

А.А. Грудін., В.І. Калінін, С.Т. Барась

**РОЗРАХУНОК ТЕПЛОФІЗИЧНИХ І ГЕОМЕТРИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВІДВОДІВ ДЛЯ НАПІВПРОВІДНИ-
КОВИХ ПРИЛАДІВ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Міністерство освіти і науки України
Вінницький державний технічний університет

А.А. Грудін., В.І. Калінін, С.Т. Барась

**РОЗРАХУНОК ТЕПЛОФІЗИЧНИХ І ГЕОМЕТРИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВІДВОДІВ ДЛЯ НАПІВПРОВІДНИ-
КОВИХ ПРИЛАДІВ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Затверджено Ученою радою Вінницького державного технічного університету як навчальний посібник для студентів приладобудівного профілю. Протокол №5 від 26.12.2002р.

Вінниця ВДТУ 2003

УДК 536.24:681.3
Г90

Р е ц е н з е н т и :

В.С.Осадчук, доктор технічних наук, професор

Р.Н.Кветний, доктор технічних наук, професор

Г.І.Гаврилюк, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Грудін А.А., Калінін В.І., Барась С.Т.

**Г90 Розрахунок теплофізичних і геометричних параметрів
тепловідводів для напівпровідникових приладів.**

Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2003.-49с.

Навчальний посібник стане в нагоді студентам приладобудівного профілю денної та заочної форм навчання, а також може бути корисний для викладачів та фахівців.

УДК 536.24:681.3
© А.А. Грудин, В.І. Калінін, С.Т. Барась, 2003

Зміст

1. Мета, зміст і обсяг курсової роботи.....	4
2. Технічне завдання на курсову роботу.....	5
3. Основні теоретичні відомості з розрахунку тепловідводів для напівпровідникових приладів.....	7
3.1. Розрахунок тепловідводу для умов природного повітряного охолодження	7
3.1.1. Методика розрахунку односторонньо ребреного теповідводу.....	7
3.1.2. Методика розрахунку двосторонньо ребреного теповідводу.....	24
3.1.3. Методика розрахунку тепловідводу типу пластини.....	24
3.2. Розрахунок тепловідводу для умов примусового повітряного охолодження.....	24
4. Приклади розрахунків тепловідводів для охолодження транзисторів в умовах природного і примусового повітряного охолодження.....	28
4.1. Приклад розрахунку односторонньо ребреного тепловідводу для умов природної конвекції.....	28
4.2. Приклад розрахунку двосторонньо ребреного тепловідводу для умов природної конвекції.....	32
4.3. Приклад розрахунку тепловідводу типу пластини для умов природної конвекції.....	35
4.4. Приклад розрахунку односторонньо ребреного тепловідводу для умов примусового повітряного охолодження	36
5. Технологічні і конструктивні рекомендації з проектування теповідводів РЕА	40
Додаток А. Варіанти завдань на курсову роботу.....	45
Додаток Б. Титульний лист пояснювальної записки для курсорової роботи.....	47
Література.....	48

1 МЕТА, ЗМІСТ І ОБСЯГ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Мета курсової роботи – відпрацювати і закріпити навички з такої важливої проблеми, як відвід тепла від напівпровідникових приладів, надати необхідний матеріал і методику розрахунку тепловідводів і допомогти студентам у питанні підвищення надійності РЕА на напівпровідникових приладах.

Широке застосування напівпровідникових приладів (НПП) у різних радіоелектронних пристроях розкриває великі перспективи подальшого поліпшення якісних показників розроблювальних РЕА і дає істотний вигреш у надійності, термінах служби, габаритних розмірах, вазі й інших показниках. Серйозним недоліком транзисторів є обмеження в передачі великих потужностей, що зв'язано з обмеженням температурного діапазону використання напівпровідникових приладів. Найбільш перспективний шлях передачі великих потужностей полягає в застосуванні транзисторів з відповідними тепловідводами.

При конструюванні РЕА на НПП з метою підвищення її надійності необхідно приймати всі можливі заходи із забезпечення теплових режимів роботи як всієї апаратури в цілому, так і її окремих елементів. Особливу увагу варто звернути на створення конструкцій, що забезпечують найвигідніші теплові режими роботи НПП.

Використання сконструйованих тепловідводів як для потужних, так і для малопотужних НПП дозволяє різко знизити робочу температуру переходів при тій же потужності приладу.

Тепловідводи потрібно застосовувати не для того, щоб збільшити потужність розсіювання на НПП понад установлену за ТУ, а для максимального зниження робочої температури переходів при заданій потужності. Ціль застосування тепловідводу – підвищення надійності роботи НПП у РЕА.

НПП з відповідними тепловідводами застосовуються в якості потужних випрямних діодів у джерелах живлення, перетворювачах напруги, виконавчих пристроях, регулюючих пристроях у системах автоматики, верстатобудуванні, промисловій і побутовій техніці, у техніці НВЧ.

Хороший відвід тепла дає можливість створювати малошумні підсилювачі, тому що температура $p - n$ переходу різко позначається на шумах транзисторів.

Приведено порядок розрахунку тепловідводів, зручний для практичного використання при оцінці теплових режимів, а також рекомендації з вибору конструкції радіатора, його матеріалу, мастил і прокладок. Приводяться рекомендації з конструктивного виконання тепловідводів для різних типів транзисторів, а також при зміні тепловідводів (у разі потреби) при розробці РЕА.

Курсова робота складається з пояснювальної записки обсягом 20 – 30 сторінок формату А4, що оформляється відповідно до [5].

Основні розділи і зміст пояснювальної записки:

1. Титульний лист.
2. Технічне завдання.
3. Зміст.
4. Вступ (обґрунтовується актуальність використання тепловідводів у сучасній РЕА, дається загальна характеристика розв'язуваної задачі).
5. Короткі теоретичні відомості. У цьому розділі відповідно до завдання приводиться методика розрахунку тепловідводу для НПП. Розглядаються варіанти різних конструктивних виконань тепловідводів і способів охолодження.
6. Розрахунок тепловідводу для умов заданого конструктивного виконання і типу охолодження. Одержання основних геометричних розмірів тепловідводу. Перевірка умов паралельного функціонування радіатора, що розраховується.
7. Висновок. Приводяться основні висновки за результатами розрахунку тепловідводу.
8. Список літератури, оформлений відповідно до ДСТУ.
9. Додатки: ескіз НПП; креслення тепловідводу на форматі А3 у числі проєкцій, що вимагаються.

2 ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ

Розрахувати теплофізичні і геометричні параметри тепловідводів для транзистора, що працює в умовах конвекції при таких вихідних даних:

1. Тип транзистора.
2. Потужність, що розсіюється транзистором ($P_{вих.дан.}$), Вт.
3. Допустима температура $p-n$ переходу (t_{p-n}), °С.
4. Тепловий опір між переходом і корпусом ($R_{ПК}$), град/Вт.
5. Тепловий контактний опір між корпусом і тепловідводом ($R_{КТ}$), град/Вт.
6. Температура навколишнього середовища (t_c), °С.
7. Вид тепловідводу.
8. Спосіб охолодження.
9. Швидкість повітряного потоку, що набігає, уздовж ребер радіатора (заповнюється тільки для способу охолодження II) V , м/с.

Примітки:

1. Вид тепловідводу: П - у вигляді пластини; С – одностороннє оребрення;

О - односторонньо оребрений; Д - двосторонньо оребрений.

2. Спосіб охолодження: I - конвекція природна; II - конвекція примусова;

3. Для тепловідводів виду О, Д розраховується також число ребер радіаторів.
4. Конструктивне виконання і розміщення тепловідводу виду О:
ОВГ – вертикальний з пристроєм ППП з гладкої сторони;
ОВР – вертикальний з встановленням ППП з оберненої сторони;
ОГР – горизонтальний з встановленням ППП з оберненої сторони.
Ці параметри задаються викладачем кожному студенту індивідуально.
5. Тепловідводи з двухстороннім оребренням виду Д встановлюється вертикально.

Зміст і оформлення пояснювальної записки

1. Зміст: технічне завдання; вступ; короткі теоретичні відомості; розрахункова частина (включаючи графічну частину, креслення і т.п.); висновки; список літератури.
2. Оформлення: на аркушах формату А4.

Літературні джерела

1. Відповідно до загального рекомендованого переліку літератури, який наведено в розділі літератури даного посібника.
2. Джерела, виявлені в результаті індивідуального пошуку в процесі виконання.

Терміни одержання технічного завдання на курсову роботу

За планом : 1-й – 2-й навчальні тижні триместру.

Терміни виконання і захисту курсної роботи

За планом 11-й – 12-й навчальні тижні триместру.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ З РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВІДВОДІВ ДЛЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

3.1 Розрахунок тепловідводів для умов природного повітряного охолодження

3.1.1 Методика розрахунку одностороннього оребреного тепловідводу

При розрахунку тепловідводу, конструктивно виконаного у вигляді пластини, оребреної з одного боку, необхідні такі вихідні дані: максимально допустима температура колекторного переходу транзистора t_{p-n} , тепловий опір між переходом і корпусом $R_{ПК}$, тепловий контактний опір між корпусом і тепловідводом $R_{КТ}$, потужність, що розсіюється транзистором $P_{вих.дан.}$; температура навколишнього середовища t_c .

Дані з максимально припустимої температури колекторного переходу і тепловому опорі між переходом і корпусом беруться з довідника або технічних умов на транзистор. Тепловий контактний опір визначається звичайно експериментальним шляхом і лежить у межах 0,1 — 1,0 град/Вт, у залежності від чистоти обробки поверхні, наявності мастил, прокладок і величини зусилля, що притискає НПП до тепловідводу.

Спочатку визначається максимальна потужність $P_{макс.}$, що може розсіяти транзистор з тепловідводом при заданих температурі колекторного $p-n$ переходу, температурі навколишнього середовища і тепловому контактному опорі за формулою

$$P_{макс.} = \frac{t_{p-n} - t_c}{R_{ПК}}, \text{Вт} \quad (1)$$

Перевищення потужності $P_{вих.дан.}$ заданої в ТЗ значення $P_{макс.}$, отриманого згідно з (1), означає, що даний транзистор на задану потужність застосовувати не можна і потрібна корекція значення $P_{вих.дан.}$. Потім визначається тепловий опір тепловідводу за вихідними даними за формулою

$$R_{ТС.вих.дан.} = q \frac{(t_{p-n} - t_c) - P(R_{ПК} + R_{КТ})}{P}, \text{град/Вт}, \quad (2)$$

де q - коефіцієнт, що враховує нерівномірний характер розподілу температури по тепловідводу; приблизно його приймають рівним 0,9.

Середньоповерхнева температура перегріву тепловідводу визначається за формулою

$$\Delta t_T = t_T - t_c = P \cdot R_{TC},$$

де Δt_T - температура тепловідводу.

Виходячи зі значення теплового опору тепловідводу, визначеного за вихідними даними, і температури перегріву тепловідводу Δt_T , визначається довжина ребра $L_{min.}$ (мм) за графіком (рисунок 1) залежності мінімального теплового опору тепловідводу $R_{TO.min.}$ від довжини $L_{min.}$ у діапазоні $L_{min.}$ від 50 мм до 190 мм. На графіку (рисунок 1) залежність опору $R_{TC}=f(L_{min}, t_T - t_c)$ представлена для двох значень температур перегріву:

$$t_T - t_c = 10^\circ\text{C} \quad \text{і} \quad t_T - t_c = 25^\circ\text{C}.$$

Проміжне значення $\Delta t_T = (t_T - t_c)$ знаходиться методом інтерполяції. Представлені залежності зняті при температурі навколишнього середовища $t_c = 50^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,9$, $\delta = 0,2$ мм, $h = 30$ мм., де ε - ступінь чорноти поверхні, δ - товщина ребра тепловідводу, h - висота ребра тепловідводу. Слід зазначити, що ці залежності (рисунок 1) будуть справедливі в діапазоні температур $(30 \div 70)^\circ\text{C}$, а також для геометричних розмірів тепловідводів, зазначених нижче.

При визначенні площі тепловідводу попередньо орієнтовно задаються основними геометричними розмірами тепловідводу (рисунок 2): товщиною δ , висотою ребра h і товщиною тепловідводу d .

Товщина ребра вибирається в межах 1 – 3 мм, виходячи з технологічних міркувань. Через те, що більшість тепловідводів, що випускаються промисловістю, виконуються методом фрезерування або литтям під тиском, товщину ребра менше 1мм. не вдається виконати. Вибір товщини плити тепловідводу обумовлений тільки конструктивними і технологічними міркуваннями; звичайно товщина плити вибирається в межах 3 – 5 мм.

Відстань між ребрами можна визначити за формулою

$$b = \frac{l - \delta n}{n - 1}, \text{ мм}, \quad (3)$$

де n – число ребер; δ – товщина ребра, l – довжина сторони плити тепловідводу.

Відстань між ребрами повинна визначатися з умови $b \geq A$, де A – товщина приграничного шару. Для примусової конвекції товщину приграничного шару приймають рівною 2,5 мм, для природної конвекції 8 – 10 мм. Товщина і висота ребра вибираються з умови

$$\frac{\delta}{h^2} > \frac{\alpha}{\lambda}, \quad (4)$$

де h – висота ребра; α – сумарний коефіцієнт тепловіддачі;
 λ – коефіцієнт теплопровідності.

