

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет



РОБОЧА ПРОГРАМА ТА
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до самостійної, контрольної та індивідуальної роботи з
дисципліни

"Тепломасообмін в радіоелектронній апаратурі"

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

Робоча програма та методичні вказівки до самостійної, контрольної та індивідуальної роботи 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., Поспєєва І.Є. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 36 с.

Укладачі: Огренич Євген Вікторович, канд. техн. наук, ст. викладач;
Поспєєва 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 ПОЛОЖЕННЯ	5
1 ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ ТА ПИТАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ	7
1.1 Програма навчальної дисципліни	7
1.2 Питання для самостійної роботи	8
2 ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ ТА ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ	10
2.1 Вихідні дані до виконання роботи	10
2.2 Зміст роботи	10
2.3 Вибір способу охолодження	12
2.3.1 Природне повітряне охолодження	12
2.3.2 Примусове повітряне охолодження	13
2.3.3 Природне рідинне охолодження	14
2.3.4 Примусове рідинне охолодження	14
2.3.5 Природне випарне охолодження	14
2.3.6 Примусове випарне охолодження	14
2.3.7 Послідовність розрахунку	16
2.4 Обчислення теплового режиму блока	16
2.4.1 Розрахунок теплового режиму при природному охолодженні блока в герметичному корпусі	17
2.4.2 Розрахунок теплового режиму при природному охолодженні блока в герметичному орєбреному корпусі	19
2.4.3 Розрахунок теплового режиму при природному охолодженні в перфорованому корпусі	19
2.4.4 Розрахунок теплового режиму при примусовому охолодженні в орпусі з внутрішнім змішуванням	20
2.4.5 Розрахунок теплового режиму при примусовому охолодженні в герметичному корпусі з зовнішнім обдувом	21
2.4.6 Розрахунок теплового режиму при примусовому повітряному охолодженні	21
2.5 Порядок розрахунку теплового режиму блока	23

2.6 Вибір радіатора.....	24
2.6.1 Вибір типу радіатора.....	24
2.6.2 Проектування конструкції радіатора.....	24
2.7 Обчислення теплового режиму потужних елементів.....	25
ЛІТЕРАТУРА	26
Додаток А. Порядок розрахунку теплового режиму блока в герметичному корпусі.....	27
Додаток Б. Порядок розрахунку теплового режиму блока в герметичному оребреному корпусі.....	28
Додаток В. Порядок розрахунку теплового режиму блока в перфорованому корпусі.....	29
Додаток Г. Порядок розрахунку теплового режиму блока в герметичному корпусі з внутрішнім змішуванням	30
Додаток Д. Порядок розрахунку теплового режиму блока в герметичному корпусі з зовнішнім обдувом	31
Додаток Е. Порядок розрахунку теплового режиму блока при примусовому повітряному охолодженні.....	32
Додаток Ж. Параметри транзисторів.....	33
Додаток К. Приклад креслення пластинчастого радіатора	34
Додаток Л. Приклад креслення ребристого радіатора	35
Додаток М. Приклад креслення штирьового радіатора.....	36

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Робота радіоелектронних засобів (РЕЗ) базується на використанні різноманітних фізичних та фізико-хімічних процесів, більшість з яких супроводжується виділенням теплової енергії. Перегрів її за рахунок, складаючись з температурою навколишнього середовища, призводить до значного підвищення температури усередині блоків та вузлів РЕЗ, у тому числі у зонах розташування термочутливих елементів. Тому під час проектування РЕЗ питанням забезпечення нормальних теплових режимів приділяється особлива увага.

Метою навчальної дисципліни "Тепломасообмін в радіоелектронних апаратах" є вивчення фізичних процесів та їх математичних описів при дослідженні тепломасообміну у сучасній радіоелектронній апаратурі, набуття практичних навичок вибору конструктивних рішень для забезпечення нормального теплового режиму.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен отримати:
загальні компетентності:

- здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях;
- здатність оцінювати та забезпечувати якість робіт;
- здатність до аналізу та синтезу;
- навички використання інформаційних і комунікаційних технологій;

- вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми;
- вільне володіння українською мовою;

фахові компетентності:

- вміння проводити дослідження методик аналізу, синтезу, оптимізації та прогнозування якості процесів функціонування радіоелектронних апаратів та засобів з урахуванням вимог забезпечення нормальних теплових режимів;
- здатність використовувати методи проектування конструкцій радіоелектронних апаратів та засобів на сучасній елементній базі при системному підході з урахуванням вимог забезпечення нормальних теплових режимів;

- здатність знаходження компромісу між різними вимогами, знаходження оптимальних рішень;
- здатність розробляти та використовувати при проектуванні комп'ютерні моделі електрорадіоелементів та радіоелектронних апаратів у цілому з урахуванням вимог забезпечення нормальних теплових режимів;
- здатність проводити аналіз результатів обчислень програмного забезпечення, здійснювати вибір оптимальних рішень при проектуванні радіоелектронних апаратів з урахуванням вимог забезпечення нормальних теплових режимів.

Навчальним планом передбачені лекції, лабораторні роботи та самостійна робота студентів.

Самостійна робота складається з самостійного вивчення частини теоретичного матеріалу та практичної частини.

Самостійне вивчення матеріалу слід проводити згідно з програмою навчальної дисципліни та питаннями до самостійної роботи, що наведені у розділі 1, дотримуючись наступного порядку:

- ознайомлення з темою, що підлягає вивченню за програмою, та добір літератури зі списку, що рекомендується;
- вивчення матеріалу за рекомендованою літературою з конспектуванням основних положень теми.

Під час самостійної підготовки слід користуватися вказаною літературою, а також конспектами лекцій з даної дисципліни [9, 10] та даними методичними вказівками.

У рамках практичної частини:

- студенти денної форми навчання виконують індивідуальне завдання;
- студенти заочної форми навчання виконують контрольну роботу.

Метою індивідуальної (контрольної) роботи є вивчення методик проектних та перевірочних розрахунків теплових режимів блоків РЕЗ, що дозволяють вибрати спосіб охолодження, типи радіаторів та перевірити забезпечення нормальних теплових режимів для всього блоку та його окремих елементів.

1 ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ ТА ПИТАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1.1 Програма навчальної дисципліни

Програмою даної дисципліни передбачається вивчення наступних тем.

