення:

$$\alpha_{\epsilon} = \sigma_0 \cdot \epsilon_{1,2} \cdot \frac{T_1^4 - T_2^4}{\Delta t}, \quad (1.4)$$

Коефіцієнт чорноти тіл залежить від матеріалу і властивостей поверхні теплообміну. Його значення для різних поверхонь наведено у додатку Б.

**Конвективний теплообмін** відбувається між поверхнею твердих тіл і теплоносієм (газ, рідина), частинки якого можуть переміщуватися в процесі теплообміну. Процеси конвективного теплообміну описуються **законом Ньютона-Ріхмана**, який в інтегральній формі має вигляд:

$$P_{\kappa} = \alpha_{\kappa} \cdot \Delta t \cdot S = \frac{\Delta t}{R_{mk}} = G_{mk} \cdot \Delta t, \quad (1.5)$$

де  $\alpha_{\kappa}$  - коефіцієнт тепловіддачі конвекцією;

$\Delta t = t - t_c$  - різниця температур між поверхнею твердого тіла з температурою  $t$  і теплоносієм з температурою  $t_c$ ;

$S$  - площа поверхні твердого тіла;

$R_{mk} = \frac{1}{\alpha_{\kappa} \cdot S}$  - тепловий опір тепловіддачі конвекцією;

$G_{mk} = \alpha_{\kappa} \cdot S$  - тепла провідність тепловіддачі конвекцією.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією залежить від форми, розмірів поверхні твердого тіла і властивостей і швидкості руху теплоносія.

Для його визначення проводилися експерименти, їх результати оброблювались з допомогою теорії надійності. В результаті були отримані емпіричні співвідношення для різних випадків теплообміну конвекцією.

**При вільній конвекції в необмеженому середовищі** для обчислення коефіцієнту тепловіддачі конвекцією використовується критеріальне рівняння:

$$Nu_m = C \cdot (Gr \cdot Pr)_m^n, \quad (1.6)$$

де  $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Pr$  - числа (критерії) Нусельта, Грасгофа та Прандтля відповідно;

$C$  і  $n$  - емпіричні коефіцієнти;

$m$  - індекс, який позначає, що значення  $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Pr$

обчислюються для середньої температури  $t_m = \frac{t + t_c}{2}$ .

**Число Нусельта** враховує співвідношення між тепловіддачею теплопровідністю і конвекцією. Обчислюється воно за виразом:

$$Nu = \frac{\alpha_{\kappa} \cdot l}{\lambda}, \quad (1.7)$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності теплоносія;

$l$  - визначальний розмір поверхні, від якої відводиться тепловий потік.

**Визначальний розмір**  $l$  залежить від форми і орієнтації поверхні. Визначальний розмір для найбільш розповсюджених поверхонь наведений у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Визначальний розмір поверхні в залежності від її форми та орієнтації

Форма та орієнтація поверхні	Визначальний розмір
Куля, горизонтальний циліндр	Діаметр
Вертикальна пластина, вертикальний циліндр	Висота
Горизонтальна пластина	Менший розмір

**Число Грасгофа**  $Gr$  враховує підйомну силу, обумовлену зменшенням густини теплоносія при його нагріві. Обчислюється воно з допомогою співвідношення:

$$Gr = g \cdot \beta \cdot (t - t_c) \cdot \frac{l^3}{\nu^2}, \quad (1.8)$$

де  $g = 9,8 \text{ м / с}^2$  - прискорення вільного падіння;  
 $\beta$  - коефіцієнт термічного розширення теплоносія;  
 $\nu$  - коефіцієнт динамічної в'язкості (в'язкість) теплоносія.

**Число Прандтля** враховує інерційні властивості теплоносія:

$$Pr = \frac{\nu}{\chi}, \quad (1.9)$$

де  $\chi = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho}$  - коефіцієнт теплопровідності теплоносія;

$C_p$  - питома теплоємність теплоносія;

$\rho$  - питома густина теплоносія.

Емпіричні коефіцієнти  $s$  і  $n$  залежать від режиму руху теплоносія, який у свою чергу визначається співвідношенням  $(Gr \cdot Pr)_m$ , і вибираються із табл. 1.2. Теплофізичні характеристики теплоносіїв наведені у додатку А.

Слід мати на увазі, що обчислений за допомогою співвідношення (1.7) коефіцієнт тепловіддачі конвекцією для горизонтально розташованої пластини збільшується в 1,3 рази при тепловіддачі вгору і помножується на коефіцієнт 0,7 при тепловіддачі вниз.

Таблиця 1.2 – Емпіричні коефіцієнти критеріального рівняння вільної конвекції

$(Gr \cdot Pr)_m$	$c$	$n$	Режим руху
$1 \cdot 10^{-3}$	0,5	0	Плівковий
$1,1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,18	$\frac{1}{8}$	Перехідний
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	$\frac{1}{4}$	Ламінарний
$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$	0,135	$\frac{1}{3}$	Турбулентний

*При примусовій конвекції в необмеженому просторі* при обчисленні коефіцієнту тепловіддачі конвекцією враховується число Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu}, \quad (1.10)$$

де  $v$  - швидкість руху теплоносія.

**Визначальний розмір**  $l$  для пластини дорівнює її довжині в напрямку руху теплоносія.

При поперечному обтіканні циліндра він визначається як половина довжини кола  $l = 0,5 \cdot \pi d$ , а при поздовжньому обтіканні – як його висота.

**Число Рейнольдса** визначає режим руху теплоносія. При ламінарному режимі ( $Re < 5 \cdot 10^5$ ) критеріальне рівняння має вигляд:

$$Nu_f = 0,66 \cdot Re_f^{0,5} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (1.11)$$

де індекси  $f$  і  $w$  означають, що числа подібності обчислюються для температури теплоносія (*fluid*), або стінки (*wall*).

Турбулентному режиму ( $Re > 5 \cdot 10^5$ ) відповідає критеріальне рівняння:

$$Nu_f = 0,037 \cdot Re_f^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (1.12)$$

Будемо вважати, що тепловий потік від  $i$ -ої поверхні корпусу відводиться тільки конвекцією і випромінюванням. Тоді загальний тепловий потік від  $i$ -ої поверхні:

$$P_i = P_{ki} + P_{ei} = G_{ei} \cdot \Delta t_i + G_{ki} \cdot \Delta t = \alpha_i \cdot S_i \cdot \Delta t = G_i \cdot \Delta t, \quad (1.13)$$

де  $\alpha_i = \alpha_{ei} + \alpha_{ki}$  - загальний коефіцієнт тепловіддачі з  $i$ -ої поверхні корпусу;

$G_i$  - теплова провідність від  $i$ -ої поверхні корпусу.

Якщо корпус має форму паралелепіпеда, то від корпусу відводиться тепловий потік:

$$P = \sum_{i=1}^6 P_i = \sum_{i=1}^6 \alpha_i \cdot S_i \cdot \Delta t_i \quad (1.14)$$

При однакових температурах усіх поверхонь (1.14) набуває вигляду:

$$P = \Delta t \cdot \sum_{i=1}^6 \alpha_i \cdot S_i = \alpha \cdot S \cdot \Delta t = \frac{\Delta t}{R_m} \quad (1.15)$$

де  $\alpha$  - середній коефіцієнт тепловіддачі;

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^6 \alpha_i \cdot S_i}{S}$$

$S$  - загальна поверхня тепловіддачі;

$R_m$  - тепловий опір корпусу;

$$R_m = \frac{1}{\alpha \cdot S}$$

## 1.2 Порядок виконання роботи

Перед виконанням роботи слід ознайомитись з теоретичними відомостями, теплофізичними параметрами матеріалів (додатки А, Б, В, ), варіантом завдання (табл. 1.5) та підготувати заготовки таблиць для обчислень за зразком табл. 1.3, 1.4.