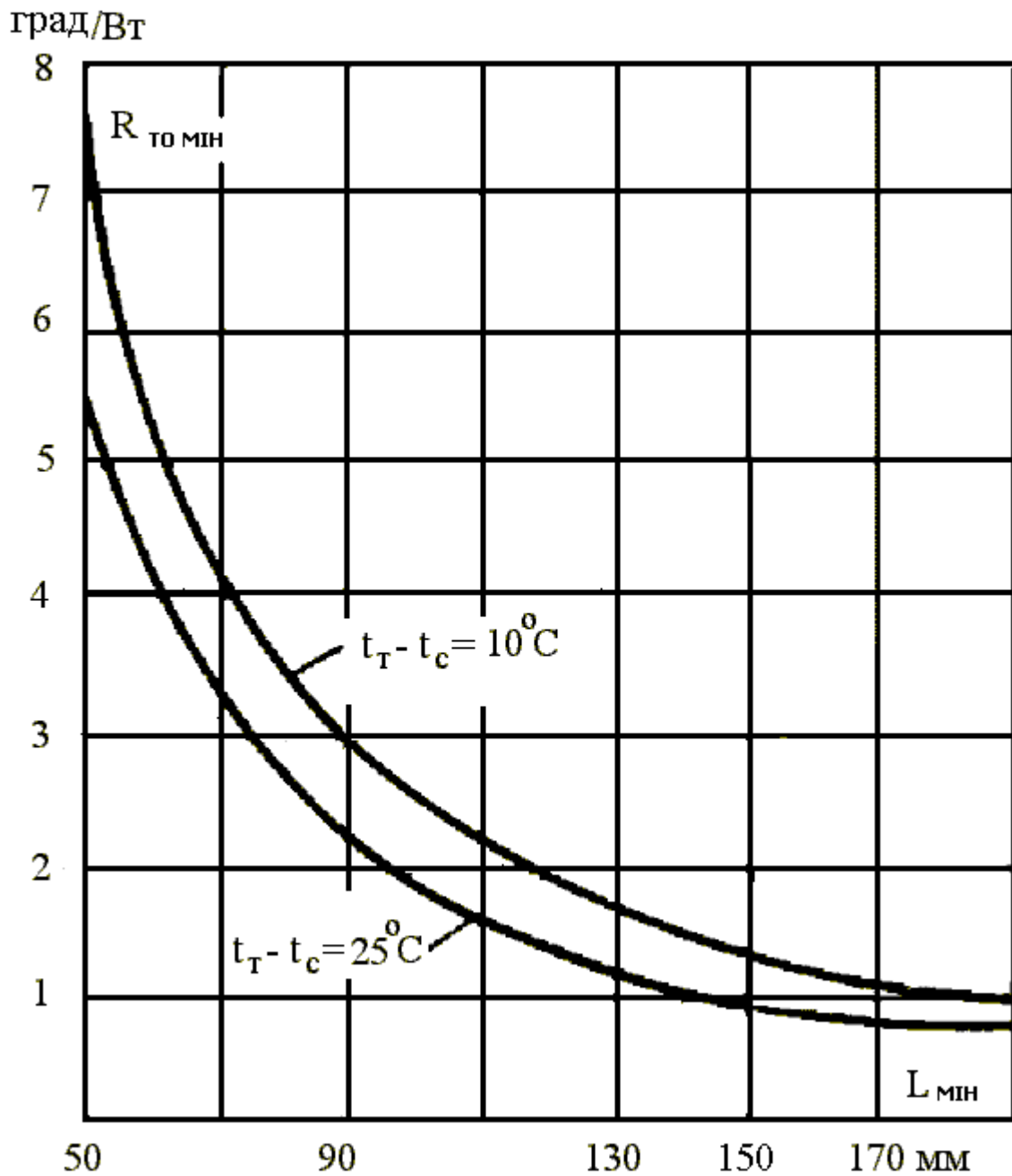


Рисунок 1 – Графік залежності мінімального теплового опору радіатора $R_{TO \min}$ від протяжності ребра L_{\min} і середньповерхневої температури перегріву тепловідводу $\Delta t_m = t_m - t_c$

У практичних прикладах вибирають висоту ребра звичайно до 40 мм, виходячи з умови рівномірного розподілу температури уздовж ребра.

З конкретних конструктивних міркувань варто задаватися розмірами основи тепловідводу $l \times L$ і висотою оребрення, тобто габаритами тепловідводу, і потім розраховувати інші його елементи.

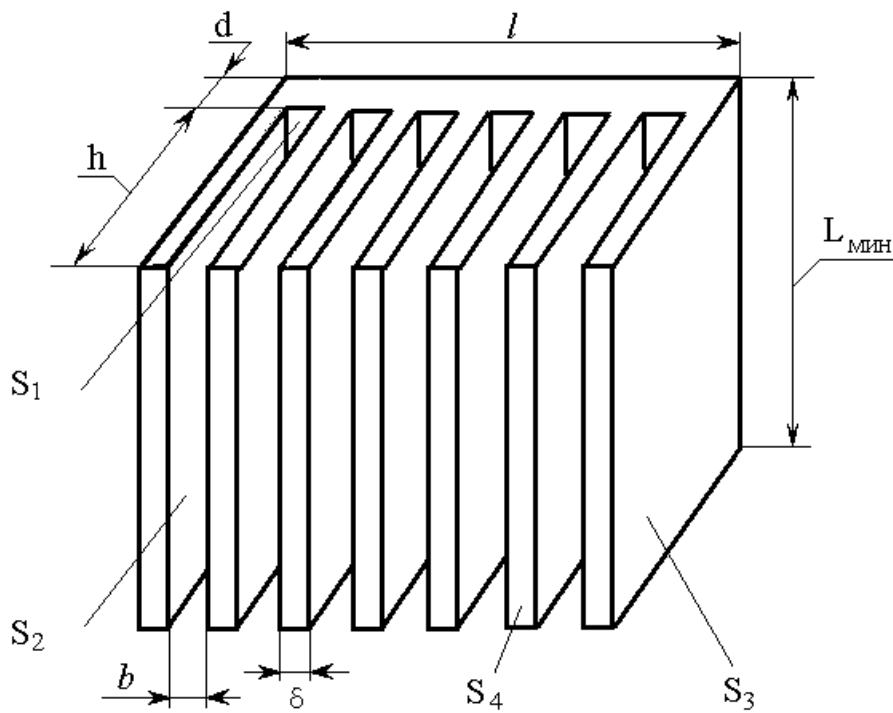


Рисунок 2 – Односторонній ребристий радіатор

Довжину сторони плити тепловідводу, на якій розташовані ребра, можна визначити за формулою:

$$l = [b \cdot (n-1) + \delta \cdot n], \text{ мм} \quad (5)$$

де l , виходячи з конструктивного оптимального виду радіатора, звичайно приймається близьким значенню L_{min} .

Якщо умову (4) взяти у вигляді рівності, то отримуємо ребро, оптимальне за вагою, але з низькою ефективністю, а отже, з великими габаритами тепловідводу. Прагнення отримати високу ефективність може привести до значної ваги тепловідводу.

За інших рівних умов вага тепловідводу буде пропорційною питомій вазі матеріалу і обернено пропорційна його теплопровідності.

Значення густин і коефіцієнтів теплопровідності, матеріалів, що найчастіше застосовуються, приведені в табл. 1. Переріз ребра може бути різним: оптимальне прямокутне ребро вимагає на 50%, трикутне на 4% більше матеріалу ніж параболічне. Тому рекомендуються ребра з трикутним і параболічним перерізами, тому що вони дозволяють значно зменшити вагу тепловідводу; однак на практиці у виробках РЕА значно частіше усе-таки використовуються тепловідводи з прямокутними ребрами.

Застосування оребрення не завжди приводить до збільшення коефіцієнтів тепловіддачі. При заданій площі тепловідводу збільшення кількості ребер викликає зменшення відстані між ними, що призводить до значного зменшення променевого і конвективного коефіцієнтів тепловіддачі. Тому при збільшенні кількості ребер сумарний коефіцієнт тепловіддачі зростає, досягаючи максимуму, а потім зменшується.

Зменшенням потужності розсіювання пояснюється перекриття приграничних температурних шарів на поверхні суміжних ребер і утворенням стійких зон зі зниженою конвекцією.

Під цим розуміється існування максимуму залежності потужності розсіювання P від кількості ребер.

Таблиця 1 – Значення густини і коефіцієнтів теплопровідності деяких матеріалів

Матеріал	Густина ρ , кг/м ³	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·град)
Мідь	8960	370
Алюміній (чистий)	2720	220
Алюміній (сплав)	2660	160
Магній (чистий)	1760	170
Сталь	7840	55
Сталь (нержавіюча)	7840	14

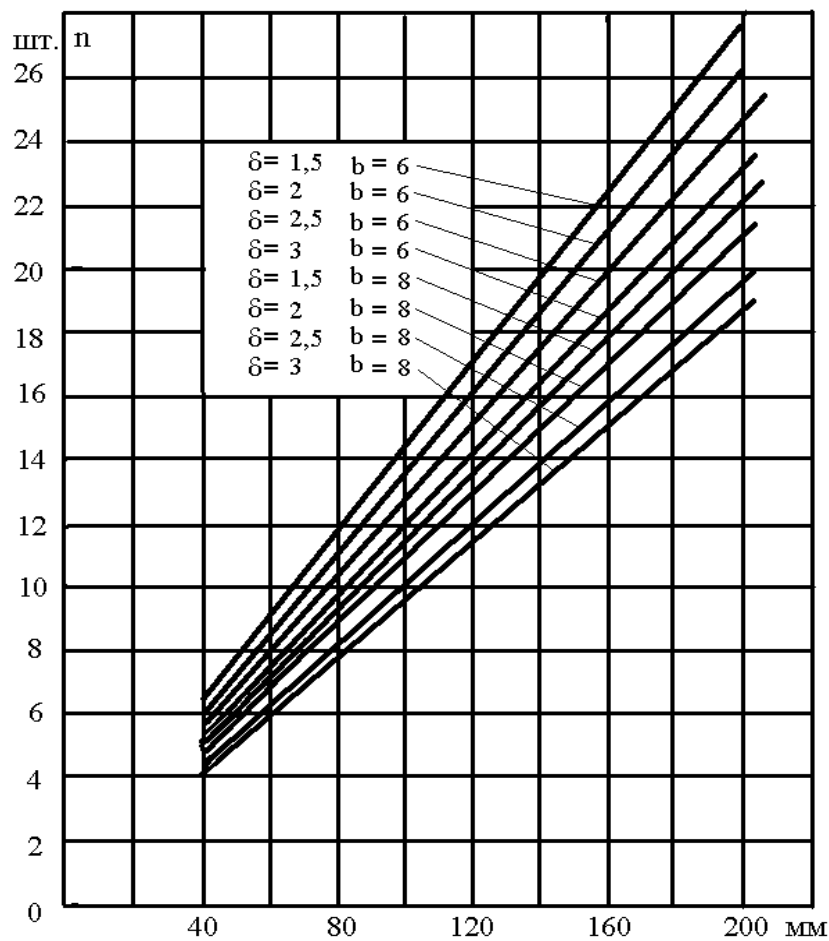


Рисунок 3 – Графік залежності числа ребер від довжини сторони радіатора, на якій розташовані ребра, при заданих товщині ребра δ і відстані між ребрами b

Доцільність оребрення визначається за критерієм Біо:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \delta}{2 \cdot \lambda}; \quad (6)$$

При $Bi < 1$ ребро сприяє охолодженню;

при $Bi > 1$ ребро є теплоізолятором;

при $Bi = 1$ ребро не впливає на тепловіддачу.