Тема 1. Основні поняття теорії теплообміну. Види теплопереносу

- Температурне поле
- Ізотермічна поверхня
- Градієнт температурного поля
- Кількість теплоти. Тепловий потік. Питомий тепловий

потік

- Види теплопереносу

Тема 2. Теплопровідність

- Закон Фур'є. Коефіцієнт теплопровідності
- Диференціальне рівняння теплопровідності
- Умови однозначності
- Термічний опір стінок різних конфігурацій: плоских, циліндричних, сферичних, одношарових, багатошарових

Тема 3. Конвекція

Тема 4. Теплове випромінювання

- Випромінювання чорних тіл
- Випромінювання не чорних (сірих) тіл

Тема 5. Елементи теплових кіл. Електротеплова аналогія

- Термічний коефіцієнт та його зв'язок з тепловим опором
- Електротеплова аналогія
- Теплові кола

Тема 6. Складний теплообмін. Критична товщина ізоляції

- Складний теплообмін
- Критична товщина ізоляції

Тема 7. Основи теорії подібності. Вільна конвекція у необмеженому просторі

- Критерії подібності
- Обробка результатів досліджень
- Вільна конвекція у необмеженому просторі

Тема 8. Системи охолодження

- Класифікація систем охолодження
- Вибір систем охолодження

Тема 9. Радіатори

- Конструкції радіаторів
- Матеріали, що застосовуються при конструюванні радіаторів
- Методи розрахунку радіаторів для охолодження напівпровідникових приладів та мікросхем

Тема 10. Нагнітальники

- Класифікація нагнітальників
- Конструкції вентиляторів для охолодження РЕА
- Особливості застосування вентиляторів

Тема 11. Теплообмінники

1.2 Питання для самостійної роботи

- 1 Температурне поле. Види температурних полів
- 2 Ізотермічна поверхня
- 3 Температурний градієнт
- 4 Кількість теплоти
- 5 Тепловий потік. Питомий тепловий потік
- 6 Види теплопереносу
- 7 Закон Фур'є. Коефіцієнт теплопровідності
- 8 Теплопровідність у газах
- 9 Теплопровідність у рідинах
- 10 Теплопровідність у металах
- 11 Теплопровідність у неметалевих твердих тілах
- 12 Диференціальне рівняння теплопровідності
- 13 Умови однозначності
- 14 Теплопровідність через одношарову плоску стінку
- 15 Теплопровідність через багатошарову плоску стінку
- 16 Теплопровідність через циліндричну стінку
- 17 Теплопровідність через сферичну стінку

- 18 Теплопровідність тонких оболонок
- 19 Конвекція. Закон Ньютона-Ріхмана
- 20 Поняття приграничного шару. Гідродинамічний приграничний шар
- 21 Тепловий приграничний шар
- 22 Види потоків. Ламінарний потік. Його особливості
- 23 Турбулентний потік. Його особливості
- 24 Поняття в'язкості. Динамічна та кінематична в'язкість
- 25 Число Рейнольдса та його зв'язок з типом потоку рідини
- 26 Теплове випромінювання. Закон Стефана-Больцмана
- 27 Теплове випромінювання абсолютно чорного тіла
- 28 Теплове випромінювання не чорних (сірих) тіл. Коефіцієнт чорноти
- 29 Термічний коефіцієнт
- 30 Електротеплова аналогія. Теплові кола
- 31 Елементи теплових кіл - активні та пасивні
- 32 Закони Ома та Кірхгофа для теплових кіл
- 33 Еквівалентні перетворення теплових кіл.
- 34 Послідовне та паралельне з'єднання теплових опорів
- 35 Складний теплообмін
- 36 Критична товщина ізоляції
- 37 Основи теорії подібності
- 38 Критерії подібності у тепломасообміні: формули для їх визначення та фізичний сенс
- 39 Обробка результатів експериментальних досліджень.
- 40 Визначальна температура та визначальний розмір
- 41 Вільна конвекція у необмеженому просторі
- 42 Системи охолодження та їх класифікація
- 43 Вибір системи охолодження
- 44 Радіатори - конструкції, критерії вибору
- 45 Матеріали, що застосовуються для радіаторів
- 46 Проектні розрахунки радіаторів для охолодження напівпровідникових приладів та мікросхем
- 47 Перевірочні розрахунки радіаторів для охолодження напівпровідникових приладів та мікросхем
- 48 Нагнітальники - класифікація та види конструкцій
- 49 Вентилятори. Конструкції та критерії вибору
- 50 Теплообмінники - класифікація та види конструкцій

2 ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ ТА ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ

2.1 Вихідні дані до виконання роботи

Вихідні дані до розрахунків містять:

- клас апаратури, до якого належить аналізуємий блок: для усіх варіантів **наземна**.
- підклас апаратури: для непарних варіантів - стаціонарна, для парних - носима;
- кліматичне виконання та категорія розміщення;
- загальна теплова потужність, що розсіюється у блоці P , Вт;
- габаритні розміри блока $L_1 \times L_2 \times L_3$, м;
- габаритні розміри нагрітої зони $L_{13} \times L_{23} \times L_{33}$, м;
- потужний елемент: тип та потужність, яку він розсіює P_E , Вт;
- тип виробництва: варіанти 1 - 5 та 11 - 15 - крупносерійне, варіанти 6 - 10 та 16 - 20 - дрібносерійне.

Вихідні дані згідно з варіантами наведені у табл. 2.1.

Параметри потужних елементів наведену у додатку Ж. Додаткові дані на потужні елементи (включаючи розміри корпусу) можна подивитися за посиланням: <https://alltransistors.com/spisall.php>

2.2 Зміст роботи

Індивідуальне завдання (для студентів денної форми навчання) включає:

- вибір способу охолодження блока РЕЗ;
- теплові розрахунки для блока з заданим охолодженням;
- обчислення теплового режиму потужного елемента;
- вибір радіатора для потужного елемента;
- креслення радіатора.

Контрольна робота (для студентів заочної форми навчання) включає:

- вибір способу охолодження блока РЕЗ;
- теплові розрахунки для блока з заданим охолодженням.

Таблиця 2.1 - Вихідні дані до розрахунків

Варіант	Клім. вик., кат. розм.	P, Вт	L ₁ x L ₂ x L ₃ , м	L ₁₃ x L ₂₃ x L ₃₃ , м	Потужний елемент	
					тип	P _Е , Вт
1	УЗ.1	120	260x220x80	240x200x60	IRFP250N	60
2	УХЛ2.1	55	140x120x60	100x100x50	MP1526	20
3	УХЛ5	210	300x260x90	250x210x80	FGA25N120ANTD	50
4	О2.1	180	200x180x40	160x150x30	GB100DA60UP	100
5	В3.1	95	130x120x65	110x100x40	1165905T	70
6	У2.1	190	220x220x96	200x170x80	IRFP250N	45
7	УХЛ4.1	100	160x140x85	150x130x60	MP1526	35
8	ТВ3.1	45	120x100x50	100x75x45	FGA25N120ANTD	15
9	ОМ4.2	115	155x125x80	135x110x70	GB100DA60UP	60
10	О5.1	85	145x145x70	130x100x50	1165905T	45
11	В2.1	220	360x280x75	320x250x70	IRFP250N	50
12	У2.1	160	165x155x72	150x150x35	MP1526	40
13	УХЛ5.1	50	100x 80x80	80x70x70	FGA25N120ANTD	25
14	О1.1	140	125x125x65	100x75x50	GB100DA60UP	70
15	ОМ5.1	65	140x120x40	120x110x35	1165905T	45
16	В4.2	155	240x220x90	200x200x75	IRFP250N	75
17	УХЛ4.1	95	135x135x55	125x120x45	MP1526	30
18	У5.1	130	150x140x75	140x100x60	FGA25N120ANTD	55
19	Т3.1	75	110x100x90	100x85x85	GB100DA60UP	30
20	ТС1.1	170	175x150x64	160x105x50	1165905T	55

Індивідуальне завдання (контрольну роботу) слід виконувати на аркушах формату А4 згідно з вимогами стандартів. Результати розрахунків оформити у вигляді таблиці за зразком табл. 2.2 та навести у висновках.