В роботі досліджується вплив швидкості руху теплоносія на тепловий режим корпусу, який має форму паралелепіпеда з розмірами  $L1 \times L2 \times h$ , де  $h$  – висота корпусу.

При обчисленні приймаються припущення:

- корпус знаходиться у необмеженому просторі;
- тепловіддача теплопровідністю відсутня;
- корпус має ізометричну поверхню, тобто температура усіх граней паралелепіпеда однакова.

### 1.2.1 Дослідження теплового режиму корпусу електронного апарата при вільній конвекції

Обчислення проводяться в послідовності, визначеній у табл. 1.3.

1.2.1.1 Для заданого кліматичного виконання визначається максимальна температура навколишнього середовища (додаток В), задається температура перегріву  $\Delta t = 10^0 C$  та обчислюється температура поверхні корпусу  $t_k = t_c + \Delta t$ ;

1.2.1.2 Визначається коефіцієнт чорноти поверхні корпусу (додаток Б), обчислюється абсолютна температура поверхні корпусу  $T_k = t_k + 273$  і навколишнього середовища  $T_c = t_c + 273$  та за допомогою співвідношення (1.4) при  $\varepsilon_{1,2} = \varepsilon$ ,  $T_1 = T_k$  і  $T_2 = T_c$  обчислюється коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням.

**Примітка.** Цей пункт виконується тільки тоді, коли теплоносій є прозорим для випромінювання (повітря).

1.2.1.3 Обчислюється середня температура  $t_m = (t_k + t_c)/2$ , визначаються теплофізичні параметри теплоносія при цій температурі

(додаток А) та за допомогою співвідношень (1.8) і (1.9) обчислюються числа Грасгофа  $Gr$  і Прандтля  $Pr$  для нижньої поверхні;

**Застереження:** зверніть увагу на правила вибору визначального розміру  $l$ , наведені у табл. 1.1.

1.2.1.4 Обчислюється добуток  $(Gr \cdot Pr)_m$ , за допомогою табл.

1.2 визначаються емпіричні коефіцієнти  $c$  і  $n$  та за допомогою співвідношення (1.6) обчислюється число Нусельта  $Nu_m$ ;

1.2.1.5 Визначається коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  теплоносія при температурі  $t_m$  (додаток А), з допомогою співвідношення (1.7) і з урахуванням множника 0,7 обчислюється коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від нижньої поверхні корпусу  $\alpha_{кн}$  та загальний коефіцієнт тепловіддачі від нижньої поверхні  $\alpha_n = \alpha_{кн} + \alpha_g$ ;

1.2.1.6 Обчислюється коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від верхньої (множник 1,3) і бокової (множник 1,0) поверхонь корпусу, загальні коефіцієнти тепловіддачі від цих поверхонь, тепловий потік (1.14), який розсіюється корпусом при заданому перегріві та середній коефіцієнт тепловіддачі корпусу (із співвідношення 1.15);

1.2.1.7 Обчислюється тепла характеристика корпусу, для чого визначається тепловий потік при інших значеннях перегріву, які вибираються з кроком  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до температури корпусу  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для металевих корпусів) або  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для неметалевих корпусів), середній коефіцієнт тепловіддачі та тепловий опір корпусу за виразами (1.15).

Результати розрахунків заносяться у заготовку табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Теплова характеристика корпусу при вільній конвекції

		$\Delta t, ^\circ C$	10	20	30	40	50	
		$t_k, ^\circ C$						
		$T_k, K$						
		$\alpha_s, \frac{Bm}{M^2 \cdot K}$						
		$t_m, ^\circ C$						
Поверхня	Нижня	Pr						
		Gr						
		Pr·Gr						
		Nu						
		$\alpha_{кн}, \frac{Bm}{M^2 \cdot K}$						
		$\alpha_n, \frac{Bm}{M^2 \cdot K}$						
	Верхня	$\alpha_{кв}, \frac{Bm}{M^2 \cdot K}$						
		$\alpha_{вер}, \frac{Bm}{M^2 \cdot K}$						
	Бокова	Pr						
		Gr						
		Pr·Gr						
		Nu						
		$\alpha_{кб}, \frac{Bm}{M^2 \cdot K}$						
		$\alpha_{б}, \frac{Bm}{M^2 \cdot K}$						
			$P, Bm$					
			$\alpha, \frac{Bm}{M^2 \cdot K}$					

$R_m, K/Bm$					
-------------	--	--	--	--	--

## 1.2.2 Дослідження теплового режиму корпусу електронного апарата при вимушеній конвекції

1.2.2.1 Повторюються п. 1.2.1.1, 1.2.1.2 обчислення теплового режиму при вільній конвекції;

1.2.2.2 Вибирається швидкість руху теплоносія  $v = 0,5 \text{ м/с}$  (для повітря) або  $0,01 \text{ м/с}$  (для води), визначається коефіцієнт теплопровідності теплоносія при температурі навколишнього середовища (додаток А) та з допомогою співвідношення (1.10) обчислюється число Рейнольдса для верхньої і нижньої поверхонь;

**Примітка:** при виборі визначального розміру слід вважати, що теплоносії рухається горизонтально в напрямку довжини  $l_2$ .

1.2.2.3 Обчислюється число Прандтля при температурі навколишнього середовища  $Pr_f$  і температурі корпусу  $Pr_w$  та з допомогою співвідношення (1.11) (при  $Re < 5 \cdot 10^5$ ) або (1.12) (при  $Re > 5 \cdot 10^5$ ) визначається число Нусельта  $Nu_f$ ;

1.2.2.4 За допомогою співвідношення (1.7) визначається коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від нижньої і верхньої поверхонь  $\alpha_{кн} = \alpha_{кв}$  та загальний коефіцієнт тепловіддачі від цих поверхонь  $\alpha_n = \alpha_e$ ;

1.2.2.5 Повторюються п. 1.2.2.2 і 1.2.2.4 для бокових поверхонь при визначальному розмірі  $l = l_1 + l_2$ , обчислюється тепловий потік (1.14), який розсіюється корпусом при заданому перегріві і швидкості руху теплоносія та середній коефіцієнт тепловіддачі корпусу (1.15);

1.2.2.6 Обчислюється тепла характеристика корпусу для заданої швидкості руху теплоносія, для чого визначається тепловий потік при інших значеннях перегріву з кроком  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  до температури корпусу  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  (для металевих корпусів) або  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  (для пластмасових корпусів) та середній коефіцієнт віддачі за виразом (1.15);

1.2.2.7 Обчислюється тепла характеристика корпусу при швидкостях руху повітря  $v = 1$  і  $1,5 \text{ м/с}$  або води  $v = 0,02$  і  $0,03 \text{ м/с}$ .

Результати розрахунків заносяться у заготовку табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Теплова характеристика корпусу при вимушеній конвекції і швидкості руху теплоносія  $v = \dots \text{ м/с}$

		$\Delta t, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50
		$t_k, ^\circ\text{C}$					
		$\alpha_\theta, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$					
Поверхня	Нижня, верхня	Re					
		$\text{Pr}_f$					
		$\text{Pr}_w$					
		Nu					
		$\alpha_{\text{кн}}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$					
		$\alpha_n, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$					
	Бокова	Re					
		$\text{Pr}_f$					
		$\text{Pr}_w$					
		Nu					
		$\alpha_{\text{квер}}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$					
		$\alpha_{\text{вер}}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$					
		$P, \text{Вт}$					
		$\alpha, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$					
		$R_m, \text{К/Вт}$					

### 1.2.3 Оформлення результатів розрахунків

1.2.3.1 Накреслити в сумісній системі координат теплові характеристики корпусу  $P(t_k)$  при різній швидкості руху теплоносія.