При обраних величинах l , b , δ число ребер визначається за графіками рисунків 3, 4 або розраховується за формулою

$$n = \frac{l + b}{b + \delta}, \text{ шт.} \quad (7)$$

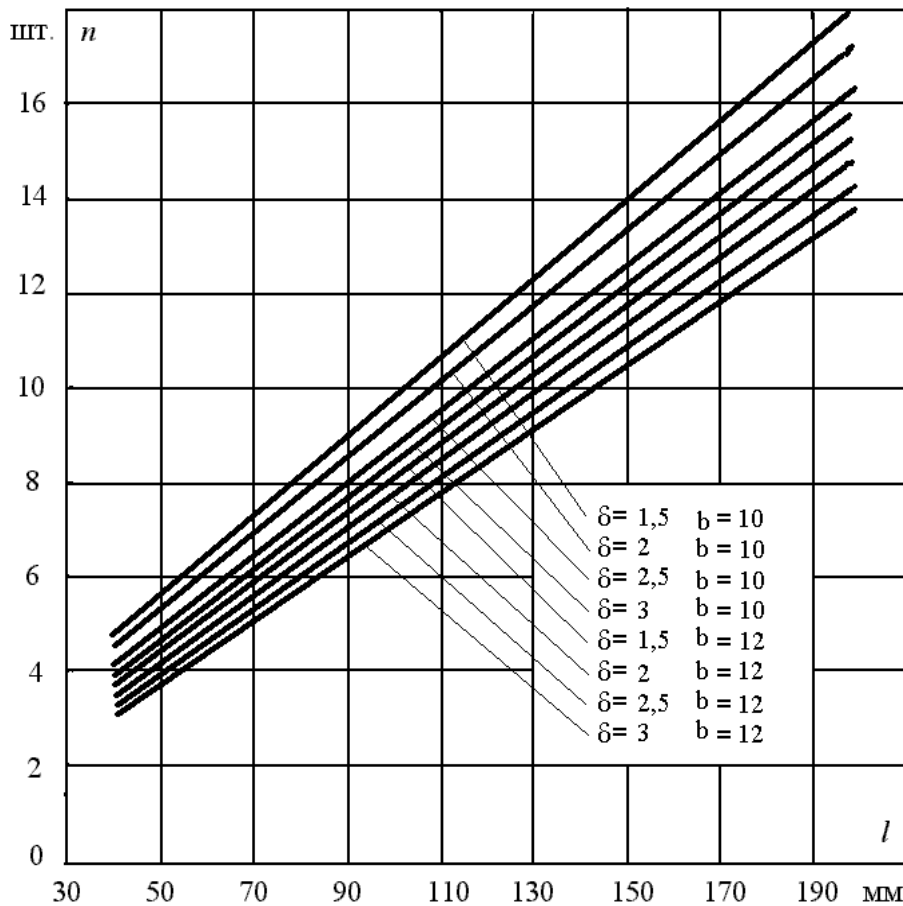


Рисунок 4 – Графік залежності числа ребер від довжини сторони радіатора, на якій розташовані ребра, при заданих товщині ребра δ і відстані між ребрами b

При визначенні потужності, що розсіює тепловідвід (рисунок 2), розіб'ємо всю його поверхню на кілька частин:

S_1 — плоскі поверхні, розташовані між сусідніми ребрами;

S_2 — поверхні ребер, повернені один до одного;

S_3 — поверхні кінцевих ребер, що омиваються зовнішнім середовищем;

S_4 — поверхні торців ребер;

S_5 — неоребрені поверхні ($S_5 = S_{zл}$ — площа гладкої (неоребреної) поверхні тепловідводу).

Площі поверхонь одностороннього тепловідводу з двома робочими торцевими поверхнями визначають за формулами

$$S_1 = L \cdot b \cdot (n - 1), \quad (8)$$

$$S_2 = 2 \cdot h \cdot L \cdot (n - 1), \quad (9)$$

$$S_3 = 2 \cdot (h + d) \cdot L, \quad (10)$$

$$S_4 = 2 \cdot d \cdot l + 2 \cdot h \cdot \delta \cdot n + \delta \cdot L \cdot n_l + \delta \cdot (l_1 + l_2) \cdot n_{l_1+l_2}, \quad (11)$$

де n_l — число повних ребер; $n_{l_1+l_2}$ — число неповних ребер;

l_1 і l_2 — довжини відрізків неповного ребра (рисунок 6).

Площа гладкої поверхні тепловідводу визначають за формулою

$$S_5 = S_{zл} = l \times L. \quad (12)$$

Площа оребреної поверхні визначають за формулою

$$S_{оребр} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4, \text{ см}^2. \quad (13)$$

Тоді загальна площа поверхні тепловіддачі буде дорівнювати

$$S_{общ} = S_{zл} + S_{оребр}. \quad (14)$$

Для двосторонньо оребреного тепловідводу (рисунок 5) із двома робочими торцевими поверхнями площі всіх тепловіддаючих поверхонь визначають за формулами

$$S_1 = 2 \cdot b \cdot L \cdot (n_l - 1), \quad (15)$$

$$S_2 = 2 \cdot h \cdot [(n_l - 1) \cdot 2 \cdot L + 2 \cdot (l_1 + l_2) \cdot n_{l_1+l_2}], \quad (16)$$

$$S_3 = 2 \cdot L \cdot (2 \cdot h + d), \quad (17)$$

$$S_4 = 2 \cdot \delta \cdot [n_l \cdot L + (l_1 + l_2) \cdot n_{l_1+l_2}] + 2 \cdot d \cdot l + 4 \cdot h \cdot \delta \cdot n, \quad (18)$$

$$S_5 = 0.$$

Формулами (8-14) слід користуватися для розрахунку площ тепловідводу для односторонньо оребреного радіатора. При цьому варто враховувати орієнтацію тепловідводу в конкретній конструкції, що впливає на вибір відповідних вищенаведених розрахункових формул. При вертикальному розміщенні односторонньо оребреного радіатора не враховується площа торцевої опорної площадки, що дорівнює $d \cdot l + h\delta n$; при горизонтальній — площа гладкої опорної площадки, що дорівнює $L \cdot l$.

Коефіцієнти тепловіддачі гладкої й оребреної поверхонь $\alpha_{zл}$ і $\alpha_{оребр}$, що дорівнює сумі коефіцієнтів за рахунок випромінювання і конвекції, визначаються за формулами:

$$\alpha_{zл} = \alpha_{л.zл} + \alpha_{к.zл}; \quad (19)$$

$$\alpha_{оребр} = \alpha_{л.оребр} + \alpha_{к.оребр}. \quad (20)$$

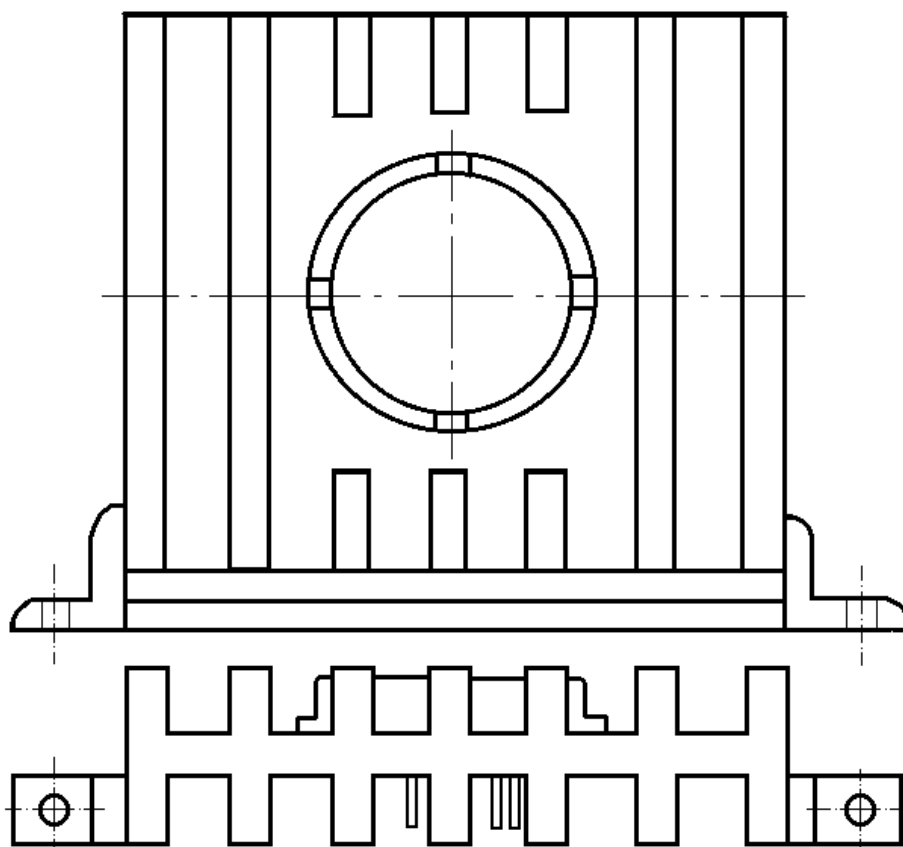


Рисунок 5 – Кріплення транзистора з ребреної сторони двостороннього ребристого радіатора

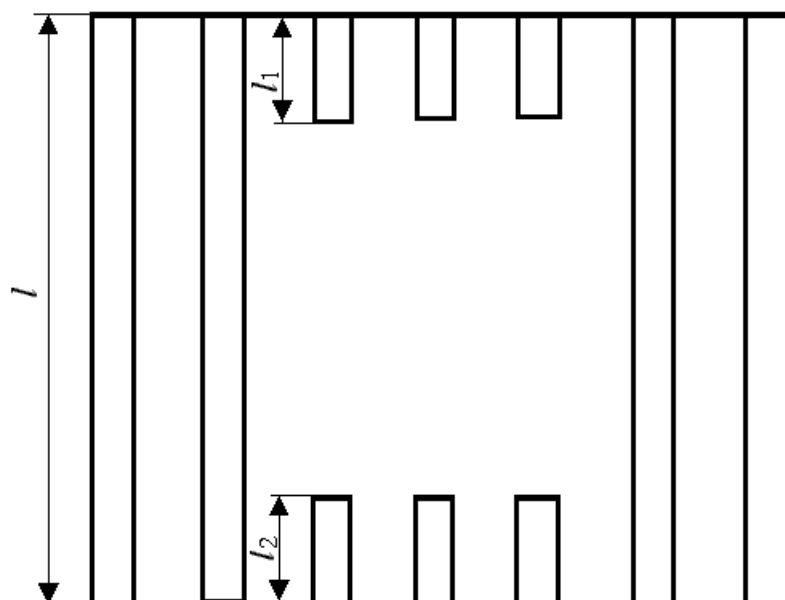


Рисунок 6 – Радіатор з неповними ребрами

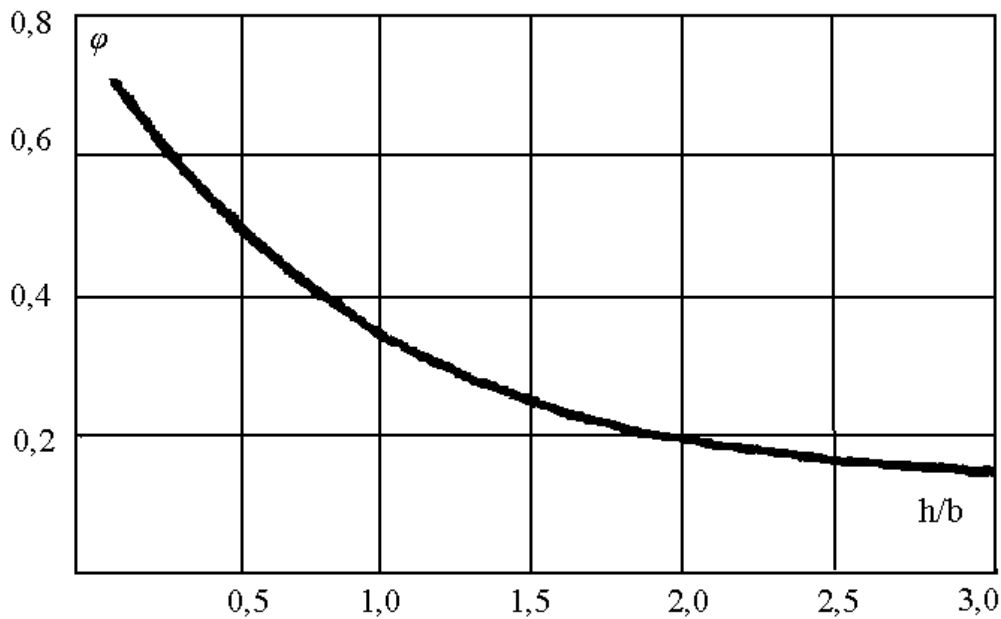


Рисунок 7 – Графік залежності коефіцієнта опромінення поверхні ребер φ від відношення їхньої висоти h до відстані між ними b

Променистий коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою

$$\alpha_n = \varepsilon \cdot f(t_T, t_c) \cdot \varphi_{ic}, \quad (21)$$

де ε – коефіцієнт чорноти поверхні повного нормального випромінювання, значення якого для різних поверхонь приведені в таблиці 2; $f(t_T, t_c)$ – функція випромінювання; φ_{ic} – коефіцієнт опромінення між i -ою поверхнею і середовищем; $\varphi_{ic} = 1$, якщо теплове випромінювання не екрановане сусідніми поверхнями.

Для поверхонь S_3, S_4, S_5 ; $\varphi_{33} = \varphi_{43} = \varphi_{53} = 1$. Для поверхонь S_1 і S_2 коефіцієнт опромінення визначається з графіка $\varphi = f(h/b)$ (рис. 7) або розраховується за формулою

$$\varphi = \frac{b}{2 \cdot h + b}, \quad (22)$$

де b – відстань між ребрами, мм; h – висота ребра, мм.

Для гладкої поверхні $\varphi_{ic} = 1$, а значення функції $f(t_T, t_c)$, використовується для визначення α_n і визначається за формулою

$$f(t_T, t_c) = \frac{5,66 \cdot 10^{-4} \left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4}{t_T - t_c}. \quad (23)$$

Значення $f(t_T, t_c)$ дані на графіку (рисунок 8) або можуть бути розраховані за формулою (23); t_T, t_c – температури поверхні тепловідводу і середовища; T_T, T_c – абсолютні значення температур за шкалою Кельвіна.