Креслення радіатора виконуються згідно до вимог ДСТУ ЄСКД.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунків

Параметр	Познач.	Розм.	Знач
Максимальна температура навколишнього середовища	t_{Cmax}	°C	
Допустима температура корпусу блоку	t_K	°C	
Допустима температура нагрітої зони	t_3	°C	
Допустима температура повітря в блоці	t_{II}	°C	
Допустима температура потужного елемента (ПЕ)	t_E	°C	
Перегрів корпусу блока	Θ_K	°C	
Перегрів нагрітої зони	Θ_3	°C	
Середній перегрів повітря в блоці	Θ_{II}	°C	
Перегрів поверхні ПЕ	Θ_E	°C	
Середній перегрів основи радіатора	Δt_p	°C	
Температура корпусу блока	T_K	К	
Температура нагрітої зони	T_3	К	
Температура повітря в блоці	T_{II}	К	
Температура поверхні ПЕ без радіатора	T_E	К	
Температура поверхні ПЕ на радіаторі	T_{PEP}	К	

2.3 Вибір способу охолодження

У залежності від типу і стану теплоносія існують: газове (повітряне), рідинне і випарне охолодження [1, 4].

У залежності від причини, що викликає рух теплоносія, існують: природне і примусове охолодження.

2.3.1 Природне повітряне охолодження

При цьому теплообмін відбувається між елементами РЕЗ і повітрям, причому повітря переміщається за рахунок енергії, що розсіюється елементами.

Переваги: простота реалізації, немає додаткових витрат енергії.

Недоліки: низька інтенсивність охолодження.

Застосовується при малих питомих потужностях розсіювання.

Розрізняють дві основні схеми природного повітряного охолодження:

- з герметичним кожухом;
- з перфорованим кожухом.

У герметичному кожусі конвективний теплообмін здійснюється: від елементів РЕЗ до повітря усередині апарата, від повітря до кожуха апарата, від кожуха до навколишнього середовища.

У перфорованому кожусі конвективний теплообмін здійснюється: між елементами РЕЗ і середовищем (повітрям), що проникає крізь перфораційні отвори.

2.3.2 Примусове повітряне охолодження

При цьому теплообмін відбувається між елементами РЕЗ і повітрям, причому для переміщення повітря використовуються додаткові джерела енергії.

Переваги: порівняльна простота реалізації, трохи більш висока інтенсивність охолодження.

Недоліки: необхідність додаткових пристроїв, збільшення габаритів, маси, енергоспоживання.

Застосовується при більш високих питомих потужностях розсіювання.

Розрізняють три основні схеми примусового повітряного охолодження: внутрішнє перемішування, зовнішній обдув, продувка.

При внутрішньому перемішуванні у виробі з герметичним кожухом установлений вентилятор, теплообмін відбувається за тою ж схемою, що і для природного повітряного охолодження в герметичному кожусі.

При зовнішньому обдуві теплообмін відбувається за тою ж схемою, що і для природного повітряного охолодження в герметичному кожусі, а для підвищення інтенсивності тепловіддачі між кожухом і повітрям установлений вентилятор.

При продувці повітря пропускається через апарат через спеціальні канали (з використанням перфораційних отворів).

2.3.3 Природне рідинне охолодження

При цьому виріб або його складові частини занурюються в бак з рідиною.

Переваги: підвищення інтенсивності охолодження за рахунок більш високого коефіцієнта тепловіддачі.

Недоліки: ускладнення конструкції, необхідність захисту елементів від улучення вологи.

2.3.4 Примусове рідинне охолодження

При цьому в платах чи кожусі апарата виконуються спеціальні канали, через які прокачується однофазна рідина. Теплоносіями використовуються: вода, водоспиртові суміші (антифризи), кремнійорганічні і фторорганічні рідини.

Переваги: висока інтенсивність охолодження, що дозволяє забезпечувати охолодження апаратури при високих питомих потужностях.

Недоліки: складність конструкції.

2.3.5 Природне випарне охолодження

Застосовується для теплонавантажених блоків і потужних елементів. При цьому охолоджувана поверхня занурюється в рідину, над якою створюється паровий обсяг, відвід тепла здійснюється в процесі кипіння рідини на охолоджуваній поверхні.

2.3.6 Примусове випарне охолодження

Схема охолодження близька до схеми примусового рідинного охолодження і здійснюється за рахунок виникнення бульбашкового кипіння в шарі поблизу охолоджуваної поверхні при деяких температурах потоку.

Випарне охолодження є найбільш ефективним способом і застосовується для апаратури при максимальних питомих потужностях розсіювання.

Вибір способу охолодження можна робити за допомогою графіка, що характеризує області доцільного застосування способів охолодження (рис. 2.1) [4].

Для незаштрихованих областей на рисунку можливе застосування способів охолодження:

- 1 – природне повітряне,
- 3 – примусове повітряне,
- 5 – примусове рідинне,
- 9 – примусове випарне.

Для заштрихованих областей на рисунку можливе застосування способів охолодження:

- 2 – природне і примусове повітряне,
- 4 – примусове повітряне і рідинне,
- 6 – примусове рідинне і природне випарне,
- 7 – примусове рідинне, примусове і природне випарне,
- 8 – природне і примусове випарне.