1.2.3.2 Накреслити в сумісній системі координат залежність середнього коефіцієнта тепловіддачі корпусу від температури корпусу при різних швидкостях руху теплоносія.

1.2.3.3 Користуючись тепловими характеристиками, визначити температуру корпусу при заданій потужності і різних швидкостях руху теплоносія та накреслить графіки залежності  $t_k(v)$ .

1.2.3.4 Накреслити в сумісній системі координат графіки залежності теплового опору корпусу від його температури  $R_m(t_k)$  при різних швидкостях руху теплоносія.

### 1.3 Завдання до роботи

Вихідні дані для розрахунків слід вибрати згідно з варіантом з табл. 1.5.

### 1.4 Зміст звіту

1.4.1 Мета роботи і вихідні данні для розрахунків згідно з варіантом завдання.

1.4.2 Таблиці з результатами розрахунків теплової характеристики корпусу при вільній і вимушеній конвекції.

1.4.3 Графіки залежності середнього коефіцієнту тепловіддачі від швидкості руху теплоносія.

1.4.4 Теплові характеристики корпусу  $P(t_k)$  при різній швидкості руху теплоносія.

1.4.5 Графік залежності температури корпусу від швидкості руху теплоносія при заданій потужності.

1.4.6 Графік залежності теплового опору корпусу від його температури і швидкості руху теплоносія.

1.4.7 Висновки, які стосуються: порівняння коефіцієнтів тепловіддачі випромінюванням і конвекцією, впливу швидкості руху теплоносія на тепловий режим корпусу та залежності теплового опору корпусу від температури навколишнього середовища і швидкості руху теплоносія.

Таблиця 1.5 – Вихідні дані для обчислення теплового режиму поверхні корпусу електронного апарата

№ вар	Клімат. виконання	Тепло-носії	Матеріал корпусу	Покриття корпусу	L1×L2×h, мм
1	У	повітря	сталь	лак мат.	350×280×125
2	Т	вода	Д16	емаль гляnc.	380×250×220
3	ОМ	вода	полістирол	матове	400×225×100
4	УХЛ	повітря	Д16	Ан. Окс.	300×220×200
5	ТМ	вода	сталь	нікель	220×200×75
6	В	повітря	полістирол	матове	325×275×160
7	Т	повітря	полістирол	гляncеве	300×200×180
8	УХЛ	вода	Д16	поліроване	320×220×60
9	У	повітря	сталь	Хім. Окс	350×210×100
10	В	вода	полістирол	гляncеве	220×200×55
11	ОМ	повітря	полістирол	матове	220×120×60
12	ТМ	повітря	сталь	емаль гляnc.	285×215×115
13	УХЛ	вода	Ал2.	Ан. Окс.	355×275×150
14	Т	вода	сталь	нікель	250×220×200
15	В	повітря	Д16	лак матовий	150×75×50
16	У	вода	сталь	Хім. Окс	315×250×80
17	ОМ	повітря	Л68	емаль матова	280×220×70
18	ТМ	вода	полістирол	матове	265×200×70
19	УХЛ	повітря	ЛС59-1	емаль гляnc.	315×200×100
20	В	вода	сталь	Хім. Окс.	330×120×75

## 1.5 Контрольні запитання

1.5.1 Що таке тепловіддача і тепловий режим? Якими механізмами відводиться тепло в електронних апаратах?

1.5.2 Якими законами описуються різні механізми теплопередачі?

1.5.3 Які параметри матеріалів і конструкцій використовуються в цих законах?

1.5.4 Що таке теорія подібності? Як вона використовується при обчисленні теплових режимів?

1.5.5 Які критерії (числа) подібності використовуються при обчисленні тепловіддачі при вільній конвекції і які при вимушеній? Що вони характеризують?

1.5.6 Як впливає режим тепловіддачі конвекцією на вид критеріальних рівнянь?

1.5.7 Чому при обчисленні теплових режимів використовуються теплові характеристики? Як їх застосовують?

1.5.8 Порівняйте можливості відведення тепла випромінюванням вільною та вимушеною конвекцією? Як впливає на них вид теплоносія?

1.5.9 Як вибираються визначальні розміри при вільній і вимушеній конвекції?

1.5.10 Поясніть хід обчислених графіків.

## 2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ВУЗЛА

**Мета роботи:** ознайомитись з методами спрощення теплових моделей функціональних вузлів РЕЗ, отримати практичні навички теплових розрахунків елементів.

### 2.1 Теоретичні відомості

Для проведення теплових розрахунків елементів та функціональних вузлів РЕЗ використовуються теплові моделі, при складанні яких враховуються наступні принципи спрощення.

#### 2.1.1 Принцип суперпозиції (накладення)

Якщо функціональний вузол являє собою сукупність декількох дискретних (локалізованих) джерел тепла, то при розрахунку температурного режиму вузла розглядається окремо вплив кожного джерела:

$$t_k = t_c + t_{kдж} + \sum \Delta t_{iдж} \quad (2.1)$$

де:  $t_k$  - температура корпусу функціонального вузла,

$t_c$  - температура середовища,

$t_{kдж}$  - температура  $k$ -го джерела у випадку, коли у функціональному вузлі нема інших джерел тепла,

$\Delta t_{iдж}$  - перепад температур, який з'являється у місті розташування  $k$ -го джерела при включені  $i$ -го джерела.

Рішення задачі для одного джерела:

$$t_k = t_c + R_{tk} \cdot P_k + \sum_{i=1}^n F_{tki} \cdot P_i \quad (2.2)$$

де:  $R_{tk}$  - тепловий опір  $k$ -го джерела,

$P_k$  - потужність  $k$ -го джерела,

$F_{tki}$  - тепловий коефіцієнт  $i$ -го джерела, який визначає вплив  $i$ -го джерела у перегрів  $k$ -го.

На рис. 2.1 зображено розподіл температурного поля для двох джерел тепла. На рис. 2.1 б – зображено температурне поле,

створюване першим джерелом, на рис. 2.1 в – другим, на рис. 2.1 г – сумарне.

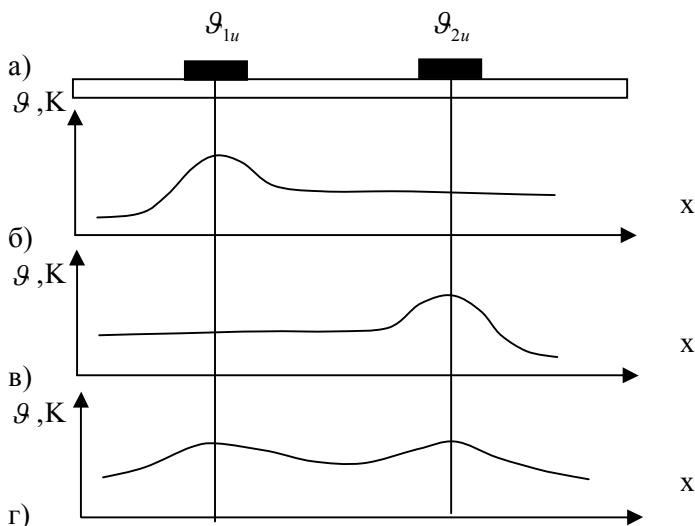


Рисунок 2.1 – Розподіл температурного поля від двох локальних джерел тепла

### 2.1.2 Принцип місцевих впливів

Кожне місцеве збурювання температурного поля є локальним, тобто не розповсюджується на віддалені ділянки поля.

