

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет



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.: Огренич Е.В., Поспеева І.Є. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 40 с.

Укладачі: Огренич Євген Вікторович, канд. техн. наук,
ст..викладач;
Поспеева Ірина Євгенівна, ст. викладач

Рецензент: Фарафонов Олексій Юрійович, канд. техн. наук,
доцент

Відповідальний за випуск: Шило Галина Миколаївна, д.т.н, зав. каф.
ІТЕЗ

Розглянуто
на засіданні кафедри ІТЕЗ
протокол № 6 від 01.02.19 р.

Затверджено
на засіданні НМК ФРЕТ
протокол № 7 від 21.03.19 р.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	4
1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ КОРПУСА 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 ТЕПЛОВОГО 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.....	27
2.2 Порядок виконання роботи	31
2.3 Завдання до роботи	31
2.4 Зміст звіту	34
2.5 Контрольні запитання	34
ЛІТЕРАТУРА	35
Додаток А.....	36
Додаток Б	38
Додаток В.....	39
Додаток Г	40

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 відповісти 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 КОРПУСА 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:

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

де P - тепловий потік (потужність);

λ - 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:

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

де $\sigma_0 = 5,668 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ - стала Стефана-Больцмана;

$\varepsilon_{1,2}$ - 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:

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

де α_{ε} - коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням;

$\Delta t = t_1 - t_2$ - перепад температур між двома тілами;

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

випромінюванням;

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

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням обчислюється за допомогою співвідношення:

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

Коефіцієнт чорноти тіл залежить від матеріалу і властивостей поверхні теплообміну. Його значення для різних поверхонь наведене 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:

$$P_k = \alpha_k \cdot \Delta t \cdot S = \frac{\Delta t}{R_{mk}} = G_{mk} \cdot \Delta t, \quad (1.5)$$

де α_k - 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;

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

$G_{mk} = \alpha_k \cdot S$ - 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;

C і n - емпіричні коефіцієнти;

m - індекс, який позначає, що значення чисел Нусельта, Грасгофа та Прандтля обчислюються для середньої температури:

$$t_m = (t - t_c) / 2$$

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

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

де λ - коефіцієнт тепловіддачі 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 $g = 9.81, \text{ м}^2/\text{с}^2$ - прискорення вільного падіння;

β - коефіцієнт термічного розширення теплоносія;

ν - 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;

ρ - питома густина теплоносія.

Емпіричні коефіцієнти c 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:

$$\text{Nu}_f = 0,66 \cdot \text{Re}_f^{0,5} \cdot \text{Pr}_f^{0,43} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25}, \quad (1.11)$$

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

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

$$\text{Nu}_f = 0,037 \cdot \text{Re}_f^{0,8} \cdot \text{Pr}_f^{0,43} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25}, \quad (1.12)$$

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

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

де $\alpha_i = \alpha_{\alpha i} + \alpha_{\kappa i}$ - 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 $\alpha = \left(\sum_{i=1}^6 \alpha_i \cdot S_i \right) / S$ - середній коефіцієнт тепловіддачі;

S - загальна поверхня тепловіддачі;

$R_m = \frac{1}{\chi \cdot S}$ - тепловий опір корпусу.

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 λ 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 $\alpha_n = \alpha_{кн} + \alpha_a$;

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 теплова характеристика корпусу, для чого визначається тепловий потік при інших значеннях перегріву, які вибираються з кроком 10°C до температури корпусу 80°C (для металевих корпусів) або 100°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

$\Delta t, \text{ }^0C$			10	20	30	40	50
$t_{\kappa}, \text{ }^0C$							80 (100)
T_{κ}, K							
$\alpha_{\kappa}, Bm / \text{ }^2 \cdot K$							
$t_m, \text{ }^0C$							
Поверхня	Нижня	Pr					
		Gr					
		Pr·Gr					
		Nu					
		$\alpha_{\kappa\text{н}}, Bm / \text{ }^2 \cdot K$					
		$\alpha_{\text{н}}, Bm / \text{ }^2 \cdot K$					
	Верхня	$\alpha_{\kappa\text{в}}, Bm / \text{ }^2 \cdot K$					
		$\alpha_{\text{в\text{ер}}}, Bm / \text{ }^2 \cdot K$					
	Бокова	Pr					
		Gr					
		Pr·Gr					
		Nu					
		$\alpha_{\kappa\text{б}}, Bm / \text{ }^2 \cdot K$					
		$\alpha_{\text{б}}, Bm / \text{ }^2 \cdot K$					
P, Bm							
$\alpha, Bm / \text{ }^2 \cdot K$							
$R_m, K / Bm$							