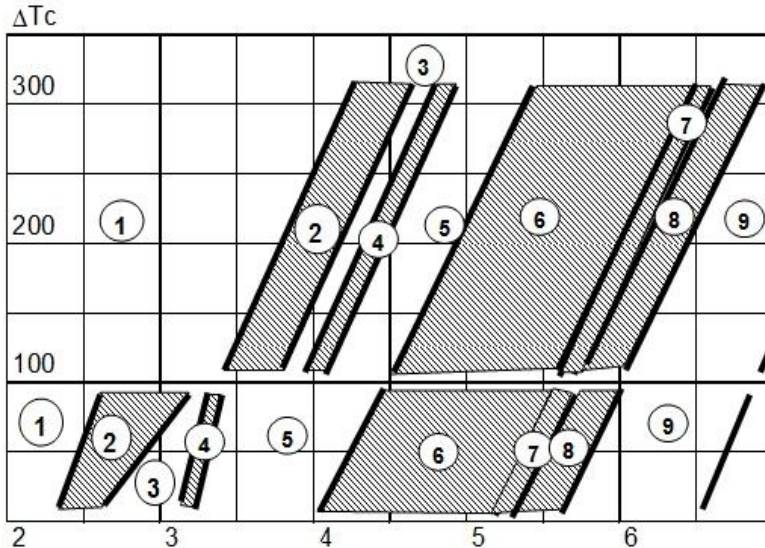


Рисунок 2.1 - Області доцільного використання способу охолодження

2.3.7 Послідовність розрахунку

Розрахувати коефіцієнт заповнення об'єму:

$$K_{30} = \frac{V_3}{V_K} = \frac{L_{13} \cdot L_{23} \cdot L_{33}}{L_1 \cdot L_2 \cdot L_3} \quad (2.1)$$

Розрахувати умовну поверхню теплообміну:

$$S_y = 2[L_1 \cdot L_2 + (L_1 + L_2) \cdot L_3 \cdot K_{30}]. \quad (2.2)$$

Розрахувати сумарну щільність теплового потоку, через поверхню теплообміну:

$$q = \frac{P \cdot K_p}{S_y}; \quad (2.3)$$

де: K_p – коефіцієнт, що враховує тиск (при атмосферному тиску $K_p = 1$);

Визначити максимально допустимий перегрів елементів РЕЗ:

$$\Delta T_{\text{доп}} = T_{i\min} - T_C; \quad (2.4)$$

де: $T_{i\min}$ – допустима температура корпусу найменш теплостійкого елемента,

T_C – температура середовища;

- для природного охолодження: $T_C = T_{C\max}$;

- для примусового охолодження: $T_C = T_{BX}$,

де T_{BX} – температура теплоносія на вході в апарат;

За допомогою графіка (рис. 2.1) вибрати спосіб охолодження.

2.4 Обчислення теплового режиму блока

Для розрахунків використовується методика, що наведена у [1, 5]. Ця методика є досить універсальною і з деякими корективами може використовуватися для різних способів охолодження.

Нижче наведені основні розрахункові формули. Методики розрахунків в залежності від способу охолодження приводяться у додатках А – Е.

2.4.1 Розрахунок теплового режиму при природному охолодженні блока в герметичному корпусі

2.4.1.1 Поверхня корпусу блока:

$$S_K = 2 \cdot [L_1 \cdot L_2 + (L_1 + L_2) \cdot L_3] \quad (2.5)$$

де: L_1, L_2 - горизонтальні розміри корпусу блока;

L_3 - вертикальний розмір корпусу блока.

2.4.1.2 Умовна поверхня нагрітої зони:

$$S_3 = 2 \cdot [L_1 \cdot L_2 + (L_1 + L_2) \cdot L_3 \cdot K_{30}] \quad (2.6)$$

де K_{30} - коефіцієнт заповнення об'єму.

2.4.1.3 Питома потужність корпусу блока:

$$q_K = \frac{P_3}{S_K} \quad (2.7)$$

де P_3 - потужність яка розсіюється нагрітою зоною.

2.4.1.4 Питома потужність нагрітої зони:

$$q_3 = \frac{P_3}{S_3} \quad (2.8)$$

2.4.1.5 Коефіцієнт $\mathcal{G}_1$ в залежності від питомої потужності корпусу блока:

$$\mathcal{G}_1 = 0,1472 \cdot q_K - 0,2962 \cdot 10^{-3} \cdot q_K^2 + 0,3127 \cdot 10^{-6} \cdot q_K^3 \quad (2.9)$$

2.4.1.6 Коефіцієнт $\mathcal{G}_2$ в залежності від питомої потужності нагрітої зони:

$$\mathcal{G}_2 = 0,1390 \cdot q_3 - 0,1223 \cdot 10^{-3} \cdot q_3^2 + 0,0698 \cdot 10^{-6} \cdot q_3^3 \quad (2.10)$$

2.4.1.7 Коефіцієнт K_{H1} в залежності від тиску середовища за межами корпусу блока H_1 :

$$K_{H1} = 0,82 + \frac{1}{0,925 + 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot H_1} \quad (2.11)$$

2.4.1.8 Коефіцієнт K_{H2} в залежності від тиску середовища у корпусі блока H_2 :

$$K_{H2} = 0,8 + \frac{1}{1,25 + 3,8 \cdot 10^{-5} \cdot H_2} \quad (2.12)$$

2.4.1.9 Перегрів корпусу блока

$$\vartheta_K = \vartheta_1 \cdot K_{H1} \quad (2.13)$$

2.4.1.10 Перегрів нагрітої зони

$$\vartheta_3 = \vartheta_K + (\vartheta_2 - \vartheta_1) \cdot K_{H2} \quad (2.14)$$

2.4.1.11 Середній перегрів повітря в блоці:

$$\vartheta_{II} = 0,5 \cdot (\vartheta_K + \vartheta_3) \quad (2.15)$$

2.4.1.12 Питома потужність елемента:

$$q_{Eл} = \frac{P_{Eл}}{S_{Eл}} \quad (2.16)$$

де: $P_{Eл}$ - потужність яка розсіюється елементом (вузлом),
температуру якого потрібно визначити;

$S_{Eл}$ - площа поверхні елемента, що омивається повітрям;
розраховується з урахуванням габаритних розмірів елемента, які слід
вибрати самостійно з довідкової літератури.

2.4.1.13 Перегрів поверхні елемента:

$$\vartheta_{Eл} = \vartheta_3 \cdot \left(a + b \cdot \frac{q_{Eл}}{q_3} \right) \quad (2.17)$$

де a та b - коефіцієнти, знайдені методом найменших
квадратів з використанням експериментальних даних з теплових
режимів реальних радіоелектронних апаратів та дорівнюючі $a = 0,75$;
 $b = 0,25$.

2.4.1.14 Перегрів середовища, що оточує елемент:

$$\vartheta_{EC} = \vartheta_{II} \cdot \left(0,75 + 0,25 \cdot \frac{q_{Eл}}{q_3} \right) \quad (2.18)$$

2.4.1.15 Температура корпусу блока:

$$T_K = \vartheta_K + T_C \quad (2.19)$$

де T_C - температура навколишнього середовища блока.