Незалежно від форми джерела тепла температурне поле на достатньому віддаленні приймає форму сфери у тривимірному випадку або циліндра у двовимірному (див. рис. 2.2).

При віддаленні від джерела тепла, розповсюдженого на пластині, тривимірне температурне поле перетворюється у двовимірне. Якщо ж температурне поле поблизу джерела тепла було двовимірним, тоді удалині від джерела воно стане одновимірним. Відстань, на якій відбувається процес вирівнювання температурного поля, приблизно дорівнює товщині пластини (див. рис. 2.3).

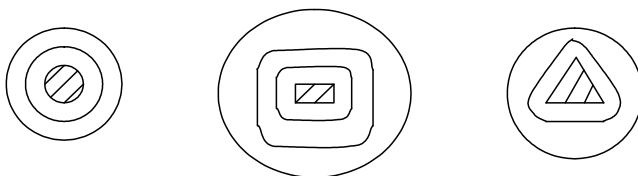


Рисунок 2.2 – Розподіл температурного поля від довільного джерела тепла

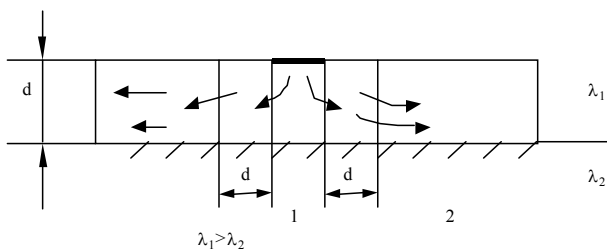


Рисунок 2.3 – Розподіл температурного поля від джерела тепла, розташованого на пластині

### 2.1.3 Принцип квазіізотермічних поверхонь

При розрахунку теплових перепадів багат шарових структур перепади на наступних шарах можна розраховувати виходячи з рівномірного розподілу температур на попередніх (див. рис. 2.4).

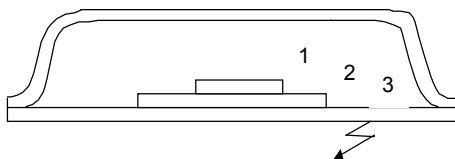


Рисунок 2.4 – Квазіізотермічні поверхні

При цьому перегрів кожної наступної поверхні можна визначити через параметри попередньої за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{G}_{12} &= P_U R_{T12} \\ \mathcal{G}_{23} &= P_U R_{T23} \\ \mathcal{G}_{3C} &= P_U R_{T3C} \\ R_{T3C} &= \frac{1}{\alpha S_3} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

#### 2.1.4 Принцип електротеплової аналогії

Систему тіл, у яких виконується теплообмін, можна розглядати як тепловий ланцюг по аналогії з електричними ланцюгами. Теплові ланцюги поділяються на ланцюги з зосередженими та розподіленими параметрами. В ланцюгах з зосередженими параметрами термічний опір, ємності та джерела теплоти умовно зосереджуються у окремих точках тіл.

Елементи теплового ланцюга поділяються на активні (джерела теплоти) і пасивні (термічні опори та ємності).

Термічні опори (провідності) визначають лінійну залежність між тепловим потоком і різницею температур на їх полюсах:

$$\Phi = \frac{\Delta t_{ij}}{R_{ij}} = \Delta t_{ij} \cdot \sigma_{ij} \quad (2.4)$$

Термічні ємності ураховують зміну ентальпії  $\Phi_{ci}$  області  $i$  при нестационарних процесах.

Теплова схема представляє собою графічне зображення теплового ланцюга і показує з'єднання її активних та пасивних елементів.

Для зображення елементів на теплових схемах використовуються позначення, аналогічні застосовуваним у електротехніці. Ці позначення представлені у табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Електротеплова аналогія

Величина, параметр	Електрична	$U$	$I$	$R$	$C$	$\sigma$
	Теплова	$t$	$P$	$R_m$	$C_m$	$\lambda$

Для лінійних *теплових провідностей*  $\sigma_{ij} = R_{ij}^{-1}$  справедлива наступна залежність між тепловим  $\Phi_\sigma$  потоком та різницею температур  $\Delta t_{ij}$  на її полюсах  $i, j$ :

$$\Phi_\sigma = \sigma_{ij} \cdot \Delta t_{ij} = \frac{\Delta t_{ij}}{R_{ij}} \quad (2.5)$$

*Теплова ємність*  $C_i$  враховує зміну ентальпії  $\Phi_{ci}$  області  $i$  при нестационарних процесах:

$$\Phi_{cij} = C_{ij} \cdot \frac{dt_i}{d\tau} \quad (2.6)$$

Для теплового ланцюга, також як і для електричного, справедливі закони Кірхгофа.

Алгебраїчна сума теплових потоків  $\Phi_i$  у вузлі теплового ланцюга дорівнює нулю (*перший закон Кірхгофа*):

$$\sum \Phi_i = 0; \quad (2.7)$$

При цьому знаки потоків беруться з урахуванням вибраних напрямків: потокам, що направлені до вузла, приписуються однакові знаки - наприклад, позитивний. Перший закон Кірхгофа можна застосовувати не тільки до вузла, але і до кожного контуру або замкнутої поверхні, що охоплює частку теплового ланцюга.

Алгебраїчна сума різниці температур на гілках у кожному замкнутому контурі теплового ланцюга дорівнює нулю (*другий закон Кірхгофа*):

$$\sum \Delta T_i - \sum_j \Delta t_{ij} = 0 \quad (2.8)$$

де  $\Delta T_i$  - продуктивність джерела теплового потоку у  $i$ -ої гілки теплової схеми;

$\Delta t_{ij}$  - різниця температур вузлів схеми, яка з'єднує елемент  $j$ -ої гілки.

При розрахунку теплових ланцюгів, також як і електричних, часто перетворюють ці ланцюги у більш прості та зручні для роботи.

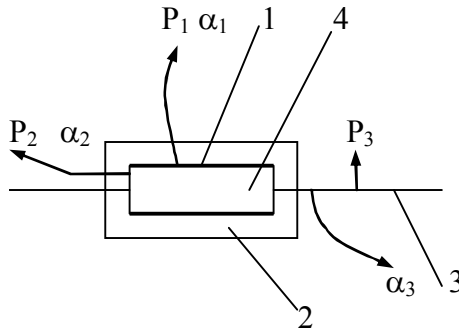
Так, послідовні та паралельні з'єднання опорів зручно замінити загальним опором  $R$  та провідністю  $\sigma$ :  $R = \sum R_k$ ,  $\sigma = \sum \sigma_k$ .

### 2.1.5 Розрахунок теплових режимів електрорадіоелементів

Для розрахунку теплових режимів ЕРЕ представляють у вигляді теплових моделей, при складанні яких використовуються усі вищезазначені принципи.

#### 2.1.5.1 Теплова модель резистора

Конструкція резистора зображена на рис. 2.5.



1 - резистивний шар, 2 – ізоляційний шар, 3 – виводи, 4 - основа.