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 за 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 $\alpha_n = \alpha_g$;

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 теплова характеристика корпусу для заданої швидкості руху теплоносія, для чого визначається тепловий потік при інших значеннях перегріву з кроком 10°C до температури корпусу 80°C (для металевих корпусів) або 100°C (для пластмасових корпусів) та середній коефіцієнт віддачі за виразом (1.15);

1.2.2.7 Обчислюється теплова 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 $\nu = \dots \text{м/с}$

$\Delta t, \text{ }^{\circ}\text{C}$			10	20	30	40	50
$t_{\kappa}, \text{ }^{\circ}\text{C}$							80 (100)
$\alpha_{\epsilon}, \frac{Bm}{\text{м}^2} \cdot K$							
Поверхня	Нижня, верхня	Re					
		Pr_f					
		Pr_w					
		Nu					
		$\alpha_{\kappa\text{н}}, \frac{Bm}{\text{м}^2} \cdot K$					
		$\alpha_{\text{н}}, \frac{Bm}{\text{м}^2} \cdot K$					
	Бокова	Re					
		Pr_f					
		Pr_w					
		Nu					
		$\alpha_{\kappa\text{вер}}, \frac{Bm}{\text{м}^2} \cdot K$					
		$\alpha_{\text{вер}}, \frac{Bm}{\text{м}^2} \cdot K$					
P, Bm							
$\alpha, \frac{Bm}{\text{м}^2} \cdot K$							
$R_m, \frac{K}{Bm}$							

1.2.3 Оформлення результатів розрахунків

1.2.3.1 Накреслити в сумісній системі координат теплові характеристики корпусу $P(t_k)$ при різних 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 накресліть 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 вибирати 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 різних 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	глянцеve	300×200×180
8	УХЛ	вода	Д16	поліроване	320×220×60
9	У	повітря	сталь	Хім. Окс	350×210×100
10	В	вода	полістирол	глянцеve	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 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:

$$t_k = t_c + t_{kd} + \sum \Delta t_{id} \quad (2.1)$$

де: t_k - температура корпусу функціонального вузла,

t_c - температура середовища,

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

Δt_{id} - перепад температур, який з'являється у місті росташування k - го джерела при включені i - го джерела.

Рішення задачі для одного джерела:

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

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

P_k - потужність k -го джерела,

F_{TKC} - 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.

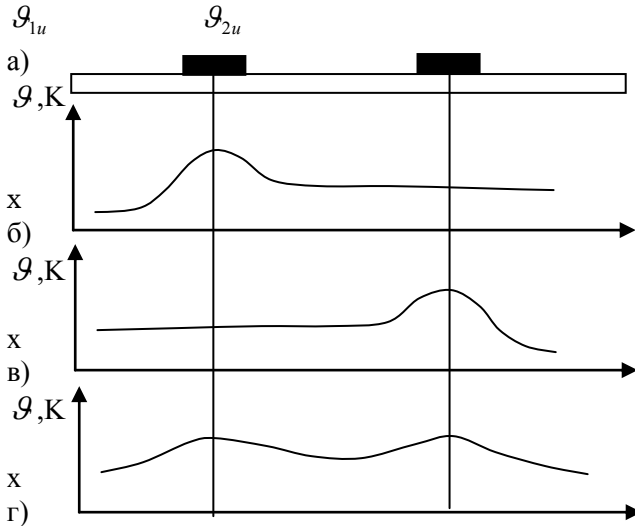


Рисунок 2.1 – Розподіл температурного поля від двох локальних джерел тепла

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).