2.4.1.16 Температура нагрітої зони:

$$T_3 = \vartheta_3 + T_C \quad (2.20)$$

2.4.1.17 Температура поверхні елемента:

$$T_{El} = \vartheta_{El} + T_C \quad (2.21)$$

2.4.1.18 Середня температура повітря в блоці:

$$T_{II} = \vartheta_{II} + T_C \quad (2.22)$$

2.4.1.19 Температура середовища, що оточує елемент:

$$T_{EC} = \vartheta_{EC} + T_C \quad (2.23)$$

2.4.2 Розрахунок теплового режиму при природному охолодженні блока в герметичному оребреному корпусі

2.4.2.1 Перегрів між нагрітою зоною та корпусом неоребреного блока

$$\vartheta_{21} = (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (2.24)$$

2.4.2.2 Поверхня оребреного корпусу блока

$$S_{KP} = S_{KH} + S_P \quad (2.25)$$

де S_{KH} - поверхня корпусу, не зайнята ребрами;

S_P - поверхня ребер.

2.4.2.3 Питома потужність оребреного корпусу блока

$$q_{KP} = \frac{P}{S_{KP}} \quad (2.26)$$

де: P - потужність, що виділяється у блоці.

2.4.2.4 Перегрів оребреного корпусу блока

$$\vartheta_K = \vartheta_{1P} \cdot K_{H1} \quad (2.27)$$

2.4.2.5 Перегрів нагрітої зони з оребrenим корпусом:

$$\vartheta_3 = \vartheta_K + (\vartheta_2 - \vartheta_1) \cdot K_{H2} \quad (2.28)$$

2.4.3 Розрахунок теплового режиму при природному охолодженні в перфорованому корпусі

2.4.3.1 Площа перфорованих отворів:

Для прямокутних отворів:

$$S_{II} = n \cdot a_1 \cdot a_2 \quad (2.29)$$

де: n - кількість отворів,

a_1, a_2 - габаритні розміри прямокутних отворів

Для колоподібних отворів:

$$S_{\Pi} = \frac{n\pi d^2}{4} \quad (2.30)$$

де: n - кількість отворів,
 d - діаметр отворів

2.4.3.2 Коефіцієнт перфорації:

$$\Pi = \frac{S_{\Pi}}{2 \cdot L_1 \cdot L_2} \quad (2.31)$$

де: S_{Π} - площа перфораційних отворів.

2.4.3.3 Коефіцієнт K_{Π} в залежності від коефіцієнт перфорації:

$$K_{\Pi} = 0,29 + \frac{1}{0,41 + 4,95 \cdot \Pi} \quad (2.32)$$

2.4.3.4 Перегрів корпусу блока:

$$\vartheta_K = \vartheta_1 \cdot K_{H1} \cdot K_{\Pi} \cdot 0,93 \quad (2.33)$$

2.4.3.5 Перегрів нагрітої зони:

$$\vartheta_3 = 0,93 \cdot K_{\Pi} \cdot \left[\vartheta_1 \cdot K_{H1} + \left(\vartheta_2 \cdot \frac{1}{0,93} - \vartheta_1 \right) \cdot K_{H2} \right] \quad (2.34)$$

2.4.3.6 Середній перегрів повітря в блоці:

$$\vartheta_{\Pi} = \vartheta_3 \cdot 0,6 \quad (2.35)$$

2.4.4 Розрахунок теплового режиму при примусовому охолодженні в орпусі з внутрішнім змішуванням

2.4.4.1 Об'єм повітря в блоці:

$$V_{\Pi} = L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot (1 - K_{30}) \quad (2.36)$$

2.4.4.2 Середня швидкість зміщення повітря в блоці:

$$W = a \cdot \frac{G_B}{V_{\Pi}} \quad (2.37)$$

де G_B - продуктивність вентилятора; значення G_B рекомендується вибирати в діапазоні 0,003...0,25 кг/с,

$$a = 0,6 \text{ м}^4 / \text{кг}.$$

2.4.4.3 Коефіцієнт K_W в залежності від середньої швидкості змішування:

$$K_W = 0,08 + \frac{1}{1,09 + 0,27 \cdot W} \quad (2.38)$$

де W - швидкість перемішування повітря в апараті; значення W рекомендується вибирати в діапазоні 0...4 м/с.

2.4.4.4 Перегрів нагрітої зони:

$$\vartheta_3 = \vartheta_1 \cdot (K_{H1} - 1) + \vartheta_2 \cdot K_W \quad (2.39)$$

2.4.4.5 Середній перегрів повітря в блоці:

$$\vartheta_{II} = 0,75 \cdot \vartheta_3 \quad (2.40)$$

2.4.5 Розрахунок теплового режиму при примусовому охолодженні в герметичному корпусі з зовнішнім обдувом

2.4.5.1 Перегрів між нагрітою зоною та корпусом блока:

$$\vartheta_{21} = (\vartheta_2 - \vartheta_1) \cdot K_{H2} \quad (2.41)$$

2.4.5.2 Перегрів корпусу блока:

$$\vartheta_K = \frac{q_K}{(12 + 4,17 \cdot V)} \quad (2.42)$$

де: V - швидкість обдуву (при зниженому тиску до (3.38) входить швидкість з урахуванням зміни тиску); значення V рекомендується вибирати в діапазоні 0...5 м/с.

2.4.5.3 Перегрів нагрітої зони блока:

$$\vartheta_3 = \vartheta_K + \vartheta_{21} \quad (2.43)$$

2.4.6 Розрахунок теплового режиму при примусовому повітряному охолодженні

2.4.6.1 Середній перегрів повітря у блоці:

$$\overline{\vartheta_{II}} = 5 \cdot 10^{-4} \frac{P}{G} \quad (2.44)$$

де G - масові витрати охолоджуючого повітря, визначаються за формулою:

$$G = \frac{P \cdot \left(e^x - 0,24 \cdot \frac{G_{mg}}{G_w} \right)}{C_n \cdot (t_n' - t_w') \cdot (e^x - 1)}$$

де x - безрозмірна конструктивно - режимна характеристика системи теплообміну, у проектних розрахунках її можна прийняти рівною 1;

$\frac{G_{mg}}{G_w}$ - відношення масових витрат повітря та води, у проектних

розрахунках при невеликих довжинах трубопроводів (менш 10 м) його можна прийняти рівним 1,0...1,1;

C_{II} - теплоємність повітря;

t_n' - допустима температура повітря;

t_w' - температура потоку.

2.4.6.2 Площа поперечного перерізу корпусу блока в напрямку обдува:

$$S = L_1 \cdot L_2 \quad (2.45)$$

2.4.6.3 Коефіцієнт m_1 , що враховує масові витрати охолоджуючого повітря:

$$m_1 = 0,001 \cdot G^{-0,5} \quad (2.46)$$

2.4.6.4 Коефіцієнт m_2 , що враховує площу поперечного перерізу корпусу блока в напрямку обдува:

$$m_2 = (L_1 \cdot L_2)^{-0,406} \quad (2.47)$$

2.4.6.5 Коефіцієнт m_3 , що враховує довжину корпусу блока в напрямку обдува:

$$m_3 = L_3^{-1,059} \quad (2.48)$$

2.4.6.6 Коефіцієнт m_4 , що враховує заповнення апарата:

$$m_4 = K_{3O}^{-0,42} \cdot (1 - K_{3O}^{2/3})^{0,5} \quad (2.49)$$

2.4.6.7 Перегрів нагрітої зони блока:

$$\mathcal{G}_3 = \overline{\mathcal{G}_{II}} + P \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \quad (2.50)$$

2.4.6.8 Перегрів поверхні елемента:

$$\vartheta_{El} = \vartheta_3 \cdot \left(0,75 + 0,25 \cdot \frac{q_{El}}{q_3} \right) \cdot \left(\frac{L}{L_3} + 0,5 \right) \quad (2.51)$$

де: L – відстань в напрямку руху охолоджуючого повітря від вхідного отвору до елемента.