Рисунок 2.5 – Конструкція резистора

На рис. 2.5:

–  $P_1$  - теплова потужність, яка передається від резистивного шару, нанесеного на бокову поверхню основи циліндричної форми, через ізоляційний шар у навколишнє середовище;

–  $\alpha_1$  - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої циліндричної поверхні ізоляційного шару у навколишнє середовище;

–  $P_2$  - теплова потужність, яка передається від плоских поверхонь основи через ізоляційний шар у навколишнє середовище;

–  $\alpha_2$  - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішніх плоских поверхонь ізоляційного шару у навколишнє середовище;

–  $P_3$  - теплова потужність, яка передається від виводів резистора циліндричної форми у навколишнє середовище;

–  $\alpha_3$  - коефіцієнт тепловіддачі від виводів резистора циліндричної форми у навколишнє середовище.

Теплова модель резистора, складена з урахуванням принципу електротеплової аналогії, приведена на рис. 2.6.

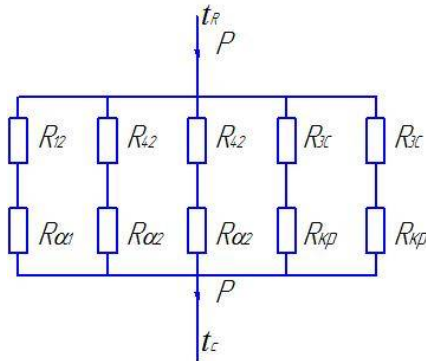


Рисунок 2.6 – Теплова модель резистора

При складанні цієї моделі враховані:

-  $R_{12}$  - тепловий опір переходу *резистивний шар - ізолятор* по циліндричній поверхні,

-  $R_{01}$  - тепловий опір переходу *ізолятор – середовище* по циліндричній поверхні,

-  $R_{42}$  - тепловий опір переходу *резистивний шар - ізолятор* для двох плоских поверхонь (бокових стінок),

-  $R_{02}$  - тепловий опір переходу *ізолятор – середовище* для двох плоских поверхонь,

-  $R_{3c}$  - тепловий опір *двох циліндричних виводів*

-  $R_{cp}$  - опір *кріплень виводів*.

Враховуючи з'єднання окремих теплових опорів (згідно схеми на рис. 2.6), сумарний тепловий опір *резистивний шар – середовище* можна визначити за формулою:

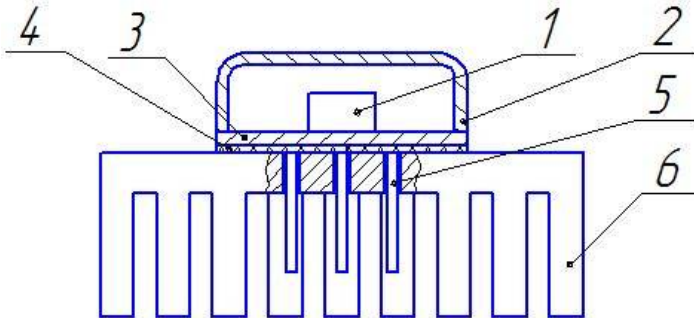
(2.9)

Знаючи сумарний тепловий опір резистора, можна визначити температуру резистивного шару за формулою:

$$t_R = t_C + P \cdot R_{\Sigma} \quad (2.11)$$

### 2.1.5.2 Теплова модель транзистора на радіаторі

Конструкція транзистора на радіаторі наведена на рис. 2.7.



1 - транзистор (р-п перехід), 2 - кришка корпусу, 3 - основа, 4 - ізоляційна прокладка, 5 - виводи, 6 - радіатор

Рисунок 2.7 – Конструкція транзистора на радіаторі

Цій конструкції відповідає теплова модель, що приведена на рис. 2.8. Тут враховуються опори:

- $R_{TO}$  - опір р-п перехід – основа корпусу;
- $R_O$  - опір основи корпусу;
- $R_{OI}$  - опір основа корпусу - ізоляційна прокладка;

- $R_I$  - опір ізоляційної прокладки;
- $R_{IP}$  - опір ізоляційна прокладка - радіатор;
- $R_P$  - опір радіатора;
- $R_{Ш1} \dots R_{Шn}$  - опори штирів радіатора (n штук);
- $R_{B1} \dots R_{B3}$  - опори виводів транзистора (3 штуки);
- $R_K$  - опір кришки корпусу.

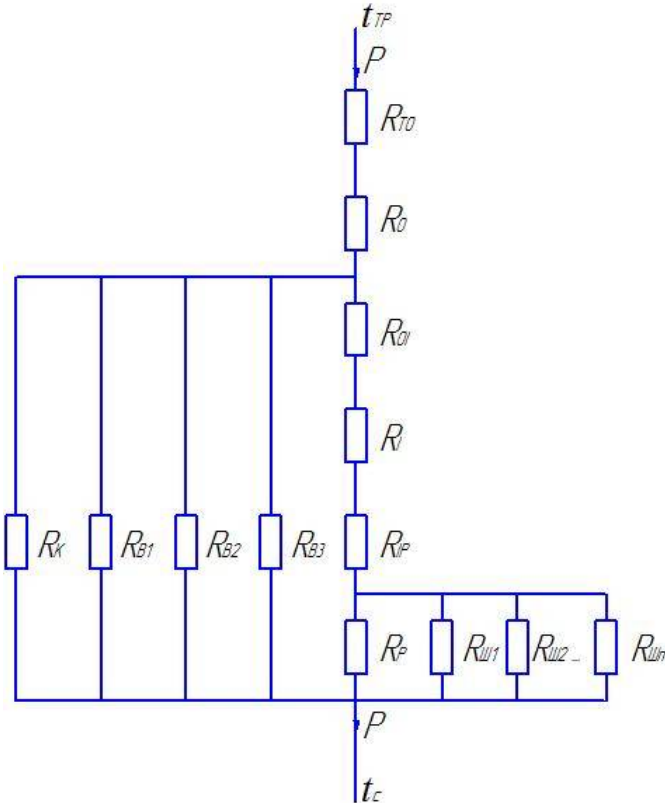


Рисунок 2.8 – Теплова модель транзистора на радіаторі

При цьому враховуються наступні допущення:

- опори  $R_O$ ,  $R_I$  та  $R_P$  розраховуються як для плоских стінок;
- при розрахунку  $R_P$  не враховуються опори штирів радіатора;

- опори штирів  $R_{Ш}$  та виводів  $R_B$  розраховуються як для теплоізовльованих стрижнів  $\left(\frac{dT}{dt} = 0\right)$ .

Враховуючи з'єднання окремих теплових опорів (згідно схеми на рис. 2.8) сумарний тепловий опір *p-n перехід – середовище* можна визначити за формулою:

(2.12)

Знаючи сумарний тепловий опір транзистора, можна визначити температуру *p – n* переходу за формулою:

(2.13)

### 2.1.6 Розрахунок теплових опорів найпростіших моделей

Температуру будь-якої поверхні можна визначити за загальною формулою:

$$t_{п} = t_{с} + \Delta t \quad (2.14)$$

де  $t_{с}$  - температура середовища;  
 $\Delta t$  - перепад температур.

Перепад температур визначається за формулою:

$$\Delta t = R_T \cdot P \quad (2.15)$$

де  $R_T$  – тепловий опір.

Нижче наведені формули розрахунків  $R_T$  для найпростіших моделей.

**2.1.6.1 Тепловий опір при тепловіддачі від плоскої поверхні у навколишнє середовище (рис. 2.9)**

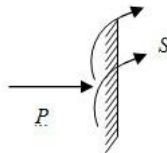


Рисунок 2.9 – Тепловіддача від плоскої поверхні в навколишнє середовище

Тепловий опір визначається за формулою:

$$R_T = \frac{1}{\alpha \cdot S} \quad (2.16)$$

де:  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, включає до себе конвективну та променеву складові:  $\alpha = \alpha_K + \alpha_B$  ;  
 $S$  – площа контакту поверхні з навколишнім середовищем.