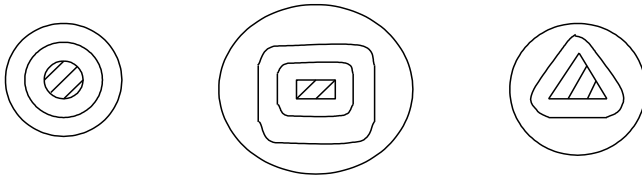


Рисунок 2.2 – Розподіл температурного поля від довільного джерела тепла

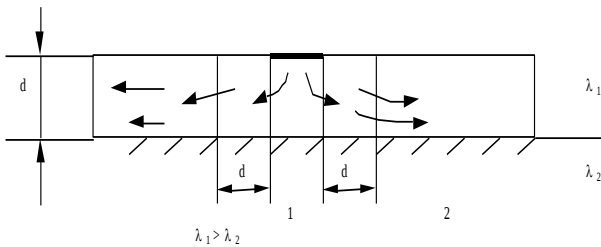


Рисунок 2.3 – Розподіл температурного поля від джерела тепла, розташованого на пластині

2.1.3 Принцип квазіізотермічних поверхонь

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

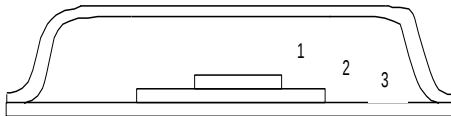


Рисунок 2.4 – Квазіізотермічні поверхні

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

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

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 Φ_{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	σ
	Теплова	t	P	R_m	C_m	λ

Для лінійних **теплових провідностей** $\sigma_{ij} = R_{ij}^{-1}$ справедлива наступна залежність між тепловим Φ_σ потоком та різницею температур Δt_{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 Φ_{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 Φ_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 ΔT_i - продуктивність джерела теплового потоку у i -ої гілці теплової схеми;

Δt_{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 σ : $R = \sum R_k$, $\sigma = \sum \sigma_k$.

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.

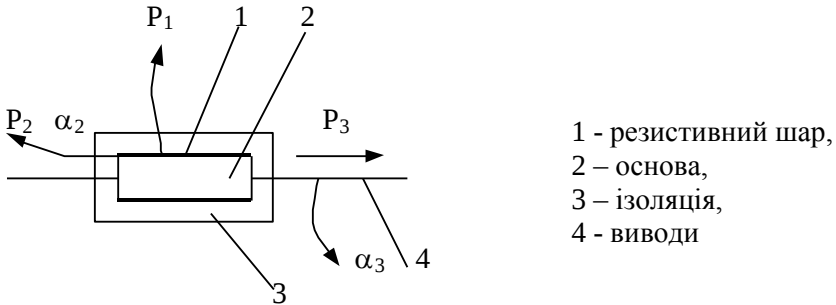


Рисунок 2.5 – Конструкція резистора

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

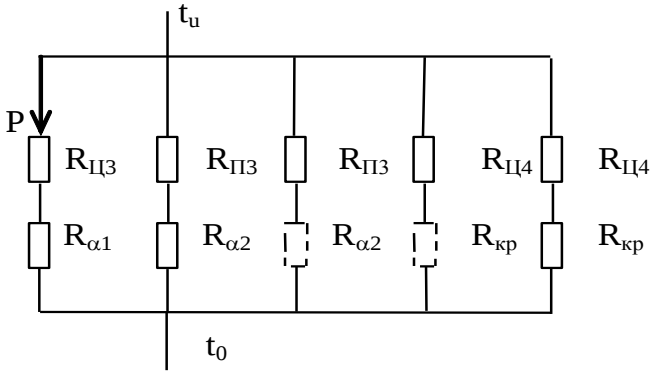


Рисунок 2.6 – Теплова модель резистора

При складанні цієї моделі враховані:

- $R_{Ц3}$ - тепловий опір переходу *резистивний шар - ізолятор* по циліндричній поверхні,
- $R_{α1}$ - тепловий опір переходу *ізолятор – середовище* по циліндричній поверхні,
- $R_{ПЗ}$ - тепловий опір переходу *резистивний шар - ізолятор* для двох плоских поверхонь (бокових стінок),
- $R_{α2}$ - тепловий опір переходу *ізолятор – середовище* для двох плоских поверхонь,
- $R_{Ц4}$ - тепловий опір *двох циліндричних виводів*
- $R_{кр}$ - 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:

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_{Ц3} + R_{α1}} + \frac{2}{R_{ПЗ} + R_{α2}} + \frac{2}{R_{Ц4} + R_{кр}} \quad (2.9)$$

Теплові провідності при цьому:

$$G_{\Sigma} = G_{\Pi 3} + 2 G_{\Pi 3} + 2 G_{\Pi 4} \quad (2.10)$$

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

$$t_{рез.ш.} = t_0 + PR_{\Sigma} = t_0 + \frac{P}{G_{\Sigma}} \quad (2.11)$$

2.1.5.2 Теплова модель транзистора на радіаторі

Конструкція транзистора на радіаторі наведена на рис. 2.7. Цій конструкції відповідає теплова модель, що приведена на рис. 2.8.