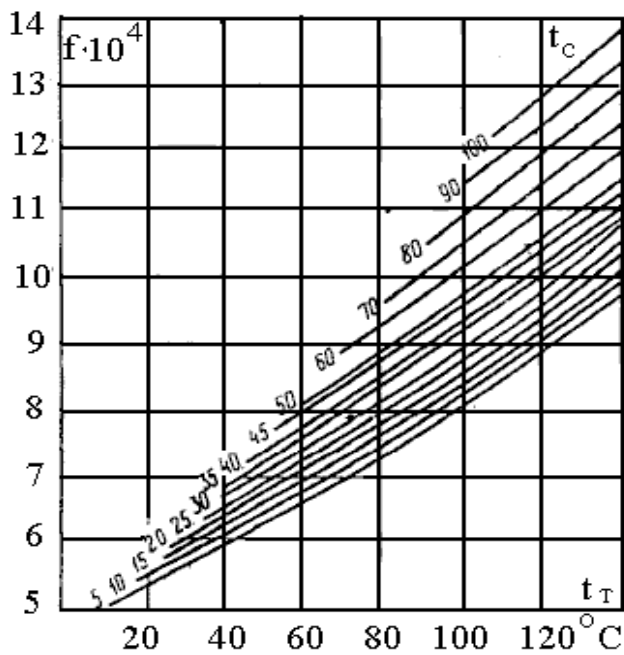


Рисунок 8 – Графік залежності коефіцієнта f від температури випромінюючої поверхні тепловідвода t_T при заданій температурі навколишнього середовища t_c

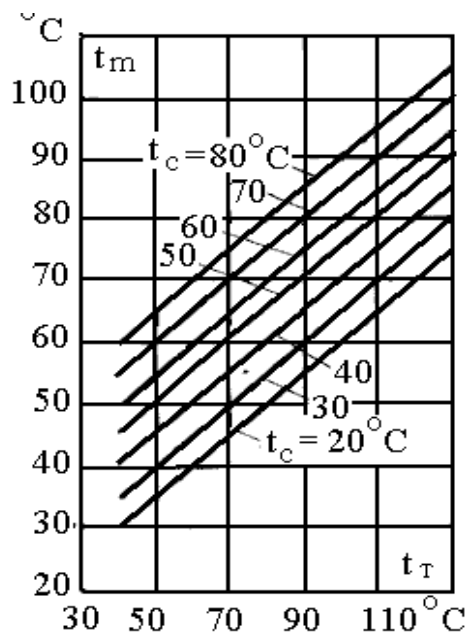


Рисунок 9 – Графік залежності визначуваної температури t_m від середньповерхневої температури тепловідвода t_T при заданій температурі навколишнього середовища t_c

Конвективний коефіцієнт тепловіддачі визначається по формулі

$$\alpha_K = 5,62 \cdot A(t_m) \cdot B, \text{ Вт/}(\text{см}^2 \cdot \text{град}), \quad (24)$$

де $t_m = (t_T + t_c)/2$, °C визначається за графіком (рисунок 9); $A(t_m)$ – параметр, що враховує фізичні властивості навколишнього середовища, визначається за графіком (рисунок 10); $B = [(t_T - t_c)/L]^{1/4}$ визначається за графіком (рисунок 11).

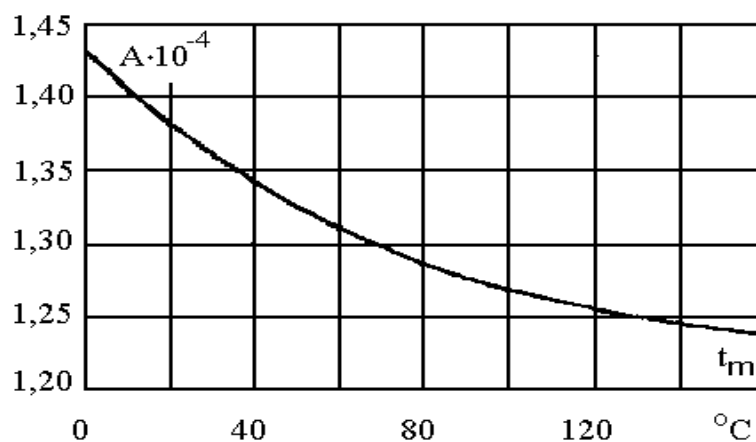


Рисунок 10 – Графік залежності коефіцієнта A від визначуваної температури t_m

При підвищенні або зниженні тиску навколишнього повітря коефіцієнт тепловіддачі за рахунок конвекції збільшується або зменшується відповідно.

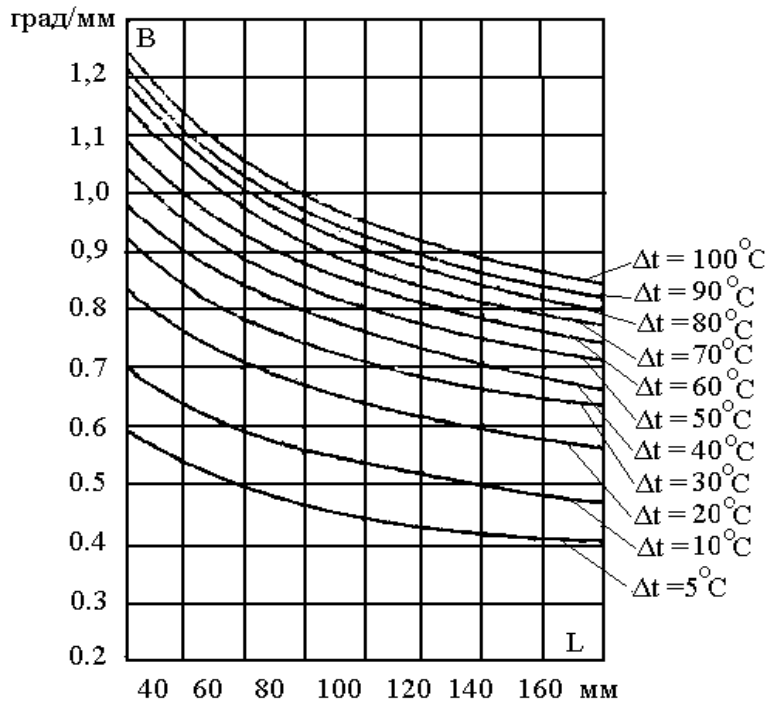


Рисунок 11 – Графік залежності коефіцієнта B від протяжності ребра L при заданій середньоповерхневій температурі перегріву $\Delta t = t_r - t_c$

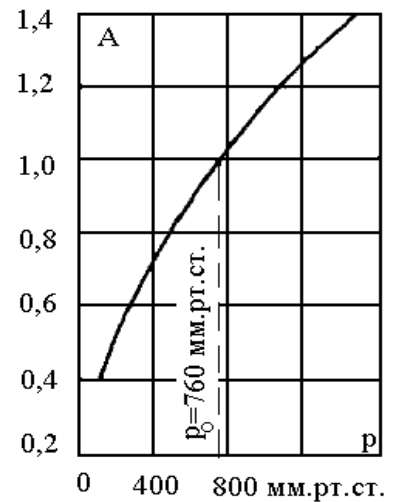


Рисунок 12 – Залежність коефіцієнта A для обчислення конвективного коефіцієнта тепловіддачі від тиску повітря p

Величина коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_K(p)$ при тиску повітря p може бути знайдена за формулою $\alpha_K(p) = \alpha_K \cdot A(p/p_0)$. Коефіцієнт A визначається з графіка (рисунок 12).

Таблиця 2 – Орієнтовні значення коефіцієнтів чорноти для різних матеріалів і стану їх поверхонь

Найменування матеріалу	Температура	ε
Алюміній полірований	50—500	
Алюміній із шорсткуватою поверхнею	20—50	0,06—0,07
Алюміній сильно окислений	50—500	0,2—0,3
Алюмінієвий лак по шорсткуватій поверхні	20	0,4
Алюмінієве фарбування	50	0,5
Латунь матова тьмяна	20—350	0,22

Продовження таблиці 2

Латунь полірована	200	0,03
Латунь листова прокатана	20	0,06
Латунь листова, оброблена наждаком	20	0,2
Латунь окислена при 600°C	20	0,59—0,61
Мідь полірована	50—100	0,02
Мідь торгова, шабрена до блиску	20	0,07
Мідь окислена	50	0,6
Мідь окислена	500	0,88
Сталь листова шліфувана	950—1100	0,55—0,61
Сталеве литво поліроване	750—1050	0,52—0,56
Сталь (листовий прокат)	50	0,56
Сталь із шорсткуватою плоскою поверхнею	50	0,95—0,98
Сталь окислена	20—600	0,3
Сталь сильно окислена	50	0,88
Лак чорний матовий	40—100	0,96—0,98
Лак чорний блискучий, розпилений на залізі	20	0,87
Лак білий	40—100	0,8—0,95
Олійні фарби різних кольорів	100	0,92—0,96
Сажа з рідким склом	20—200	0,96
Сажа, нанесена на тверду поверхню	50—1000	0,96
Емаль біла	20	0,9

Визначивши величину коефіцієнта тепловіддачі гладкої поверхні, знаходять і потужність, що розсіюється гладкою поверхнею, за формулою

$$P_{zl} = \bar{a}_{zl} S_{zl} (t_T - t_c), \quad \text{Вт} \quad (25)$$

і величину теплового опору з графіка (рисунок 13).

$$R''_{TC} = \frac{1}{\bar{a}_{ГЛ} S_{ГЛ}}, \quad \text{град/Вт}$$

Потужність, що розсіює ребрена поверхня тепловідводу в середовищі, визначається за формулою

$$P = \sum P_i = \sum [\alpha_{ик} S_i (t_i - t_{ci}) + \alpha_{ик} (t_i - t_c)], \quad (26)$$

де P_i – потужність, що розсіюється i -ою поверхнею; t_{ci} – температура середовища між ребрами. Температура повітря біля поверхонь S_3, S_4, S_5 , дорівнює t_c , біля поверхонь S_1 і S_2 між ребрами дорівнює t'_c

$$t'_c = t_s - (t_s - t_c) \cdot H, \quad (27)$$

де H – відносний температурний напір; t_s – середньоповерхнева температура тепловідводу.

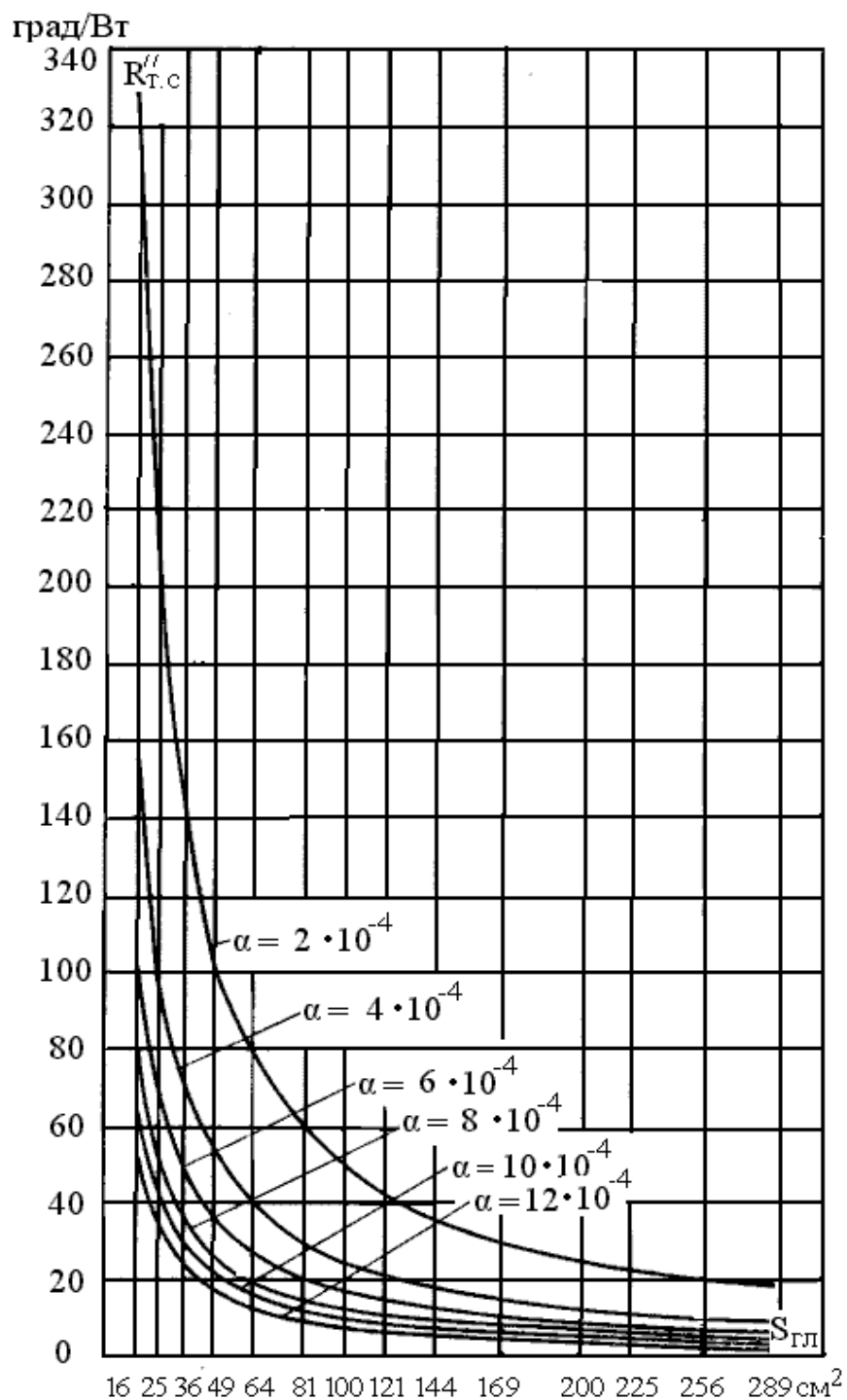


Рисунок 13 – Графік залежності теплового опору гладкої поверхні радіатора від площі при заданому коефіцієнті тепловіддачі $\alpha_{ел}$