### 2.1.6.2 Тепловий опір при теплопередачі через плоску стінку (рис. 2.10)

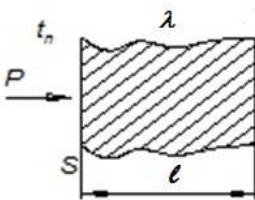


Рисунок 2.10 – Теплопередача через плоску стінку

Тепловий опір визначається за формулою:

$$R_T = \frac{l}{\lambda \cdot S} \quad (2.17)$$

де:  $l$  – довжина теплового шляху;  
 $\lambda$  – теплопровідність матеріалу;  
 $S$  – площа поперечного перетину стінки.

### 2.1.6.3 Тепловий опір при теплопередачі через циліндричну поверхню

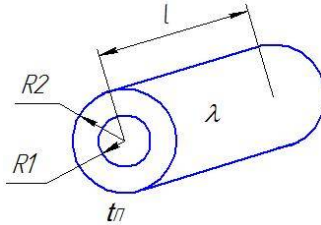


Рисунок 2.11 – Теплопередача через циліндричну поверхню

Тепловий опір визначається за формулою:

$$R_T = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda \cdot l} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.18)$$

де:  $r_1, r_2$  – внутрішній та зовнішній радіуси циліндру.

#### 2.1.6.4 Тепловий опір при теплопередачі через сферичну поверхню

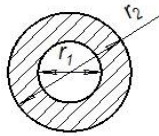


Рисунок 2.12 – Теплопередача через сферичну поверхню

Тепловий опір визначається за формулою:

$$R_T = \frac{1}{4\pi \cdot \lambda} \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.19)$$

де:  $r_1, r_2$  – внутрішній та зовнішній радіуси сфери.

#### 2.1.6.5 Тепловий опір при теплопередачі через закорочений стрижень (на кінці стрижня $t = 0$ )

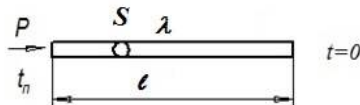


Рисунок 2.13 – Теплопередача через закорочений стрижень

$$R_T = \frac{t_n(m \cdot l)}{S \cdot \lambda \cdot m} \quad (2.20)$$

де:  $l$  - довжина стрижня;  
 $S$  - площа перерізу стрижня;  
 $\lambda$  - теплопровідність матеріалу;  
 $m$  - коефіцієнт, який розраховується за формулою:

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \Pi}{\lambda \cdot S}} \quad (2.21)$$

де:  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі від торцевої поверхні стрижня  
 $\Pi$  - периметр перерізу стрижня.

Якщо  $m \cdot l > 2$ , то можна вважати, що  $t_n(m \cdot l) = 1$ , та формула 2.20 приймає спрощений вигляд:

$$R_T = \frac{1}{S \cdot m \cdot \lambda} \quad (2.22)$$

**2.1.6.6 Тепловий опір при теплопередачі через теплоізований стрижень (на кінці стрижня  $dT/dt = 0$ )**

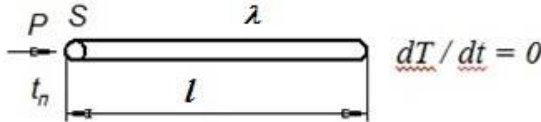


Рисунок 2.14 – Теплопередача через теплоізований стрижень

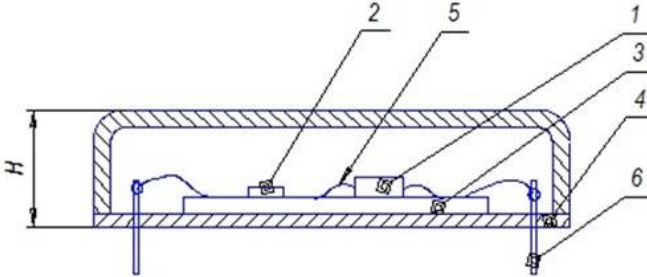
$$R_T = \frac{1}{S \cdot \lambda \cdot m} \cdot \frac{1}{t_n(m \cdot l)} \quad (2.23)$$

Якщо  $m \cdot l > 2$ , то можна вважати, що  $t_n(m \cdot l) = 1$ , та формула 2.22 приймає спрощений вигляд:

$$R_T = \frac{1}{S \cdot m \cdot \lambda} \quad (2.24)$$

## 2.2 Завдання до роботи

2.2.1 Для заданого функціонального вузла (див. рис. 2.15) скласти теплову модель.



1 - транзистор (р-п перехід); 2 - резистивний шар; 3 - підкладка; 4 - корпус; 5 - виводи транзистора ( $n_5 = 3$ ); 6 - виводи мікрозбірки ( $n_6$ )

Рисунок 2.15 – Конструкція функціонального вузла

При цьому використовувати принципи спрощення та електротеплову аналогію.

При складанні теплової схеми враховувати наступні допущення:

- перехідними опорами р-п перехід-підкладка, резистивний шар-підкладка та підкладка-основа корпусу знехтувати;
- р-п перехід, резистивний шар, підкладку та основу корпусу вважати плоскими стінками;
- виводи транзистора вважати закороченими стрижнями;
- виводи мікрозбірки вважати теплоізованими стрижнями.

2.2.2 Розрахувати теплові опори, які входять у теплову модель:

- для зовнішньої (верхньої та бокової) поверхні корпусу за формулою 2.16;
  - для плоских стінок за формулою 2.15;
  - для виводів транзистора за формулою 2.22;
  - для виводів мікрозбірки за формулою 2.24.
- Коефіцієнт  $m$  розрахувати за формулою 2.21.

**Примітка.** При розрахунку теплових опорів підкладки та основи корпусу для р-п переходу і резистивного шару площу перерізу розраховувати за розмірами відповідних шарів.

2.2.3 Скласти рівняння для розрахунку сумарного теплового опору та визначити його чисельне значення.

2.2.4 Розрахувати перегрів та температури для р-п переходу та резистивного шару і порівняти їх із припустимими. Зробити висновок про забезпечення теплового режиму функціонального вузла.

Вихідні дані для розрахунків вибирати згідно з варіантом з табл. 2.1 - 2.3. Позначення у табл. 2.1 - 2.3:

–  $P_1, P_2$  - потужності, які виділяються у р-п переході та резистивному шарі відповідно;

–  $[t_1], [t_1]$  - допустимі температури р-п переходу та резистивного шару відповідно;

–  $h_1$  - товщина р-п переходу;

–  $h_2$  - товщина резистивного шару;

–  $h_3$  - товщина підкладки;

–  $h_4$  - товщина основи корпусу;

–  $S_1$  - площа р-п переходу;

–  $S_2$  - площа резистивного шару;

–  $S_3$  - площа підкладки;

–  $S_4$  - площа основи корпусу;

–  $H$  - висота корпусу;

–  $\alpha_4$  - коефіцієнт тепловіддачі від стінок корпусу у навколишнє середовище;

–  $\alpha_5$  - коефіцієнт тепловіддачі від виводу транзистора у навколишнє середовище;

–  $\alpha_6$  - коефіцієнт тепловіддачі від виводу мікрозбірки у навколишнє середовище;

–  $d_5, d_6$  - діаметр виводу відповідно транзистора та мікрозбірки;

–  $l_5, l_6$  - довжина виводу відповідно транзистора та мікрозбірки;

–  $n_5, n_6$  - кількість виводів відповідно транзистора та мікрозбірки;  $n_5 = 3$ .