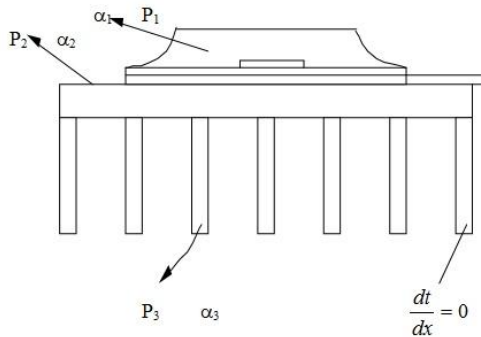


Рисунок 2.7 – Конструкція транзистора на радіаторі

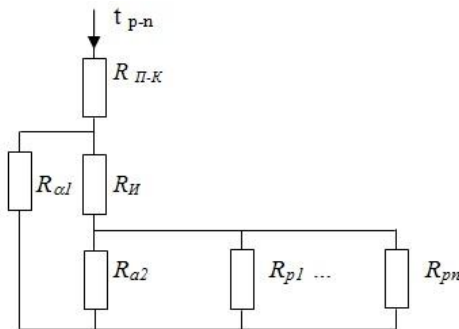


Рисунок 2.8 – Теплова модель транзистора на радіаторі

Тут враховуються опори:

- $R_{П-K}$ - опір р-п *перехід – корпус*;
- R_i - опір *ізоляційної прокладки*;
- $R_{\alpha 1}$ - опір *корпус транзистора – середовище*;
- $R_{\alpha 2}$ - опір *радіатор – середовище*;
- R_{pi} - опір *і – го ребра (штиря)*.

При цьому враховуються наступні допущення:

- при розрахунку $R_{\alpha 1}$ враховується верхня поверхня транзистора;
- при розрахунку $R_{\alpha 2}$ не враховуються верхня поверхня корпусу та поперечний перетин ребер або штирів;
- опір ізолятора R_i враховується як для плоскої стінки;
- при розрахунку опорів ребер (штирів) R_p вважається, що їх кінці теплоізолювані.

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

$$R_{\Sigma} = R_{П-K} + \frac{R_{\alpha 1} \cdot \left(R_{II} + \left(\frac{1}{R_{a2}} + \frac{1}{R_{p1}} + \dots + \frac{1}{R_{pn}} \right)^{-1} \right)}{R_{\alpha 1} + \left(R_{II} + \left(\frac{1}{R_{a2}} + \frac{1}{R_{p1}} + \dots + \frac{1}{R_{pn}} \right)^{-1} \right)} \quad (2.12)$$

Знаючи сумарний тепловий опір транзистора, можна визначити температуру р – п переходу за формулою:

$$t_{p-n} = t_0 + PR_{\Sigma} \quad (2.13)$$

2.1.6 Розрахунок теплових опорів найпростіших моделей

Температуру поверхні можна визначити за загальною формулою:

$$t_{II} = t_c + \Delta t \quad (2.14)$$

де t_c - температура середовища,
 Δt - 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)

Тепловий опір визначається за формулою:

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

де: α – коефіцієнт тепловіддачі, включає до себе конвективну та променеву складові: $\alpha = \alpha_k + \alpha_l$,

S – площа співдотику поверхні з навколишнім середовищем.

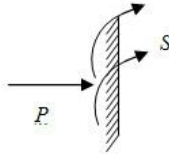


Рисунок 2.9 – Тепловіддача від плоскої поверхні в навколишнє середовище

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

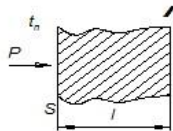


Рисунок 2.10 – Теплопередача через плоску стінку

Тепловий опір визначається за формулою:

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

де: l – довжина теплового шляху,
 λ – теплопровідність матеріала стінки,
 S – площа поперечного перетину стінки.

2.1.6.3 Тепловий опір при теплопередачі через циліндричну поверхню

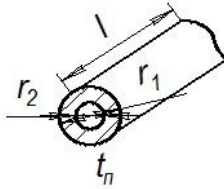


Рисунок 2.11 – Теплопередача через циліндричну поверхню

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 циліндра.