Якщо тепловідвід орієнтований у просторі так, що площини його ребер вертикальні, то H визначається залежністю $H = f(\eta)$ (див. рисунок 14),

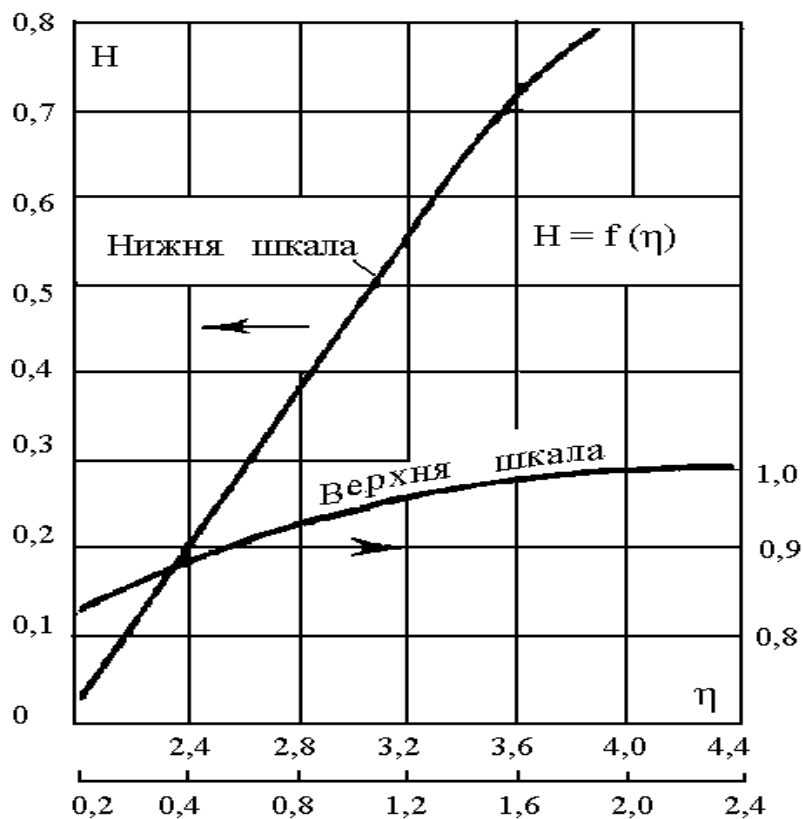


Рисунок 14 – Графік залежності відносного температурного напору H від коефіцієнта η

де η – безрозмірний параметр :

$$\eta = A_4(t_m) \cdot b \cdot C. \quad (28)$$

У формулі $A_4(t_m)$ – параметр, що враховує фізичні властивості середовища; значення його дані на рисунку 15.

Значення $t_m = (t_r + t_c)/2$ визначається з графіка (рисунок 9).

Для оребрених тепловідводів (рисунок 2) для площ S_3 , S_4 і S_5 значення $t_{ci} = t_c$, а для площ S_1 і S_2 значення $t_{ci} = t'_c$. Конвективний коефіцієнт тепловіддачі торцевих поверхонь ребер можна приймати рівним коефіцієнту тепловіддачі поверхонь сіцевих ребер.

Для розрахунків за формулою (26) визначають величини K (K') з графіка, приведеному на рисунку 16; $M = L^{1/2}$ [мм] – з графіка рисунок 17. У формулі (28), де $C = K/M$ і C' визначають з графіка рисунок 18.

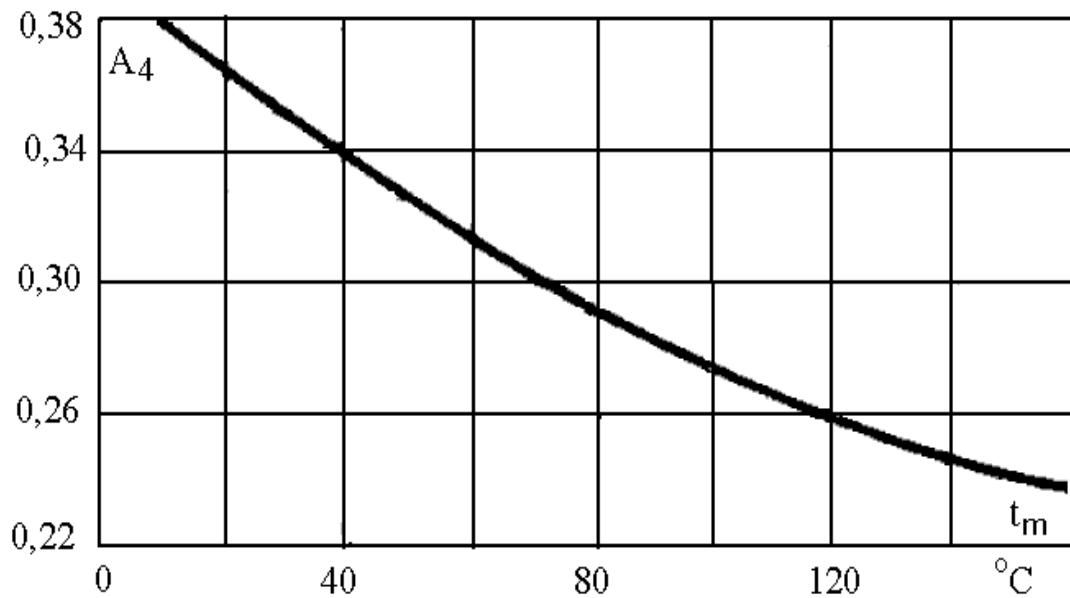


Рисунок 15 – Графік залежності безрозмірного коефіцієнта A_4 від визначуваної температури t_m

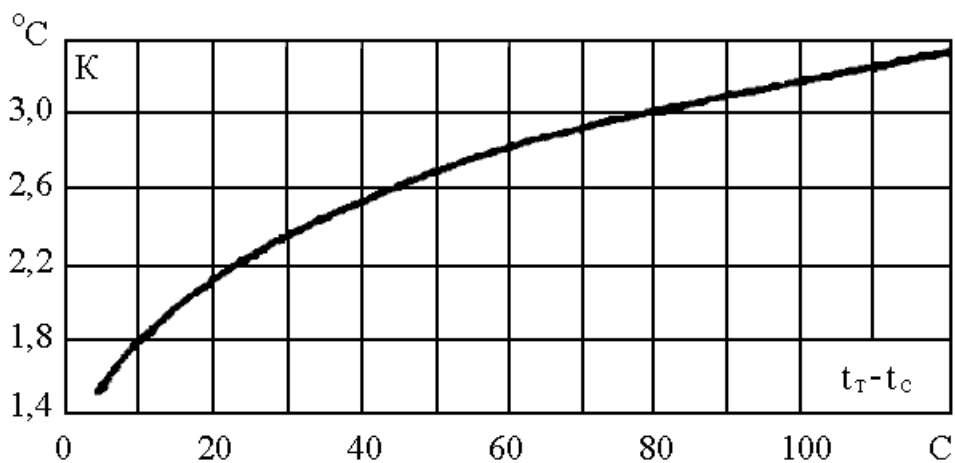


Рисунок 16 – Графік залежності параметра K від середньповерхневої температури перегріву

Визначають тепловий опір ребреної поверхні з графіка (рисунок 19) чи за формулою

$$R'_{TC} = \frac{t_T - t_c}{P_{ребр}}, \text{ град/Вт.} \quad (29)$$

Визначення загального опору тепловідводу $R_{TC}^{розр}$ (загальний тепловий опір на ділянці тепловідвід – середовище) виконується для односторонньо ребреного тепловідводу за формулами рівнобіжного додавання двох теплових опорів: теплового опору гладкої поверхні і теплового опору ребреної поверхні, тобто

$$R_{TC}^{розр} = \frac{R'_{TC} \cdot R''_{TC}}{R'_{TC} + R''_{TC}} \quad (30)$$

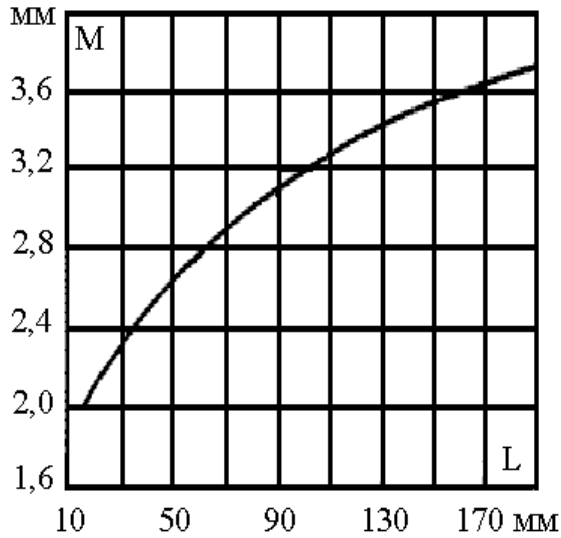


Рисунок 17 – Графік залежності параметра M від протяжності ребра L

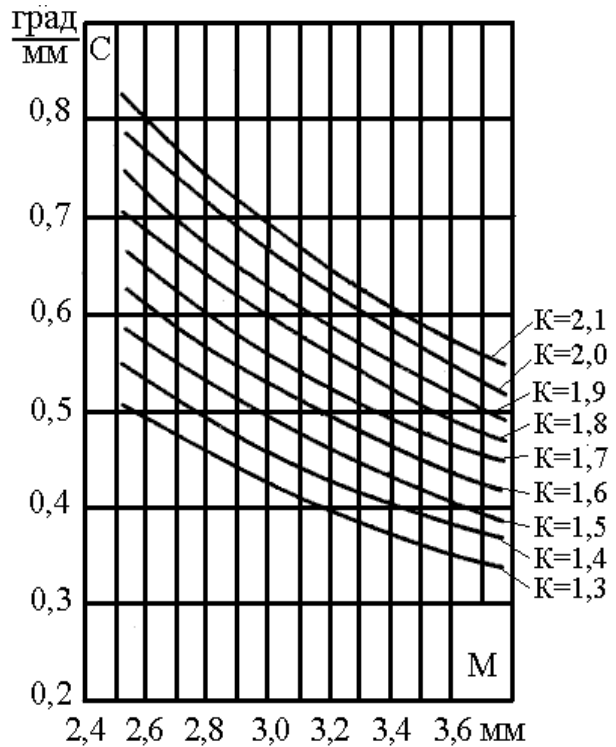


Рисунок 18 – Графік залежності $C = f(K, M)$, де $C = K/M$ (град/мм); $K = (t_T - t_C)^{1/4}$ (град), $M = L^{1/4}$ (мм).
Графік справедливий для C'

Визначення загальної розрахункової потужності, що розсіюється оребреною і гладкою поверхнями тепловідводу, здійснюється за формулою

$$P_{заг.розр.} = P_{гл} + P_{реб}, \text{ Вт.} \quad (31)$$

Для перевірки правильності розрахунку теплового опору тепловідводу порівнюють значення теплового опору, отриманого розрахунковим шляхом за формулою (30), з тепловим опором $R_{TC \text{ вих.дан.}}$, отриманим за формулою (2). Між ними повинно бути таке співвідношення:

$$R_{TC}^{розр} \leq R_{TC \text{ вих.дан.}}, \text{ тобто } P_{заг.розр.} \geq P_{вих.дан.} \quad (32)$$

Варто пам'ятати, що при експлуатації НПП і розрахунку потужності величини струмів і напруги не повинні перевищувати норм, зазначених у ТУ на дані типи приладів. Розходження заданих і розрахованих параметрів не повинно перевищувати 25%. В випадку перевищення потрібно зменшити габаритні розміри ребристого тепловідводу за рахунок зменшення висоти L на (15 – 20) % і виконати перерозрахунок.