2.4.6.9 Перегрів середовища, що оточує елемент:

$$\vartheta_{EC} = \overline{\vartheta_{II}} \cdot \left(0,75 + 0,25 \cdot \frac{q_{El}}{q_3} \right) \cdot \left(\frac{L}{L_3} + 0,5 \right) \quad (2.52)$$

2.4.6.10 Середня температура повітря в блоці:

$$T_{II} = \overline{\vartheta_{II}} + T_{BX} \quad (2.53)$$

де T_{BX} – температура повітря на вході в блок.

2.4.6.11 Температура повітря на виході з блока:

$$T_{II2} = 2 \cdot \overline{\vartheta_{II}} + T_{BX} \quad (2.54)$$

2.4.6.12 Температура нагрітої зони:

$$T_3 = \vartheta_3 + T_{BX} \quad (2.55)$$

2.4.6.13 Температура поверхні елемента:

$$T_{El} = \vartheta_{El} + T_{BX} \quad (2.56)$$

2.4.6.14 Температура середовища, що оточує елемент:

$$T_{EC} = \vartheta_{EC} + T_{BX} \quad (2.57)$$

2.5 Порядок розрахунку теплового режиму блока

2.5.1 За однією з наведених методик (в залежності від обраного способу охолодження) обчислити:

- температуру корпусу блока,
- температуру нагрітої зони,
- температуру повітря в блоці,
- температуру поверхні елементів.

2.5.2 Температуру корпусу блока порівняти з максимально допустимою, яка становить: 80°C для металевих корпусів та 100°C для пластмасових корпусів.

2.5.3 Температуру нагрітої зони порівняти з максимально допустимою. Для елементів нагрітої зони (мікросхем та мікросбірок) допустима температура становить: 100...110°C.

2.5.4 Температуру потужного елементу порівняти з максимально допустимою для цього елементу.

2.5.5 Якщо температура корпусу або нагрітої зони перевищує максимально допустиму, слід збільшити габарити корпусу або перейти на іншу систему охолодження.

2.5.6 Якщо температура потужного елемента перевищує максимально допустиму, елемент слід встановлювати на радіатор.

2.6 Вибір радіатора

2.6.1 Вибір типу радіатора

Матеріал радіатора обирається виходячи з теплопровідності, вимог до маси та вартості радіатора. Найбільшу теплопровідність мають мідь, алюміній та їх сплави. Мідь дорожча за алюміній і має більшу щільність. Найменшу масу мають радіатори з магнієвих сплавів, однак їх виготовлення трудомістке.

Тип радіатора обирається, виходячи з конструктивних вимог, вимог технологічності і типа виробництва. Для одиничного та дрібносерійного виробництва небажане використання штирьових радіаторів, які виготовляються методом лиття під тиском. Найбільш технологічними в цьому разі є пластинчаті радіатори. Для крупносерійного та масового виробництва характерне застосування ребристих та штирьових радіаторів.

Для забезпечення мінімальної маси слід вибирати штирьові радіатори, мінімального об'єму – ребристі.

2.6.2 Проектування конструкції радіатора

Для проектування радіатора можна застосовувати методику вибору радіаторів за графіками, що наведена у [7].

Вихідними даними є:

- потужність, що виділяється на елементі P_E , Вт,
- допустима температура корпусу елемента $t_{\text{доп}}$, °С,
- температура середовища, t_c , °С,
- тип охолодження,
- для примусової конвекції швидкість потоку, W , м / с,
- тип радіатора.

2.6.2.1 Розрахувати допустимий перегрів корпусу елемента:

$$\Delta t_p = t_{\text{ПЕР}} - t_c - P_2 \cdot R_{\text{ПТ}} \quad (2.58)$$

де: $t_{\text{ПЕР}}$ - допустима температура р-п переходу,

$R_{\text{ПТ}}$ - тепловий опір між р-п переходом та радіатором.

2.6.2.2 Для заданого типу радіатора за графіками [7, рис. 15 – 17, 19, 20, 22, 25] знайти комплекс:

- для пластинчатих радіаторів: $\frac{P}{S_{\text{ОСН}}} \quad (2.59)$

- для ребристих та штирьових: $\frac{P}{S_{\text{ОСН}} \cdot K_H \cdot K_L} \quad (2.60)$

2.6.2.3 Для ребристих та штирьових радіаторів задати значення L_p та H_1 , виходячи з конструктивних вимог. За графіками [7, рис. 18, 21, 23, 24, 26, 27] знайти поправочні коефіцієнти K_H, K_L на висоту та довжину радіатора.

2.6.2.4 Із (2.69) або (2.60) визначити площу основи радіатора.

2.6.2.5 Обчислити необхідні розміри радіатора.

2.6.2.6 На форматі А4 або А3 виконати детальне креслення радіатора.

Приклади виконання креслень радіаторів різних типів наведені у додатках К, Л, М.

2.7 Обчислення теплового режиму потужних елементів

За формулами, що наведені у підрозділі 2.4, обчислити перегрів та температуру потужних елементів. Площу поверхні, що омивається повітрям - $S_{\text{ЕЛ}}$ - розрахувати з врахуванням площі радіатора. Порівняти температуру елемента з допустимою та зробити висновки щодо доцільності використання радіатора вибраної конструкції.

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-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. ОСТ4.012.001. Радиаторы охлаждения полупроводниковых приборов. Методы расчета.
8. РД 4ГО.286.002 – 80. Вентиляторы. Справочное руководство по выбору.
9. Теплопередача в РЕА. Конспект лекцій 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, частина 1 / Уклад.: Огренич Е.В., Поспеева І.Є. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 76 с.
10. Системи та засоби охолодження РЕА. Конспект лекцій 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, частина 2 / Уклад.: Огренич Е.В., Поспеева І.Є. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 54 с.