2.1.6.4 Тепловий опір при теплопередачі через сферичну поверхню

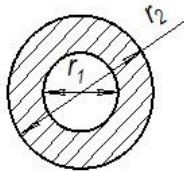


Рисунок 2.12 – Теплопередача через сферичну поверхню

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 стержень (на кінці стержня $T = 0$)

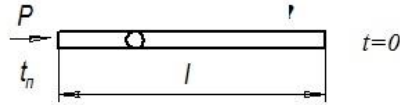


Рисунок 2.13 – Теплопередача через закорочений стержень

$$R_T = \frac{th(b \cdot l)}{S \cdot \lambda \cdot b} \quad (2.20)$$

Якщо $b \cdot l > 2$ то $th(b \cdot l) \approx 1$ и тоді:

$$R_T = \frac{1}{S \cdot b \cdot \lambda} \quad (2.21)$$

де: b – довжина теплового шляху,
 λ – теплопровідність матеріала стержня,
 S – площа поперечного перерізу стержня.

2.1.6.6 Тепловий опір при теплопередачі через теплоізований стержень (на кінці стержня $dT/dt = 0$)

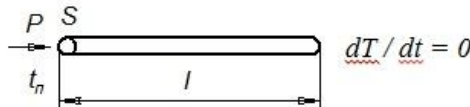


Рисунок 2.14 – Теплопередача через теплоізований стержень

$$\frac{dt}{dx} = 0 \quad R_T = \frac{1}{S \cdot b \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{th(b \cdot l)} \quad (2.22)$$

$$\text{При } b \cdot l > 2 \quad th(b \cdot l) \approx 1, \quad R_T = \frac{1}{S \cdot b \cdot \lambda} \quad (2.23)$$

2.2 Порядок виконання роботи

2.2.1 Для заданого функціонального вузла скласти теплову модель (вихідні дані наведені у табл. 2.1). При цьому використовувати принципи спрощення та електротеплову аналогію.

2.2.2 За складеною моделлю скласти рівняння для розрахунку сумарного теплового опору та визначити його чисельне значення.

2.2.3 Розрахувати перегрів та температури елементів функціонального вузла та порівняти їх із припустимими. Зробити висновок про забезпечення теплового режиму функціонального вузла.

Конструкція функціонального вузла приведена на рис. 2.15.

Значення теплопровідностей матеріалів приведені у додатку Г.

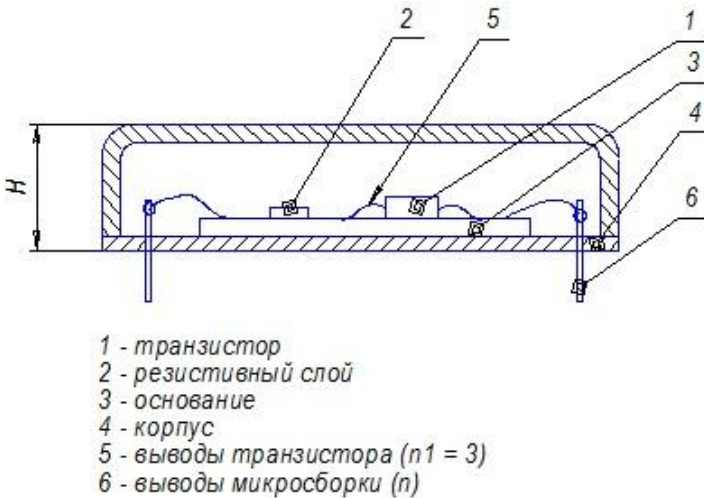


Рисунок 2.15 – Конструкція функціонального вузла

2.3 Завдання до роботи

Вихідні дані для розрахунків слід вибирати згідно з варіантом з табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунків