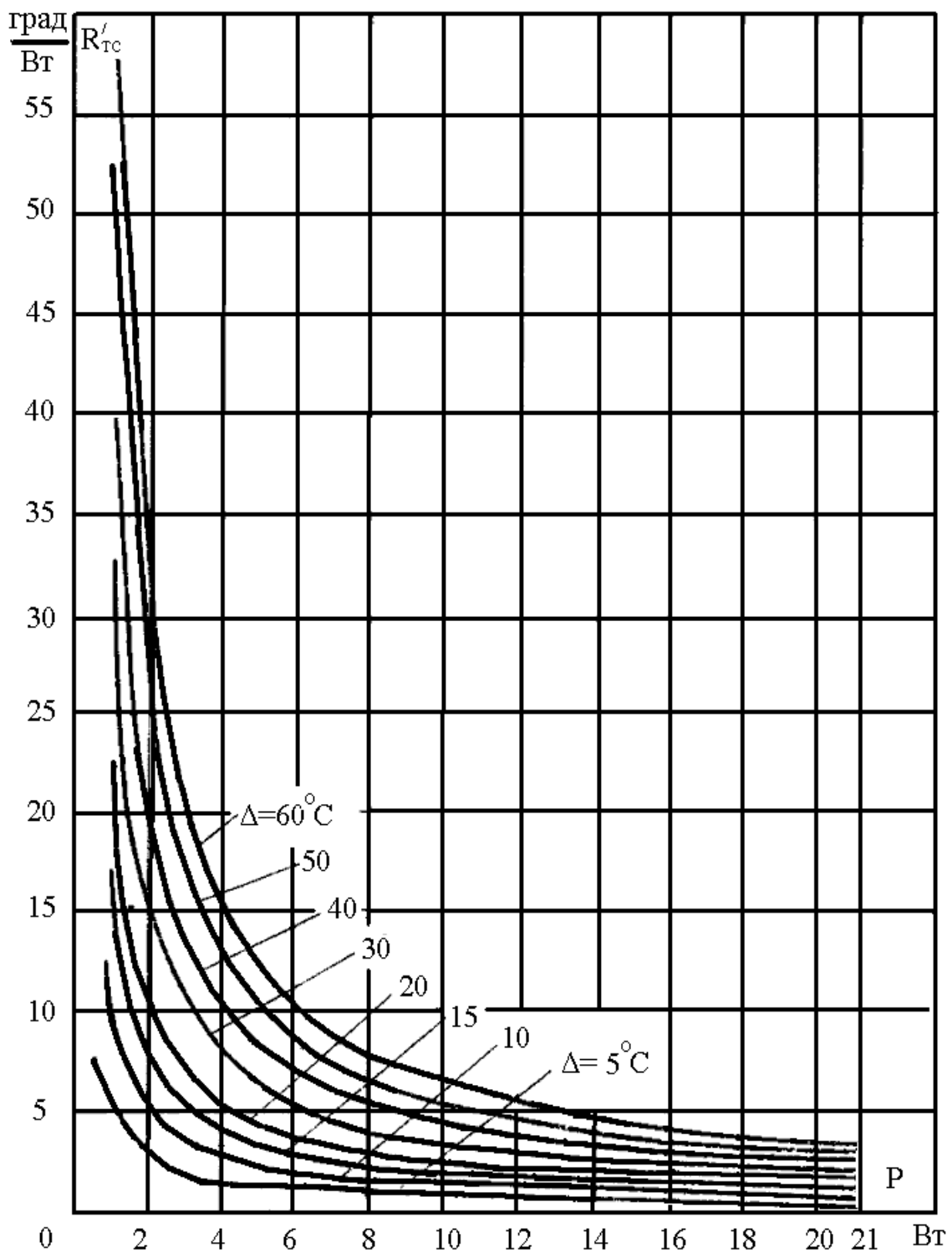


Рисунок 19 – Г афік залежності теплового опору ребристої поверхні тепловідводу від середньоповерхневої температури перегріву $t_T - t_C$

3.1.2.Методика розрахунку двосторонньо ребреного тепловідводу

Розрахунок двосторонньо ребреного тепловідводу виконується за тими ж формулами, що і розрахунок односторонньо ребреного тепловідводу.

Крім того, необхідно додатково визначати тепловий опір ребреної поверхні за формулою

$$R'_{tc} = (t_T - t_c) / (P_{ребр} / 2), \quad \text{град/Вт} \quad (33)$$

і загальний розрахунковий тепловий опір ребреної поверхні – за формулою

$$R_{tc\text{ розр}} = (R'_{tc} R''_{tc}) / (R'_{tc} + R''_{tc}) = 0,5 \cdot R'_{tc} \quad (34)$$

для випадку, якщо виїмка ребер зроблена однаково по обидва боки тепловідводу. При різній виїмці ребер величини R'_{tc} і R''_{tc} будуть відрізнятися. Перевірка правильності розрахунку здійснюється за формулами односторонньо ребреного тепловідводу.

3.1.3.Методика розрахунку тепловідводу типу пластини

Розрахунок тепловідводу типу пластини виконується за тими ж формулами, що і розрахунок односторонньо ребреного тепловідводу.

Вибір довжини сторони пластини виконується шляхом підбору. Перевірка правильності розрахунку тепловідводу типу пластини виконується за формулами односторонньо ребреного тепловідводу.

3.2. Розрахунок тепловідводу для повітряного примусового охолодження

При розрахунку тепловідводів для повітряного примусового охолодження вихідні дані залишаються тими ж, що і у випадку природного охолодження: максимально припустима температура колекторного переходу транзистора t_{p-n} , тепловий опір між переходом і корпусом $R_{пк}$, тепловий контактний опір $R_{кт}$; потужність, що розсіюється транзистором, $P_{вих.дан}$; температура навколишнього середовища t_c .

Конструкція тепловідводу вибирається з вимог, поставлених до блоку, де повинен бути розміщений тепловідвід. Це може бути пластинка, тепловідвід з різними варіантами однобічного чи двостороннього (Д) ребрення, штирковий тепловідвід з різною формою штиря.

Додатково задаються умови теплообміну, наприклад, обдув тепловідводу повітрям уздовж ребер з визначеною швидкістю (варіант задачі I; спосіб охолодження – вільна конвекція, швидкість потоку повітря $V=0$; див. табл. додатка А). Чи необхідно, додатково розрахувати швидкість потоку повітря, що набігає і обдуває тепловідвід (варіант задачі II; спосіб охолодження – примусова конвекція, $V \neq 0$; див. табл. додатка А).

У варіанті I конвективний коефіцієнт тепловіддачі розраховується за формулами, зазначеними у таблиці 3, для різних режимів теплових потоків і видів обтікання тепловідводу (режими 1,2,3 для подовжнього обтікання потоку).

У варіанті II спочатку розраховується швидкість потоку повітря V , що набігає і обдуває тепловідвід, а потім визначається α_k за формулами таблиці 3. Для розрахунку V вимагаються такі дані: продуктивність вентилятора M_B , що нагнітає повітря в блок; габарити і коефіцієнт заповнення блока.

Таблиця 3 – Формули розрахунку конвективних коефіцієнтів тепловіддачі для режимів течії рідини (повітря)

Умови тепловіддачі	Примітки
1. Ламінарний потік $\alpha_k = 1,16A_3 \left(\frac{\rho V}{L} \right)^{0,5}$	$A_3=3,16$ ρ - щільність, кг/м ³ ; V - швидкість потоку, м/с; L - розмір уздовж руху потоку, м; C_p - питома теплоємність, Дж/(кг · град)
2. Турбулентний потік $\alpha_k = 1,16A_4 \left(\frac{\rho V}{L^{0,2}} \right)^{0,3}$	
3. Перехідна область $\alpha_k = 0,01365 \cdot \rho \cdot V \cdot C_p$	
4. Поперечне обтікання пластини до 150 мм ($V=4 \div 35$ м/с) $\alpha_k = 16,8 \cdot V^{0,45}$	

Нехай задано: продуктивність вентилятора $M_B = 400$ м³/год; габарити блока $h \times b \times l = 1 \times 1 \times 1$ м³, де (h – висота, b – ширина, l – довжина блока); коефіцієнт заповнення блока $K_3 = 0,8$ тобто на 80% обсяг блока заповнений радіодеталлями; площа живого перерізу без обліку коефіцієнта заповнення $S_{ж} = 1 \times 1$ м². Отже, площа для проходження повітряного потоку складає $(1 - K_3) = 0,2$ м².

Швидкість потоку V , що набігає на тепловідвід, розраховується за формулою

$$V = \frac{M_B}{(1 - K_3) \cdot S_{ж} \cdot 3600}, \text{ м/с.} \quad (35)$$

Формули для розрахунку конвективного коефіцієнта тепловіддачі α_k при повітряному охолодженні для ламінарного, турбулентного і перехідного режимів руху повітря приведені в табл. 3.

Максимальна температура колекторного переходу

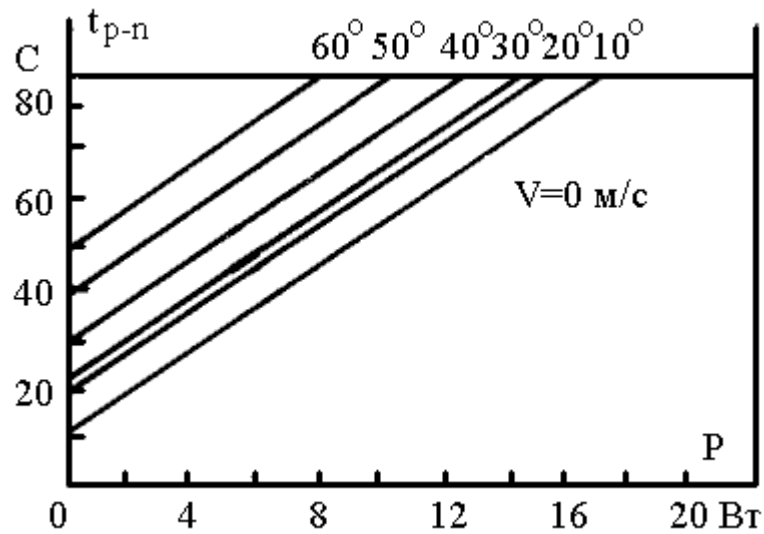


Рисунок 20 – Залежність температури переходу від потужності, що розсіюється транзистором П210 при природній конвекції

Коефіцієнт випромінювання α_l для випадку повітряного примусового охолодження розраховується так само, як і для природної конвекції.

Як сказано раніше, примусове обдування тепловідводу потоком повітря (чи іншого газу) приводить до різкого зростання тепловіддачі і зниженню температури корпусу і $p-n$ переходу НПП. Істотне збільшення тепловіддачі досягається вже при невеликих швидкостях повітряного потоку (1-1,5 м/с). Такі швидкості потоку можуть бути легко отримані, наприклад, за допомогою звичайного настільного вентилятора невеликої потужності.

На графіках рисунків 20, 21 показана зміна температури $p-n$ переходу при різних потужностях для транзистора П210 з тепловідводом, загальна площа якого дорівнює 1027 см^2 при природній конвекції ($V=0$) і примусовій конвенції ($V=2$ м/с).

На графіку (рисунок 22) показана залежність потужності розсіювання P від швидкості обдування для того ж транзистора П210 (при різних t_c). На підставі цього графіка можна зробити висновок, що збільшення швидкості охолоджуючого повітря вище 3,5 – 5 м/с не приводить до помітного збільшення потужності.

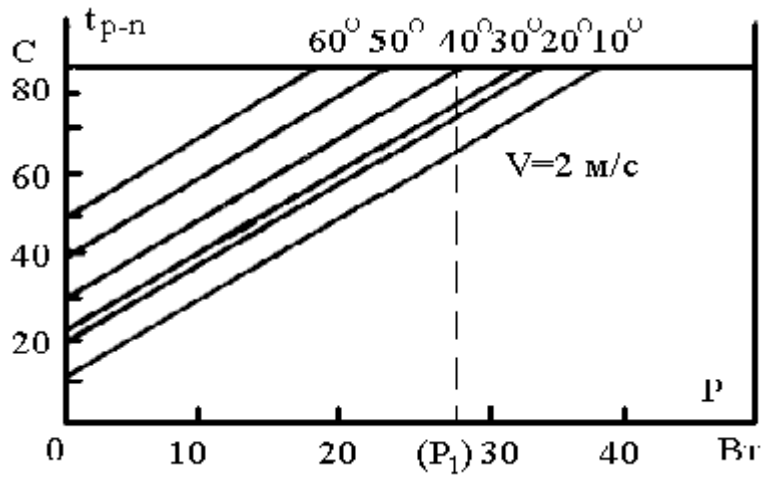


Рисунок 21 – Залежність температури переходу від потужності, що розсіюється транзистором П210, при примусовому охолодженні зі швидкістю 2 м/с

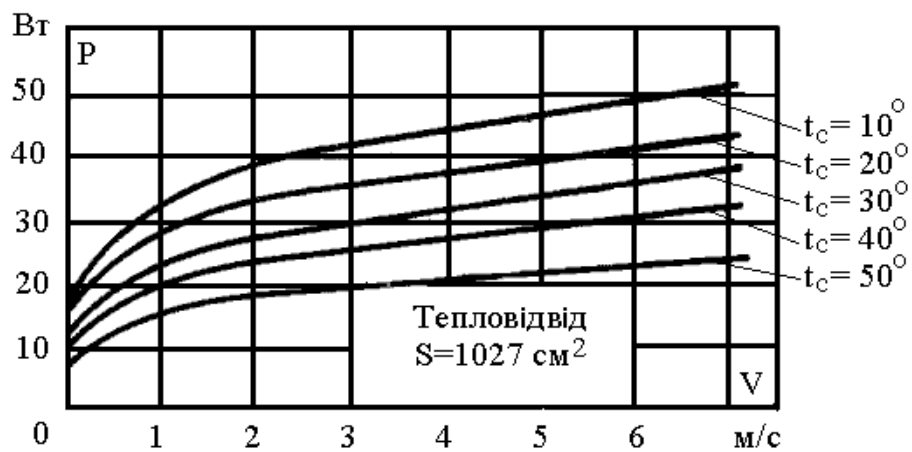


Рисунок 22 – Залежність потужності, що розсіюється транзистором П210, від швидкості потоку, що набігає, при різних температурах навколишнього середовища

4 ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ ТЕПЛОВІДВОДІВ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ТРАНЗИСТОРІВ В УМОВАХ ПРИРОДНОГО І ПРИМУСОВОГО ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

4.1. Приклад розрахунку односторонньо ребреного тепловідводу

Для охолодження транзистора типу П210 потужністю 5Вт розрахувати односторонньо ребрений тепловідвід, що працює в умовах природної конвекції при температурі навколишнього середовища $t_c=60^\circ\text{C}$. Потрібно визначити геометричні розміри і число ребер.