Додаток А. Порядок розрахунку теплового режиму блока в герметичному корпусі

- А.1 Розрахувати поверхню корпусу блока за формулою (2.5).
- А.2 Визначити умовну поверхню нагрітої зони за формулою (2.6).
- А.3 Визначити питому потужність корпусу блока за формулою (2.7).
- А.4 Розрахувати питому потужність нагрітої зони за формулою (2.8).
- А.5 Знайти коефіцієнт $\mathcal{G}_1$ в залежності від питомої потужності корпусу блока за формулою (2.9).
- А.6 Знайти коефіцієнт $\mathcal{G}_2$ в залежності від питомої потужності нагрітої зони за формулою (2.10).
- А.7 Знайти коефіцієнт K_{H1} в залежності від тиску середовища за межами корпусу блока H_1 за формулою (2.11).
- А.8 Знайти коефіцієнт K_{H2} в залежності від тиску середовища в корпусі блоку H_2 за формулою (2.12).
- А.9 Визначити перегрів корпусу блока за формулою (2.13).
- А.10 Розрахувати перегрів нагрітої зони за формулою (2.14).
- А.11 Визначити середній перегрів повітря в блоці за формулою (2.15).
- А.12 Визначити питому потужність елемента за формулою (2.16).
- А.13 Розрахувати перегрів поверхні елемента за формулою (2.17).
- А.14 Розрахувати перегрів навколишнього середовища елемента за формулою (2.18).
- А.15 Визначити температуру корпусу блока за формулою (2.19).
- А.16 Визначити температуру нагрітої зони за формулою (2.20).
- А.17 Знайти температуру поверхні елемента за формулою (2.21).
- А.18 Знайти середню температуру повітря в блоці за формулою (2.22).
- А.19 Знайти температуру навколишнього середовища елемента за формулою (2.23).

Додаток Б. Порядок розрахунку теплового режиму блока в герметичному оребреному корпусі

Б.1 Визначити поверхню неоребреного корпусу блока за формулою (2.5).

Б.2 Визначити умовну поверхню нагрітої зони, питому потужність неоребреного корпусу блока, питому потужність нагрітої зони за формулами (2.6)-(2.8).

Б.3 Знайти коефіцієнт $\mathcal{G}_1$ в залежності від питомої потужності корпусу блока за формулою (2.9).

Б.4 Знайти коефіцієнт $\mathcal{G}_2$ в залежності від питомої потужності нагрітої зони за формулою (2.10).

Б.5 Розрахувати перегрів між нагрітою зоною та корпусом неоребреного блока за формулою (2.24).

Б.6 Розрахувати поверхню оребреного корпусу блока за формулою (2.25).

Б.7 Розрахувати питому потужність оребреного корпусу блока за формулою (2.26).

Б.8 Знайти коефіцієнт $\mathcal{G}_{1P}$ в залежності від питомої потужності оребреного корпусу блока за формулою (2.9).

Б.9 Знайти коефіцієнти K_{H1} та K_{H2} в залежності від атмосферного тиску за межами та в корпусі блока - H_1 та H_2 за формулами (2.11), (2.12).

Б.10 Розрахувати перегрів оребреного корпусу блока за формулою (2.27).

Б.11 Розрахувати перегрів нагрітої зони з оребреним корпусом за формулою (2.28).

Б.12 Розрахувати середній перегрів повітря в блоці за формулою (2.40).

Б.13 Визначити питому потужність елемента, перегріву його поверхні та навколишнього середовища за формулами (2.16)-(2.18).

Б.14 Знайти температури поверхні корпусу блока, нагрітої зони, поверхні елемента, повітря в блоці та навколишнього середовища елемента за формулами (2.19)-(2.23).

Додаток В. Порядок розрахунку теплового режиму блока в перфорованому корпусі

В.1 Розрахувати: поверхню корпусу блока, умовну поверхню нагрітої зони, питому потужність корпусу блока, питому потужність нагрітої зони за формулами (2.5)-(2.8).

В.2 Знайти коефіцієнти $\mathcal{G}_1$ та $\mathcal{G}_2$ в залежності від питомої потужності корпусу блока та питомий потужності нагрітої зони за формулами (2.9), (2.10).

В.3 Знайти коефіцієнти K_{H1} та K_{H2} в залежності від атмосферного тиску за межами та в корпусі блока - H_1 та H_2 за формулами (2.11), (2.12).

В.4 Розрахувати площу перфорованих отворів. Для прямокутних отворів за формулою (2.29), для колоподібних отворів за формулою (2.30).

В.5 Розрахувати коефіцієнт перфорації за формулою (2.31).

В.6 Знайти коефіцієнт K_{Π} в залежності від коефіцієнт перфорації за формулою (2.32).

В.7 Визначити перегрів корпусу блока за формулою (2.33).

В.8 Визначити перегрів нагрітої зони за формулою (2.34).

В.9 Визначити середній перегрів повітря в блоці за формулою (2.35).

В.10 Розрахувати питому потужність елемента, перегрів поверхні елемента, перегрів навколишнього середовища елемента за формулами (2.16)-(2.18).

В.11 Знайти температури корпусу блока, нагрітої зони, поверхні елемента, повітря в блоці, навколишнього середовища елемента за формулами (2.19)-(2.23).

Додаток Г. Порядок розрахунку теплового режиму блока в герметичному корпусі з внутрішнім змішуванням

Г.1 Розрахувати поверхню корпусу блока за формулою (2.5).

Г.2 Розрахувати умовну поверхню нагрітої зони за формулою (2.6).

Г.3 Визначити питому потужність корпусу блока за формулою (2.7).

Г.4 Визначити питому потужність нагрітої зони за формулою (2.8).

Г.5 Знайти коефіцієнт $\mathcal{G}_1$ в залежності від питомої потужності корпусу блока за формулою (2.9).

Г.6 Знайти коефіцієнт $\mathcal{G}_2$ в залежності від питомої потужності нагрітої зони за формулою (2.10).

Г.7 Знайти коефіцієнт K_{H1} в залежності від атмосферного тиску за межами корпусу блока H_1 за формулою (2.11).

Г.8 Розрахувати об'єм повітря в блоці за формулою (2.36).

Г.9 Розрахувати середню швидкість змішування повітря в блоці за формулою (2.37) (при зниженому тиску у корпусі блока в (2.37) повинна входити продуктивність вентилятора з урахуванням зміни тиску).

Г.10 Визначити коефіцієнт K_w в залежності від середньої швидкості змішування за формулою (2.38).

Г.11 Визначити перегрів корпусу блока за формулою (2.13).

Г.12 Розрахувати перегрів нагрітої зони за формулою (2.39).

Г.13 Визначити середній перегрів повітря в блоці за формулою (2.40).

Г.14 Визначити питому потужність елемента за формулою (2.16).

Г.15 Розрахувати перегрів поверхні елемента за формулою (2.17).

Г.16 Розрахувати перегрів навколишнього середовища елемента за формулою (2.18).

Г.17 Визначити температуру корпусу блока за формулою (2.19).

Г.18 Визначити температури нагрітої зони, поверхні елемента, середню температуру повітря в блоці та температуру навколишнього середовища елемента, за формулами (2.20)-(2.23).