Значення теплопровідностей матеріалів приведені у додатку Г.

Таблиця 2.1 - Параметри транзисторного та резистивного шарів

Вар	Клім. викон	Транзистор						Виводи транзистору			
		$P_1, \text{Вт}$	$[t_1], \text{°C}$	$h_1, \text{мм}$	$L_1 \times B_1, \text{мм}$		матеріал	$d_5, \text{мм}$	$l_5, \text{мм}$	матеріал	$\alpha_5, \text{Вт/м}^2 \text{К}$
1	УХЛ2.1	0,60	130	0,5	0,7	0,7	Si	0,03	3,0	Au	7,6
2	В 4.1	0,20	80	0,6	1,0	0,8	Ge	0,04	4,0	Ag	5,4
3	УХЛ5.1	0,60	145	1,6	0,8	0,5	Si	0,05	3,5	Au	6,8
4	В 3.1	0,80	150	1,0	0,5	0,3	Si	0,05	5,5	Ag	7,8

5	УХЛ4.2	0,80	75	1,2	0,9	0,8	Ge	0,04	5,0	Au	8,2
6	УХЛ1.1	0,60	140	0,6	0,8	0,8	Si	0,03	4,5	Ag	5,6
7	В 2.1	0,36	85	1,6	1,2	0,7	Ge	0,04	6,0	Au	6,4
8	УХЛ4.1	0,90	150	0,8	1,0	0,6	Si	0,03	5,5	Ag	5,0
9	В 4.1	0,25	80	0,8	0,8	0,6	Ge	0,05	6,5	Au	6,6
10	Т4.1	0,55	85	1,3	1,2	1,0	Ge	0,04	4,5	Ag	8,0
11	В 4.2	0,45	135	0,5	0,8	0,5	Si	0,05	3,5	Au	7,2
12	УХЛ1.1	0,30	85	1,5	1,2	1,0	Ge	0,03	3,0	Ag	6,7
13	УХЛ2.1	0,75	145	1,4	0,9	0,5	Si	0,05	4,0	Au	5,9
14	В 4.1	1,00	135	0,8	0,6	0,5	Si	0,03	4,5	Ag	8,4
15	УХЛ5.1	0,80	125	0,9	0,6	0,6	Si	0,04	5,5	Au	6,1
16	УХЛ3.1	0,60	130	0,6	0,7	0,5	Si	0,03	5,0	Ag	5,7
17	УХЛ4.2	0,36	80	1,6	1,2	0,9	Ge	0,05	6,0	Au	8,8
18	В 1.1	0,40	130	1,2	0,6	0,6	Si	0,04	3,5	Ag	6,3
19	УХЛ2.1	0,25	75	0,8	0,7	0,7	Ge	0,04	4,5	Au	5,1
20	УХЛ4.1	0,65	140	1,2	0,8	0,8	Si	0,03	5,0	Ag	6,0

Таблиця 2.2 - Параметри підкладки та корпусу

Вар.	Резистивний шар						Підкладка	
	P <sub>2</sub> , Вт	[t <sub>2</sub> ], °C	h <sub>2</sub> , мм	L <sub>2</sub> , мм	B <sub>2</sub> , мм	матеріал	h <sub>3</sub> , мм	матеріал
1	1,20	180	0,10	0,5	0,5	PC5006	0,6	полікор
2	0,50	200	0,15	0,6	0,4	PC5402	1,0	22XC
3	0,50	175	0,10	0,7	0,3	PC3710	1,6	полікор
4	0,70	155	0,12	0,6	0,1	PC4800	0,6	BeO
5	1,20	175	0,15	0,3	0,3	PC5006	1,0	MgO
6	0,70	225	0,13	0,8	0,5	PC5402	1,6	22XC
7	0,70	195	0,06	0,4	0,4	PC3710	0,6	полікор
8	0,45	170	0,15	0,9	0,3	PC4800	1,0	22XC
9	1,20	150	0,11	0,6	0,3	PC5006	1,6	BeO
10	0,85	155	0,12	0,4	0,4	PC5402	0,6	MgO
11	0,25	150	0,14	0,8	0,2	PC3710	1,0	22XC
12	0,65	170	0,13	0,6	0,6	PC4800	1,6	полікор
13	0,75	225	0,10	0,7	0,4	PC5006	0,6	22XC
14	0,85	215	0,08	0,6	0,6	PC5402	1,0	BeO
15	0,50	180	0,09	0,4	0,1	PC3710	1,6	MgO
16	0,75	165	0,15	0,5	0,5	PC4800	0,6	22XC
17	0,50	210	0,12	0,6	0,2	PC5006	1,0	полікор
18	0,70	180	0,14	0,5	0,2	PC5402	1,6	BeO
19	0,95	155	0,10	0,8	0,7	PC3710	0,6	MgO

20	0,80	180	0,08	0,6	0,6	PC4800	1,0	22XC
----	------	-----	------	-----	-----	--------	-----	------

Таблиця 2.3 - Кліматичне виконання та параметри виводів

Var	Корпус						Виводи мікросбірки				
	h <sub>4</sub> , мм	H, мм	L <sub>4</sub> xВ <sub>4</sub> , мм		матеріал	α <sub>4</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	d <sub>6</sub> , мм	l <sub>6</sub> , мм	n <sub>6</sub>	матеріал	α <sub>6</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К
1	1,0	5,0	12,0	19,5	Al	28,6	0,1	10	14	Al	8,4
2	0,8	7,5	14,5	19,5	ковар	17,4	0,2	15	10	ковар	9,2
3	1,2	5,0	19,5	22,0	Al	10,2	0,1	10	16	Al	7,9
4	0,6	7,5	19,5	29,5	ковар	12,6	0,2	15	24	ковар	8,8
5	1,0	5,0	7,0	14,5	Al	11,2	0,1	10	14	Al	7,7
6	0,8	7,5	14,5	19,5	ковар	15,6	0,2	15	16	ковар	8,1
7	1,2	5,0	19,5	22,0	Al	12,4	0,1	10	14	Al	9,3
8	0,6	7,5	19,5	29,5	ковар	10,8	0,2	15	10	ковар	7,6
9	1,0	5,0	7,0	14,5	Al	22,6	0,1	10	24	Al	8,2
10	0,8	7,5	12,0	19,5	ковар	11,1	0,2	15	36	ковар	8,9
11	1,2	5,0	19,5	22,0	Al	15,8	0,1	15	14	Al	9,9
12	0,6	7,5	19,5	29,5	ковар	30,4	0,2	10	16	ковар	7,3
13	1,0	5,0	7,0	14,5	Al	20,7	0,1	15	10	Al	8,5
14	0,8	7,5	12,0	19,5	ковар	22,6	0,2	10	24	ковар	9,1
15	1,2	5,0	14,5	19,5	Al	31,2	0,1	15	32	Al	7,2
16	0,6	7,5	19,5	29,5	ковар	20,4	0,2	10	14	ковар	7,5
17	1,0	5,0	7,0	14,5	Al	12,0	0,1	15	10	Al	8,4
18	0,8	7,5	7,0	14,5	ковар	18,5	0,2	10	14	ковар	9,7
19	1,2	5,0	14,5	19,5	Al	31,3	0,1	15	16	Al	7,1
20	0,6	7,5	19,5	29,5	ковар	10,9	0,2	10	10	ковар	9,0

## 2.3 Зміст звіту

2.3.1 Мета роботи та вихідні дані для розрахунків.

2.3.2 Ескіз функціонального вузла.