Вихідні дані:

$t_{p-n}=85^\circ\text{C}$ (знаходиться з довідника);

$R_{пк}=1$ град/Вт (знаходиться з довідника);

$R_{кт}=0,4$ град/Вт (визначається експериментальним шляхом);

$t_c=60^\circ\text{C}$;

$P_{вих.дан}=5$ Вт.

Вид тепловідводу – ОВГ (односторонній, вертикальний з установкою ППП з гладкої сторони).

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

1. Максимальна потужність, що може розсіяти транзистор з тепловідводом при даних t_{p-n} , t_c , $R_{пк}$

$$P_{макс} = (t_{p-n} - t_c) / R_{пк} = (85 - 60) / 1 = 25 \text{ Вт.}$$

2. Тепловий опір тепловідводу $R_{тс}$ по вихідним даним

$$R_{тс.вих.дан.} = q \cdot (t_{p-n} - t_c) - P \cdot (R_{пк} + R_{кт}) / P;$$

$$R_{тс.вих.дан.} = 0,9 \cdot (85 - 60) - 5 \cdot (1 + 0,4) / 5 = 3,24 \text{ град/Вт;}$$

3. Середньоповерхнева температура перегріву тепловідвід – середовище

$$t_T - t_c = P \cdot R_{тс.вих.дан.};$$

$$t_T - 60 = 5 \cdot 3,24 = 16,2^\circ\text{C}; \quad t_T = 60 + 16,2 = 76,2^\circ\text{C}$$

4. Визначимо довжину ребра $L_{мін}$ з графіка (рисунок 1) залежності максимального теплового опору від довжини ребра $L_{мін}$ у діапазоні від 50 мм до 190 мм і температури перегріву тепловідводу

$$t_T - t_c = 10^\circ\text{C} \text{ і } t_T - t_c = 25^\circ\text{C};$$

$$R_{тс.вих.дан.} = f(L_{мін}, t_T - t_c).$$

З графіка $L_{мін}$ (рис. 1) дорівнює 80 мм при $R_{тс.вих.дан.} = 3,24$ град/Вт і температурі перегріву $16,2^\circ\text{C}$.

5. Вибрати величини L , l , b , δ , h , d відповідно до рекомендації розділу 3.1.1.

Вибираємо L , l , b , δ , h , d : $l = 90$ мм, $L = 90$ мм, $b = 12$ мм, $\delta = 3$ мм, $d = 3$ мм, $h = 22$ мм.

6. Визначити розрахункове число ребер n за формулою (7) з урахуванням рекомендацій, приведених перед формулою (5) і графіка рисунок 3.

$$n_p = 6,8.$$

Одержане значення n_p округлюється до більшого найближчого цілого числа $n=7$. За цим значенням уточнюється довжина l за формулою (5). Приймаємо $l=93\text{мм}$.

7. Площа гладкої поверхні тепловідводу для випадку кріплення транзистора з гладкої сторони (див. рисунок 23) за формулою (12)

$$S_{zл} = l \times L = 93 \times 90 = 8370 \text{ мм}^2 = 83,7 \text{ см}^2.$$

8. Визначити площу оребреної поверхні тепловідводу для випадку кріплення транзистора з гладкої сторони за формулами (8 – 14) (див. рисунки 2;23), де

$$S_{оробр} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4,$$

$$\text{де } S_1 = L \cdot y \cdot (n-1); S_2 = 2 \cdot h \cdot L \cdot (n-1); S_3 = 2 \cdot (n+d) \cdot L; S_4 = 2 \cdot d \cdot l + 2 \cdot h \cdot \delta \cdot n + \delta \cdot L \cdot n;$$

$$S_{оробр} = 90 \cdot 12 \cdot (7-1) + 2 \cdot 22 \cdot 99 \cdot (7-1) + 2 \cdot (22+3) \cdot 90 + 2 \cdot 3 \cdot 93 + 2 \cdot 22 \cdot 3 \cdot 7 + 3 \cdot 90 \cdot 7 = 380 \text{ см}^2.$$

Примітка. При оцінці S_4 враховані всі ребра прийняті повними за рахунок установки транзистора з гладкої сторони.

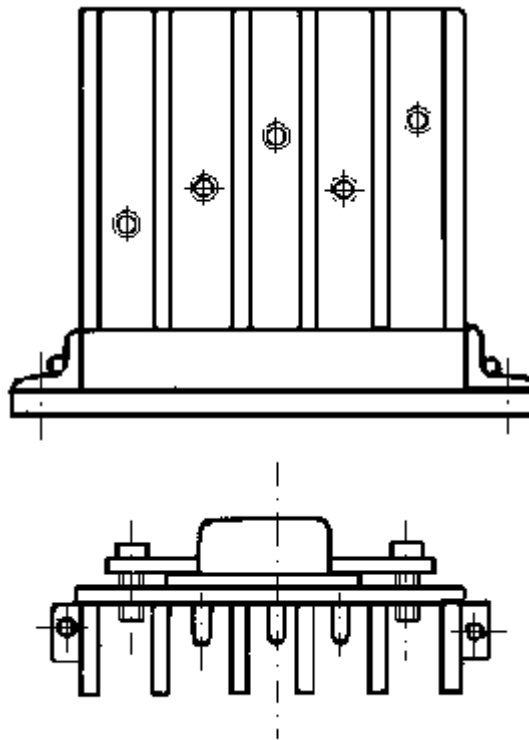


Рисунок 23 – Схематичне кріплення транзистора з гладкої сторони однібічного оребреного тепловідводу

9. Коефіцієнт тепловіддачі для гладкої поверхні

$$a_{zл} = a_{л.зл} + a_{к.зл}. \quad (36)$$

Величина $a_{л.зл}$ — коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням гладкої поверхні, що визначається за формулою

$$a_{л.гл} = \varepsilon f(t_T, t_C) \cdot \varphi_{ic},$$

де $\varepsilon=0,9$ для чорненого тепловідводу; φ_{ic} — коефіцієнт опромінення між i -й поверхнею і середовищем.

Для гладкої поверхні значення $\varphi_{ic}=1$; значення $f(t_T, t_C)$ визначається з графіка (рисунок 8). При цьому

$$a_{л.гл} = \varepsilon \cdot f(t_T, t_C) = 0,99 \cdot 10^{-4} = 8,1 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}).$$

У формулі (36) величина $a_{к.гл}$ — конвективний коефіцієнт тепловіддачі гладкої поверхні. Його значення визначається за формулою

$$a_{к.гл} = 5,62 \cdot A(t_m) \cdot B.$$

Значення t_m визначається з графіка (рисунок 9).

$$t_m = 68,1^\circ \text{C}.$$

Значення $A(t_m)$ визначається з графіка (рисунок 10) і дорівнює $1,3 \cdot 10^{-4}$.

Величина B визначається за формулою

$$B = ((t_m - t_C)/L)^{1/4}$$

або з графіка (рисунок 11)

$$B = 0,652.$$

При цьому $a_{л.гл} = 5,62 \cdot 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot 0,652 = 4,75 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}).$

Загальний коефіцієнт тепловіддачі гладкої поверхні дорівнює

$$a_{зл} = 8,1 \cdot 10^{-4} + 4,75 \cdot 10^{-4} = 12,85 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}).$$

10. Потужність, що розсіюється гладкою поверхнею

$$P_{зл} = a_{зл} \cdot S_{зл} \cdot (t_T - t_C) = 12,85 \cdot 10^{-4} \cdot 83,7 \cdot 16,2 = 1,74 \text{ Вт}.$$

11. Тепловий опір гладкої поверхні $R''_{т.с}$ визначається з рисунка 13 або за формулою

$$R''_{т.с} = (1/(a_{зл} S_{зл})) = (1/(12,85 \cdot 10^{-4} \cdot 83,7)) = 9,38 \text{ град}/\text{Вт}.$$

12. Визначимо потужність, що розсіюється ребреною поверхнею $P_{оребр}$ за формулою

$$R'_{т.с} = (t_T - t_C)/P_{оребр} \text{ град}/\text{Вт}.$$

Попередньо визначаються такі величини

а) температура t_T — з графіка (рисунок 9) ($t_T=68,1^\circ \text{C}$);

б) $A_4(t_m)$ — з графіка (рисунок 15)

$$A_4(t_m) = A_4(68,1^\circ \text{C}) = 0,305;$$

в) K — з графіка (рисунок 16); $K=2,0^\circ \text{C}$;

г) M — з графіка (рисунок 17);

Або за формулою $M=L^{1/4}=90^{1/4}$. При цьому $M=3,08 \text{ мм}.$

д) значення η визначається за формулою $\eta = A_4(t_T) \cdot b \cdot C [^\circ \text{C}]$;

$C = K/M$ визначається з графіка (рисунок 18);

$$\eta = A_4(t_m) \cdot b \cdot C = 0,305 \cdot 12 \cdot (2/3,08) = 2,37^\circ \text{C}.$$

е) величина відносного температурного напору H — визначається з графіка $H=f(\eta)$ (рисунок 14)

$$H=f(\eta)=H(2,34)=0,87;$$

ж) температура середовища між ребрами t'_c визначається за формулою

$$t' = t_T - H \cdot (t_T - t_c) = 76,2 - 0,87 \cdot (76,2 - 60) = 62,1^\circ\text{C};$$

и) температура t'_m – з графіка (рисунок 9).

$$t'_m = 69,15^\circ\text{C};$$

к) $A(t'_m)$ – з графіка (рисунок 10).

$$A(t'_m) = A(69,15^\circ\text{C}) = 1,3 \cdot 10^{-4};$$

л) температура перегріву ребреної поверхні.

Визначаємо значення $t_T - t'_c = 76,2 - 62,1 = 14,1^\circ\text{C};$

м) K' – з графіка (рисунок 16)

або за формулою $K' = (t_T - t'_c)^{1/4}; K' = (76,2 - 62,1)^{1/4} = 1,94^\circ\text{C};$

н) визначимо конвективний коефіцієнт тепловіддачі ребреної поверхні

$$\begin{aligned} \alpha_{к.ребр} &= 5,62 \cdot A(t'_m) \cdot C' = 5,62 \cdot A(t'_m) \cdot K'/M = \\ &= (5,62 \cdot 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot 1,94) / 3,07 = 4,45 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}), \end{aligned}$$

де $A(t'_m)$ визначається з графіка (рисунок 10).

$$A(t'_m) = 1,3 \cdot 10^{-4};$$

$C' = K'/M$ визначається з графіка (рисунок 18);

$$C' = 0,63;$$

п) коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням ребреної поверхні

$$\alpha_{л.ребр} = \varepsilon \cdot \varphi \cdot f(t_T, t_c) = 0,9 \cdot 0,22 \cdot 9 \cdot 10^{-4} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}),$$

де $\varphi = f(h/b) = f(22/12) = (1,83)$ визначається з графіка (рисунок 7);

$\varphi = 0,22; f(t_T, t_c) = 9 \cdot 10^{-4}$ – з графіка (рисунок 8).

Потужність, що розсіюється ребреною поверхнею тепловідводу, дорівнює

$$\begin{aligned} P_{ребр} &= [\alpha_K(t_T - t'_c) + \alpha_L(t_T - t_c)] \cdot S_{ребр} \approx [4,45 \cdot 10^{-4} \cdot (76,2 - 62,1) + \\ &+ 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot (76,2 - 60)] \cdot 380 = 3,5 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

13. Визначимо тепловий опір ребреної поверхні з рисунка 19 або за формулою

$$R'_{тс} = (t_T - t_c) / P_{ребр} = (76,2 - 60) / 3,5 = 4,62 \text{ град}/\text{Вт}.$$

14. Загальний розрахунковий тепловий опір тепловідводу

$$R_{тс.розр.} = (R'_{тс} R''_{тс}) / (R'_{тс} + R''_{тс}) = (4,62 \cdot 9,38) / (4,62 + 9,38) = 3,1 \text{ град}/\text{Вт}.$$

15. Потужність, що розсіюється ребреною і гладкою поверхнями

$$P_{заг.розр.} = P_{гл} + P_{ребр} = 1,74 + 3,5 = 5,24 \text{ Вт}.$$

16 Перевірка правильності розрахунку

повинно бути $R_{тс.розр.} \leq R_{тс.вих.дан};$

$$R_{тс.розр.} = 3,1^\circ\text{C}/\text{Вт}; R_{тс.вих.дан} = 3,24^\circ\text{C}/\text{Вт};$$

повинно бути $P_{заг.розр.} \geq P_{вих.дан};$

$$P_{заг.розр.} = 5,24 \text{ Вт}; P_{вих.дан} = 5 \text{ Вт}.$$

Отже, для транзисторів П209 – П210 рекомендується використовувати для потужності 5 Вт односторонньо оребрений тепловідвід з розмірами плити $l \times L = 93 \times 90$ мм;

$$n = 7 \text{ шт.}, d = 3 \text{ мм},$$

$$h = 22 \text{ мм}, l = 93 \text{ мм},$$

$$b = 12 \text{ мм}, L = 90 \text{ мм}.$$

$$\delta = 3 \text{ мм}.$$

4.2. Приклад розрахунку двосторонньо оребреного тепловідводу

Для охолодження транзистора типу П215 розрахувати двосторонньо оребрений тепловідвід, що працює в умовах природної конвекції.

Потрібно визначити геометричні розміри і число ребер.