№ вар- та	1 Транзистор						2 Резистивний шар			3 Основа		
	P, Вт	[t], °C	h1, мм	Se, мм ²	Socн, мм ²	мате- ріал	P, Вт	[t], °C	Socн, мм ²	h3, мм	Socн, мм ²	мате- ріал
1	0,060	130	0,5	0,4x0,4	0,7x0,7	Si	0,10	180	2x1	0,6	8x15	полікор
2	0,360	80	1,6	0,6x0,6	∅ 7,5	Ge	0,60	200	3x3	1,0	16x20	СТ35-2
3	0,060	145	1,0	0,5x0,5	1,3x1,3	Si	0,50	150	2x2	1,0	10x16	BeO
4	0,500	150	0,8	0,6x0,5	1,5x2,0	Si	0,60	175	2x3	1,6	12x16	СТ32-1
5	0,800	75	1,5	1,5x1,0	5,0x5,0	Ge	0,80	180	4x3	1,6	16x20	СТ50-1
6	0,060	140	0,6	0,4x0,4	1,0x1,0	Si	0,50	150	3x2	0,6	8x15	MgO
7	0,360	85	1,6	0,5x0,5	4,0x5,0	Ge	0,40	150	3x3	1,0	16x20	22ХС
8	0,900	150	0,5	0,6x0,6	4,0x4,0	Si	0,50	180	4x3	1,0	10x16	СТ50-1
9	0,015	140	0,8	0,2x0,2	0,6x0,6	Si	0,30	175	2x1	0,6	5x6	СТ35-2
10	0,800	85	1,3	0,4x0,3	4,0x3,5	Ge	0,60	160	3x2	1,0	12x16	22ХС
11	0,060	135	0,5	0,3x0,3	0,7x0,7	Si	0,40	175	3x2	0,6	8x15	BeO
12	0,360	75	1,6	0,5x0,5	∅ 7,5	Ge	0,80	180	4x3	1,6	20x16	полікор
13	0,700	145	1,4	0,6x0,6	3,0x4,0	Si	0,60	175	3x3	1,6	16x20	MgO
14	0,015	135	0,8	0,3x0,3	0,6x0,6	Si	0,30	165	1x2	0,6	5x6	СТ32-1
15	0,800	125	0,2	0,5x0,5	3,5x5,0	Si	0,60	180	3x2	1,6	12x16	22ХС
16	0,060	125	0,6	0,4x0,4	1,0x1,0	Si	0,30	170	2x1	1,0	10x12	СТ50-1
17	0,360	80	1,6	0,4x0,4	∅ 7,5	Ge	0,85	175	4x3	1,6	16x20	полікор
18	0,400	130	1,2	0,5x0,5	5,0x3,0	Si	0,75	180	3x2	1,0	12x16	22ХС
19	0,015	135	0,8	0,3x0,3	0,7x0,7	Si	0,35	175	3x1	0,6	5x6	СТ35-2
20	0,060	140	1,2	0,5x0,5	1,3x1,3	Si	0,45	190	3x2	1,0	8x15	СТ32-1
21	0,600	85	1,7	0,5x0,5	6,0x4,0	Ge	0,55	200	3x4	1,6	16x20	BeO
22	0,700	135	1,5	0,3x0,4	5,0x5,0	Si	0,60	180	4x3	1,6	12x16	MgO

Продовження табл. 2.1

№ вар- та	4 Корпус				5 Виводи транз.			6 Виводи мікросбірки				tc, °C
	h4, мм	Socн. мм²	мате- ріал	H, мм	d, мм	l, мм	мате- ріал	d, мм	l, мм	мате- ріал	n	
1	1,0	12,0x19,5	Al	5,0	0,03	3,0	Au	0,1	10	ковар	14	35
2	1,5	19,5x22,0	ковар	7,5	0,05	4,0	Au	0,2	15	ковар	14	40
3	1,0	14,5x19,5	Al	5,0	0,04	5,5	Au	0,2	10	ковар	14	45
4	1,5	14,5x19,5	ковар	7,5	0,03	6,0	Au	0,1	15	ковар	14	50
5	1,5	19,5x20,5	Al	7,5	0,04	4,5	Au	0,1	15	ковар	14	55
6	1,0	12,0x19,5	ковар	5,0	0,05	3,5	Au	0,2	10	ковар	14	55
7	1,5	19,5x29,5	Al	7,5	0,03	5,5	Au	0,2	10	ковар	14	45
8	0,8	14,5x19,5	ковар	5,0	0,05	3,0	Au	0,1	15	ковар	14	40
9	1,0	7,0x14,5	Al	5,0	0,04	4,5	Au	0,1	15	ковар	10	50
10	1,0	14,5x19,5	ковар	5,0	0,05	5,5	Au	0,1	10	ковар	14	35
11	0,8	12,0x19,5	Al	5,0	0,04	3,0	Au	0,2	15	ковар	14	35
12	1,5	19,5x22,0	ковар	7,5	0,03	3,5	Au	0,2	10	ковар	14	45
13	1,5	19,5x22,0	Al	7,5	0,05	5,5	Au	0,1	10	ковар	16	50
14	0,6	7,0x14,5	ковар	5,0	0,03	3,5	Au	0,2	15	ковар	10	55
15	1,5	14,5x19,5	Al	7,5	0,05	4,0	Au	0,2	15	ковар	14	40
16	1,0	12,0x19,5	ковар	5,0	0,04	3,5	Au	0,2	15	ковар	14	50
17	1,5	19,5x29,5	Al	7,5	0,03	3,0	Au	0,1	10	ковар	14	55
18	1,0	14,5x19,5	ковар	5,0	0,05	5,0	Au	0,2	15	ковар	14	45
19	0,8	7,0x14,5	Al	5,0	0,04	5,5	Au	0,2	10	ковар	10	35
20	1,0	12,0x19,5	ковар	5,0	0,05	4,5	Au	0,1	15	ковар	14	45
21	1,5	19,5x22,0	Al	7,5	0,03	3,0	Au	0,2	15	ковар	14	40
22	1,5	14,5x19,5	ковар	7,5	0,05	3,5	Au	0,1	10	ковар	14	45