2.3.3 Теплова модель функціонального вузла.

2.3.4 Розрахунки теплових опорів елементів теплової моделі.

2.3.4 Розрахунки еквівалентних теплових опорів р-п переходу та резистивного шару.

2.3.5 Розрахунки температур р-п переходу та резистивного шару.

2.3.6 Висновки.

## 2.4 Контрольні запитання

2.4.1 Наведіть та поясніть закон Фур'є. Який спосіб теплопередачі він описує?

2.4.2 У чому полягає механізм передачі тепла за рахунок теплопровідності? У яких середовищах він спостерігається?

2.4.3 Що таке теплова модель та для чого вона використовується?

2.4.4 У чому полягає принцип суперпозиції теплових полей?

2.4.5 У чому полягає принцип місцевих впливів?

2.4.6 У чому полягає принцип квазітермічних поверхонь?

2.4.7 Що таке електротеплова аналогія?

2.4.8 Навести елементи теплового ланцюга, їх позначення та електричні аналоги.

2.4.9 Наведіть закони Кірхгофа для теплових ланцюгів.

2.4.10 Які застосовуються еквівалентні перетворення з'єднань теплових опорів?

2.4.11 Аналогом якого закону для електричних ланцюгів є закон Фур'є? Як за його допомогою визначити температури у заданих точках теплового ланцюгу?

2.4.12 Привести та пояснити теплову модель резистора.

2.4.13 Привести та пояснити теплову модель транзистора на радіаторі.

2.4.14 Привести та пояснити теплову модель функціонального вузла.

2.4.15 Як розраховується тепловий опір плоскої стінки?

2.4.16 Як розраховується тепловий опір циліндричної поверхні?

2.4.17 Як розраховується тепловий опір сферичної поверхні?

2.4.18 Як розраховується тепловий опір закороченого стрижня?

2.4.19 Як розраховується тепловий опір теплоізованого стрижня?

2.4.20 Як розраховується тепловий опір від плоскої стінки в навколишнє середовище?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Теплові процеси в електроніці / Ю. Я. Бобало, В. Вуйцик, З.Ю. Готра та інші; за ред. З.Ю. Готри. - Львів: Ліга-Прес, 2007. - 360 с.

2. Бобало Ю.Я. Якість, надійність радіоелектронної апаратури. Елементи теорії і методи забезпечення: монографія / Ю.Я. Бобало, Л.А. Недоступ, М.Д. Кіселичник; за ред. Л.А. Недоступа. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 196 с.
3. Моделювання теплових процесів в РЕА: навчальний посібник / О. І. Нікольський, О. П. Шеремета. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 116 с.
4. Дульнев Г.Н. Тепло-масообмен в радиоэлектронной аппаратуре.– М.: Высш.Шк., 1984 – 247 с.
5. Роткоп Л. Л. Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Советское радио, 1976. –232 с.
6. Будник А. Ф. Тепломасоперенос у процесах і матеріалах дизайну матеріалів: Навчальний посібник / А. Ф. Будник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 158 с.
7. Ганжа С. М. Основи конструювання електронних засобів : підручник / С. М. Ганжа; Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. - Луганськ, 2011. - 491 с.

## Додаток А

Таблиця А.1 – Теплофізичні параметри повітря для різних температур при тиску 101,3 кПа

$t$ , $^{\circ}C$	$\rho$ , $кг/м^3$	$C_p$ , $Дж/кг \cdot K$	$\lambda$ , $Вт/м \cdot K$	$\nu$ , $м^2/с$	Pr
-50	1,584	1010	0,0204	0,00000923	0,728
-20	1,395	1010	0,0228	0,00001279	0,716
0	1,293	1000	0,0244	0,00001328	0,707
10	1,247	1000	0,0251	0,00001416	0,705
20	1,205	1000	0,0260	0,00001506	0,703
30	1,165	1000	0,0268	0,00001600	0,701
40	1,128	1000	0,0276	0,00001696	0,699
50	1,093	1000	0,0283	0,00001795	0,698
60	1,060	1000	0,0290	0,00001897	0,696
70	1,029	1000	0,0297	0,00002002	0,694
80	1,000	1000	0,0305	0,00002109	0,692
90	0,972	1000	0,0313	0,00002210	0,690
100	0,946	1000	0,0321	0,00002313	0,688
120	0,898	1000	0,0334	0,00002545	0,686

Таблиця А.2 – Теплофізичні параметри води для різних температур на лінії насичення

$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$C_p, \text{ Дж/кг}$	$\lambda, \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	$\nu, \text{ м}^2/\text{с}$	$\beta, \text{ 1/К}$	$\sigma, \text{ Н/м}$	Pr
0	999,9	4212	0,551	0,000001789	-0,000063	0,07564	13,67
10	999,7	4191	0,574	0,000001306	0,000070		9,52
20	998,2	4183	0,599	0,000001004	0,000182	0,07269	7,02
30	995,7	4174	0,618	0,000000802	0,000321		5,42
40	992,2	4174	0,635	0,000000653	0,000387	0,06965	4,31
50	998,1	4174	0,648	0,000000549	0,000449		3,54
60	983,2	4179	0,659	0,000000469	0,000511	0,06622	2,98
70	977,0	4187	0,668	0,000000406	0,000507		2,55
80	971,8	4195	0,674	0,000000355	0,000632	0,06259	2,21
90	965,3	4208	0,680	0,000000315	0,000695		1,95
100	958,4	4220	0,683	0,000000283	0,000752	0,05886	1,75
110	951,0	4233	0,635	0,000000259	0,000808		1,6
120	943,1	4250	0,686	0,000000252	0,000864		1,47
150	917,0	4313	0,684	0,000000203	0,001030	0,04866	1,17

## Додаток Б

Таблиця Б.1 – Коефіцієнти чорноти для різних поверхонь та матеріалів

Матеріал	Покриття	Коефіцієнт чорноти	
		від	до
сталь	Нікелеве	0,05	0,07
сталь	Хім. Окс	0,86	0,92
Д16	Ан.Окс	0,20	0,40
Д16	полірована пов.	0,04	0,06
метали	лак чорний мат.	0,96	0,98
метали	емалі матові	0,92	0,96
метали	емалі глянцеві	0,92	0,92
метали	муар чорний, сірий	0,86	0,90
пластмаси	матові	0,60	0,80
пластмаси	глянцеві	0,50	0,75

## Додаток В

Таблиця В.1 – Граничні температури середовища для різних умов експлуатації та категорій приміщень (згідно з ГОСТ 15150-69)

Кліматичне виконання	Категорія розміщення	Верхня температура, °С	
		робоча	гранична
У	5; 5.1	+ 35	+ 35
У	усі інші	+ 40	+ 45
УХЛ	5; 5.1	+ 35	+ 35
УХЛ	3.1; 4.1; 4.2	+ 35	+ 40
УХЛ	усі інші	+ 40	+ 45
Т	усі	+ 50	+ 60
ТМ	усі	+ 45	+ 45
ОМ	усі	+ 45	+ 45
В	усі	+ 50	+ 60

## Додаток Г

Таблиця Г.1 – Значення теплопровідності для різних матеріалів

Матеріал	Теплопровідність $\lambda$ , Вт / м К	
	від	до
Алюміній, Al	230	236
Золото, Au	310	318
Срібло, Ag	420	429
Кремній, Si	120	130
Германій, Ge	52	58
Ковар	17	21
Резистивні плівки марок РС5006, 5402, 3710, 4800	68	74
Полікор	25	38
BeO	205	211
MgO	236	242
Сплав 22ХС	18	20