Додаток Д. Порядок розрахунку теплового режиму блока в герметичному корпусі з зовнішнім обдувом

Д.1 Розрахувати поверхню корпусу блока за формулою (2.5).

Д.2 Розрахувати умовну поверхню нагрітої зони за формулою (2.6).

Д.3 Визначити питому потужність корпусу блока за формулою (2.7).

Д.4 Визначити питому потужність нагрітої зони за формулою (2.8).

Д.5 Знайти коефіцієнт $\mathcal{G}_1$ в залежності від питомої потужності корпусу блока за формулою (2.9).

Д.6 Знайти коефіцієнт $\mathcal{G}_2$ в залежності від питомої потужності нагрітої зони за формулою (2.10).

Д.7 Знайти коефіцієнт K_{H_2} в залежності від тиску у корпусі блока H_2 за формулою (2.12).

Д.8 Розрахувати перегрів між нагрітою зоною та корпусом блока за формулою (2.41).

Д.9 Розрахувати перегрів корпусу блока с зовнішнім обдувом за формулою (2.42).

Д.10 Розрахувати перегрів нагрітої зони блока з зовнішнім обдувом за формулою (2.43).

Д.11 Визначити середній перегрів повітря в блоці за формулою (3.36).

Д.12 Визначити питому потужність елемента, перегрів поверхні елемента та перегрів навколишнього середовища елемента за формулами (2.16)-(2.18).

Д.13 Визначити температуру корпусу блока нагрітої зони, поверхні елемента, повітря в блоці та навколишнього середовища елемента, за формулами (2.19)-(2.23).

Додаток Е. Порядок розрахунку теплового режиму блока при примусовому повітряному охолодженні

Е.1 Визначити середній перегрів повітря в блоці за формулою (2.44), попередньо розрахувавши масові витрати охолоджувачого повітря.

Е.2 Визначити площу поперечного перерізу корпусу блока в напрямку обдува за формулою (2.45).

Е.3 Визначити коефіцієнти m_1, m_2, m_3, m_4 за формулами (2.46)-(2.49).

Е.4 Визначити перегрів нагрітої зони за формулою (2.50).

Е.5 Визначити умовну поверхню нагрітої зони, питому потужність нагрітої зони за формулами (2.6), (2.8).

Е.6 Визначити питому потужність елемента за формулою (2.16).

Е.7 Визначити перегрів поверхні елемента за формулою (2.51).

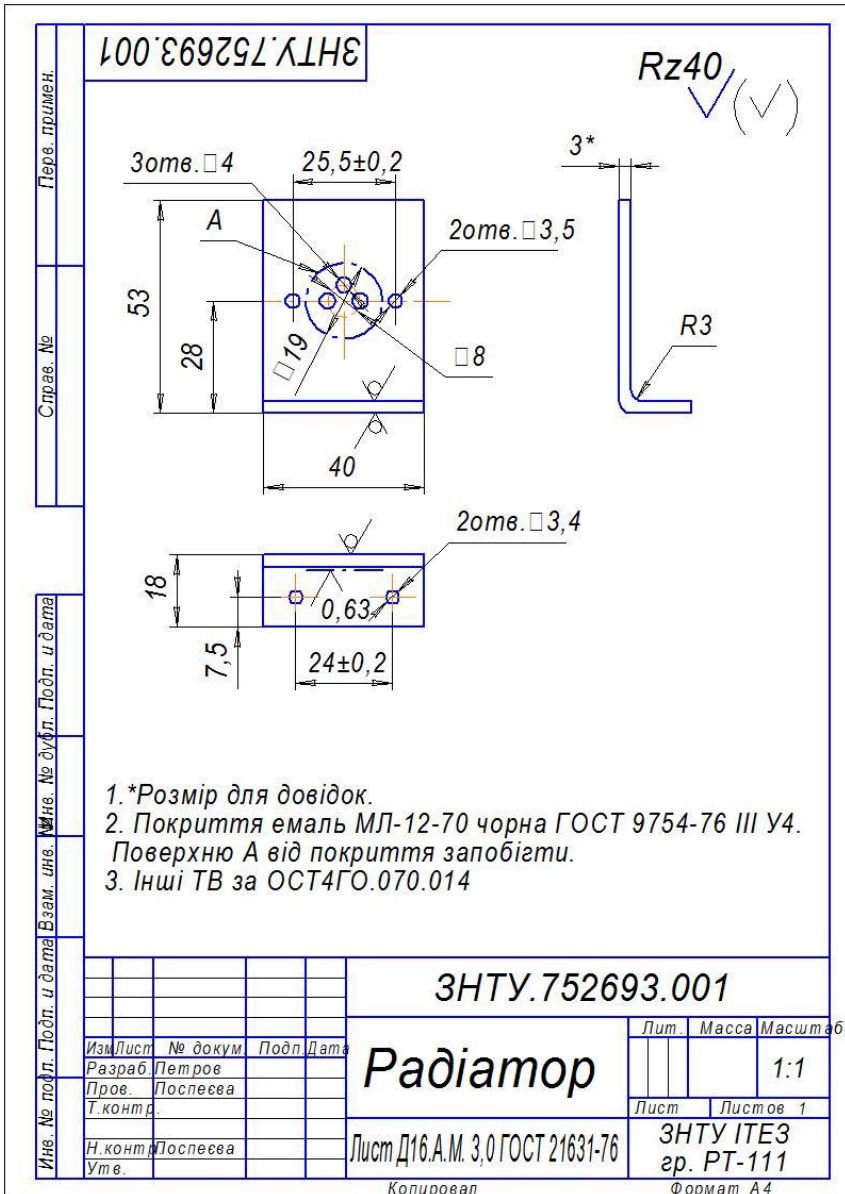
Е.8 Визначити перегрів середовища, що оточує елемент, за формулою (2.52).

Е.9 Визначити температури: середню температуру повітря в блоці, температуру повітря на виході з блока, нагрітої зони, поверхні елемента, середовища, що оточує елемент за формулами (2.53)-(2.57).

Додаток Ж. Параметри транзисторів

Тип транзистора	IRFP250N	MP1526	FGA25N 120ANTD	GB100DA 60UP	1165905T
Матеріал	Si	Si	Si	Si	Si
Структура	МОП	PNP	N-Channel	NPN	NPN
Максимальна потужність розсіювання, P_{max} , Вт	180	150	125	300	250
Допустима температура, $t_{доп}$, °C	130	130	110	130	150
Загальний тепловий опір, $R_{лт}$, °C/Вт	0,94	0,83	1,82	0,68	0,70
Тип корпусу	TO-247AC	TO-3P - 3L	TO-3PN	SOT-227	TO-3

Додаток К. Приклад креслення пластинчастого радіатора



Додаток М. Приклад креслення штирьового радіатора