2.4 Зміст звіту

- 2.4.1 Мета роботи та вихідні дані для розрахунків.
- 2.4.2 Ескіз функціонального вузла.
- 2.4.3 Теплова модель функціонального вузла.
- 2.4.4 Розрахунок сумарного теплового опору.
- 2.4.5 Розрахунок температур елементів функціонального вузла.
- 2.4.6 Висновки.

2.5 Контрольні запитання

- 2.5.1 Для чого використовуються теплові моделі?
- 2.5.2 У чому полягає принцип суперпозиції теплових полей?
- 2.5.3 У чому полягає принцип місцевих впливів?
- 2.5.4 У чому полягає принцип квазітермічних поверхонь?
- 2.5.5 Що таке електротеплова аналогія?
- 2.5.6 Елементи теплового ланцюга та їх позначення.
- 2.5.7 Закони Кірхгофа для теплових ланцюгів.
- 2.5.8 Які застосовуються еквівалентні перетворення з'єднань теплових опорів?
- 2.5.9 Привести та пояснити теплову модель резистора.
- 2.5.10 Привести та пояснити теплову модель транзистора на радіаторі.
- 2.5.11 Привести та пояснити теплову модель функціонального вузла.

ЛІТЕРАТУРА

1. Теплові процеси в електроніці / Ю. Я. Бобало, В. Вуйчик, 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-массообмен 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

$t, ^\circ C$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$C_p, \text{Дж}/\text{кг} \cdot K$	$\lambda, \text{Вт}/\text{м} \cdot K$	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-50	1,584	1010	2,04	0,00000923	0,728
-20	1,395	1010	2,28	0,00001279	0,716
0	1,293	1000	2,44	0,00001328	0,707
10	1,247	1000	2,51	0,00001416	0,705
20	1,205	1000	2,60	0,00001506	0,703
30	1,165	1000	2,68	0,00001600	0,701
40	1,128	1000	2,76	0,00001696	0,699
50	1,093	1000	2,83	0,00001795	0,698
60	1,060	1000	2,90	0,00001897	0,696
70	1,029	1000	2,97	0,00002002	0,694
80	1,000	1000	3,05	0,00002109	0,692
90	0,972	1000	3,13	0,00002210	0,690
100	0,946	1000	3,21	0,00002313	0,688
120	0,898	1000	3,34	0,00002545	0,686

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

$t, ^\circ C$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{Дж/кг}$	$\lambda, \text{Вт/м} \cdot K$	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta, 1/K$	$\sigma, \text{Н/м}$	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	0,00103	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	0,2	0,4
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 чор.,сірий	0,86	0,9
пластмаси	матові	0,6	0,8
пластмаси	глянцеві	0,5	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 питомої теплопровідності для різних матеріалів

Матеріал	Питома теплопровідність λ , Вт / м К	Матеріал	Питома теплопровідність λ , Вт / м К
Алюміній, Al	230	Полікор	60
Золото, Au	317	СТ35-2	1,3
Срібло, Ag	160	СТ50-1	1,2
Кремній, Si	149	BeO	209
Германій, Ge	60	MgO	242
Ковар	19	22ХС	25