Вихідні дані:

$$t_{p-n} = 90^\circ\text{C} \text{ (знаходиться з довідника);}$$

$$R_{ПК} = 2 \text{ град/Вт (знаходиться з довідника);}$$

$$R_{КТ} = 0,4 \text{ град/Вт (визначається експериментальним шляхом);}$$

$$t_c = 50^\circ\text{C};$$

$$P_{вих.дан.} = 10 \text{ Вт}.$$

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

1. Максимальна потужність, що може розсіяти транзистор з тепловідводом, при даних t_{p-n} , t_c , $R_{ПК}$:

$$P_{\max} = (t_{p-n} - t_c) / R_{ПК} = (90 - 50) / 2 = 20 \text{ Вт}.$$

2. Тепловий опір тепловідводу за вихідними даними:

$$R_{Тс.вих.дан.} = q \cdot [(t_{p-n} - t_c) - P \cdot (R_{ПК} + R_{КТ}) / P] = \\ = 0,9 \cdot [(90 - 50) - 10 \cdot (2 + 0,4) / 10] = 1,44 \text{ град/Вт}.$$

3. Середньоповерхнева температура перегріву тепловідводу – середовище:

$$t_{переп} = t_T - t_c;$$

$$t_T - t_c = P \cdot R_{Тс};$$

$$t_T - 50 = 10 \cdot 1,44;$$

$$t_T = 50 + 14,4;$$

$$t_T = 64,4^\circ\text{C};$$

4. Довжина ребра L_{\min} з рисунка 1 при $R_{Тс} = 1,44$ град/Вт:

$$L_{\min} = 130 \text{ мм при } t_T - t_c = 14,4^\circ\text{C}.$$

5. Вибрати величини L , l , b , δ , h , d відповідно до рекомендацій у п.

3.1.1:

$$\begin{array}{ll} b = 12 \text{ мм}, & l = 130 \text{ мм}, \\ \delta = 3 \text{ мм}, & L = 130 \text{ мм}, \\ d = 3 \text{ мм}, & h = 25 \text{ мм}, \end{array} \left[\begin{array}{c} \text{дані} \\ \text{попередні} \end{array} \right]$$

6. Розрахункове число ребер n визначається за формулою (7) з урахуванням рекомендацій, приведених перед формулою 5 і графіка (рисунок 4). Отримане значення $n_p = 9,47$ округляється до найближчого більшого цілого. Приймаємо $n = 10$. За цим значенням уточнюється довжина l за формулою (5). Одержимо $l = 138$ мм. $L = l = 138$ мм.

7. Визначаємо загальну площу оребреної поверхні, використовуючи формули (15–18)

$$S_{заг} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 = 2 \cdot b \cdot L \cdot (n_l - 1) + 2 \cdot h \cdot [(n_l - 1) \cdot 2 \cdot L + 2 \cdot (l_1 + l_2) \cdot n_{l_1+l_2}] + 2 \cdot L \cdot (2 \cdot h + d) + 2 \cdot \delta \cdot [n_l \cdot L + (l_1 + l_2) \cdot n_{l_1+l_2}] + 2 \cdot d \cdot l + 4 \cdot h \cdot \delta \cdot n =$$

$$= 29808 + 11600 + 14268 + 11652 = 172600 \text{ мм}^2 = 1726 \text{ см}^2.$$

$$S_{заг} = 1726 \text{ см}^2.$$

Примітка. При кріпленні транзистора до тепловідводу частина ребер видаляється; тому з урахуванням діаметра корпусу транзистора П215 число повних ребер $n_l = 8$, число неповних ребер $n_{l_1+l_2} = 2$. Отже, довжина повного ребра дорівнює 138 мм;

З урахуванням необхідності кріплення двогвинтової шайби сумарна довжина двох неповних половин ребра буде дорівнювати

$$l_1 + l_2 = 100 \text{ мм}.$$

8. Потужність, що розсіюється повною оребреною поверхнею тепловідводу ($S_{повн}$)

$$P_{оребр} = [\alpha_{до} \cdot (t_T - t'_c) + \alpha_{л} \cdot (t_T - t_c)] \cdot S_{повн}.$$

Для цього попередньо визначаються такі величини:

а) температура t_m визначається з графіка (рисунок 9)

$$t_m = 57,2^\circ \text{C};$$

б) $A_4(t_m)$ – з графіка (рисунок 15)

$$A_4(t_m) = 0,315;$$

в) K – з графіка (рисунок 16) або за формулою

$$K = (t_T - t_c)^{1/4} = (64,4 - 50)^{1/4} = 1,95;$$

г) M – з графіка (рисунок 17) або за формулою

$$M = (L)^{1/4} = (138)^{1/4} = 3,43;$$

д) $\eta = A_4(t_m) \cdot b \cdot C$,

де $C = K/M$ визначається з графіка (рисунок 18)

$$\eta = 0,315 \cdot 12 \cdot (1,95/3,43) = 2,14;$$

е) величина відносного температурного напору H – з графіка (рисунок 14) за значенням η

$$H = f(2,14) = 0,85;$$

ж) температура середовища між ребрами

$$t'_c = t_T - H \cdot (t_m - t_c) = 64,4 - 0,85 \cdot (64,4 - 50) = 52,2^\circ \text{C};$$

и) температура t'_m – з графіка (рисунок 9)

$$t'_m = f(64,4;52,2) = 58,3^\circ\text{C};$$

к) $A(t'_m)$ з графіка (рисунок 10)

$$A(t'_m) = A(58,3) = 1,31 \cdot 10^{-4};$$

л) температура перегріву оребреної поверхні

$$t_m - t'_c = 64,4 - 52,2 = 12,2^\circ\text{C};$$

м) K' з графіка (рисунок 16) або за формулою

$$K' = (t_m - t'_c)^{1/4} = (12,2)^{1/4} = 1,86;$$

н) конвективний коефіцієнт тепловіддачі оребреної поверхні

$$\alpha_{к.оробр} = 5,62 \cdot A(t'_m) \cdot (K'/M) = 5,62 \cdot 1,31 \cdot 10^{-4} \cdot 0,53 = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}),$$

де $A(t'_m)$ визначається з графіка (рисунок 10)

$$A(t'_m) = 1,31 \cdot 10^{-4};$$

$C' = K'/M$ визначається з графіка (рисунок 18)

$$C' = 0,53;$$

п) коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням оребреної поверхні

$$\alpha_{эл} = \varepsilon \cdot \varphi \cdot f(t_T, t_c); \quad \varepsilon = 0,9,$$

де $\varphi = f(h/b)$ визначається з графіка (рисунок 7)

$$\varphi = f\left(\frac{25}{12}\right) = f(2,07) = 0,2.$$

Функція $f(t_T, t_c)$ визначається з графіка (рисунок 8) при

$$t_T = 64,4^\circ\text{C}; \quad t_c = 50^\circ\text{C}; \quad f(t_T, t_c) = 8,2 \cdot 10^{-4};$$

$$\alpha_{л.оробр} = 0,9 \cdot 0,2 \cdot 8,2 \cdot 10^{-4} = 1,47 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}).$$

Потужність, що розсіюється оребреною поверхнею тепловідводу,

$$P_{оробр} = [\alpha_{к.оробр} (t_m - t'_c) + \alpha_{л.оробр} (t_T - t_c)] S_{полн};$$
$$P_{оробр} = [3,9 \cdot 10^{-4} \cdot (64,4 - 52,2) + 1,47 \cdot 10^{-4} \cdot (64,4 - 50)] \times$$
$$\times 1726 = 11,86 \text{ Вт}.$$

9. Тепловий опір оребреної поверхні

$$R'_{TC} = \frac{t_m - t_c}{\frac{P}{2}} = \frac{64,4 - 50}{5,9} = 2,44 \text{ град}/\text{Вт}.$$

10. Загальний розрахунковий тепловий опір тепловідводу

$$R_{TC.розр} = \frac{R'_{TC} R''_{TC}}{R'_{TC} + R''_{TC}};$$

$$R_{TC.розр.} = 0,5 \cdot R'_{TC} = 1,22 \text{ град}/\text{Вт}.$$

11. Перевірка правильності розрахунку

повинно бути $R_{TC.розр} \leq R_{TC.вих.дан.};$

$$R_{TC.вих.дан.} = 1,44 \text{ град}/\text{Вт};$$

$$R_{TC.розр.} = 1,22 \text{ град}/\text{Вт};$$

повинно бути $P_{заг.розр.} \geq P_{вих.дан.};$

$$P_{\text{заг розр}} = 11,8 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{вих.дан.}} = 10 \text{ Вт}.$$

Отже, для транзисторів типу П213-П215 потужністю 10 Вт рекомендується використовувати двусторонньо оребрений тепловідвід з розмірами плити $l \times L = 138 \times 138 \text{ мм}$.

$$n = 10 \text{ шт.}, h = 25 \text{ мм}, b = 12 \text{ мм}, \delta = 3 \text{ мм}, d = 3 \text{ мм}.$$

4.3. Приклад розрахунку тепловідводу типу пластини для умов природної конвекції.

Для охолодження транзисторів типу П201 – П203 розрахувати тепловідвід типу пластини, що працює в умовах природної конвекції.

Потрібно визначити геометричні розміри тепловідводу.

Вихідні дані:

$$t_{p-n} = 100^\circ\text{C} \text{ (знаходиться з довідника);}$$

$$R_{\text{КТ}} = 0,4 \text{ град/Вт} \text{ (визначається експериментальним шляхом);}$$

$$R_{\text{ПК}} = 3,5 \text{ град/Вт} \text{ (знаходиться з довідника);}$$

$$t_c = 60^\circ\text{C};$$

$$P_{\text{вих.дан.}} = 5 \text{ Вт}.$$

1. Максимальна потужність, що може розсіяти транзистор з тепловідводом при заданих t_{p-n} , t_c , $R_{\text{ПК}}$

$$P_{\text{макс}} = \frac{t_{p-n} - t_c}{R_{\text{ПК}}} = \frac{100 - 60}{3,5} = 11,4 \text{ Вт}.$$

2. Тепловий опір тепловідводу за вихідними даними

$$R_{\text{ТС.вих.дан.}} = q \frac{(t_{p-n} - t_c) - P(R_{\text{ПК}} + R_{\text{КТ}})}{P} =$$

$$= 0,9 \frac{(100 - 60) - 5(3,5 + 0,4)}{5} = 3,69 \text{ град/Вт}.$$

3. Середньоповерхнева температура перегріву тепловідводу – середовище

$$t_{\text{перегр}} = t_{\text{T}} - t_c;$$

$$t_{\text{T}} - t_c = P \cdot R_{\text{ТС.вих.дан.}};$$

$$t_{\text{T}} - 60 = 5 \cdot 3,69;$$

$$t_{\text{T}} = 60 + 18,5 = 78,5^\circ\text{C}.$$

4. Вибрати величини $L \times l$, δ відповідно до рекомендацій у розділі 3.1

$$L \times l = 100 \times 100 \text{ мм}^2.$$

Товщина пластини $\delta = 3 \text{ мм}$.

5. Площа пластини

$$S = F_2 \cdot l^2 + 4 \cdot \delta \cdot l = 2 \times 100^2 + 4 \times 3 \times 100 = 212 \text{ см}^2.$$

6. Коефіцієнт тепловіддачі для гладкої поверхні

$$\alpha_{zл} = \alpha_{к.зл} + \alpha_{н.зл}.$$

Значення $\alpha_{н.зл}$, визначається за формулою

$$\alpha_{н.зл} = \varepsilon \cdot f(t_T, t_c) \cdot \varphi_{ic},$$

де $\varphi_{ic} = 1$ для гладкої поверхні; $\varepsilon = 0,9$ – для чорненого тепловідводу;
 $f(t_T, t_c)$ визначається з графіка (рисунок 8): $f(t_T, t_c) = 9,2 \times 10^{-4}$ при
 $t_T = 78,5^\circ\text{C}$ і $t_c = 60^\circ\text{C}$.

При цьому $\alpha_{н.зл} = 0,9 \times 9,2 \times 10^{-4} = 8,3 \cdot 10^{-4}$ Вт/(см²·град).

У формулі (36) величина

$$\alpha_{к.зл} = 5,62 \cdot A(t_M) \cdot B = 5,62 \cdot 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot 0,66 = 4,82 \times 10^{-4} \text{ Вт/(см}^2 \text{ град)},$$

де значення B може бути визначене за формулою

$$B = \left(\frac{t_M - t_c}{L} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{78,5 - 60}{100} \right)^{\frac{1}{4}} = 0,66,$$

або з графіка (рисунок 11).

При цьому значення $\alpha_{zл}$ буде дорівнювати

$$\alpha_{zл} = 4,82 \cdot 10^{-4} + 8,3 \cdot 10^{-4} = 13,12 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(см}^2 \text{ град)}.$$

7. Потужність, що розсіюється гладкою поверхнею

$$P_{zл} = \alpha_{zл} \cdot S_{zл} (t_T - t_c) = 13,12 \cdot 10^{-4} \cdot 212 \cdot (78,5 - 60) = 5,14 \text{ Вт}.$$

8. Тепловий опір пластини $R''_{тс}$ або з графіка або за формулою

$$R''_{тс} = 1/(\alpha_{zл} S_{zл}) = 1/(13,12 \cdot 10^{-4} \cdot 212) = 3,59 \text{ град/Вт}.$$

9. Перевірка правильності розрахунку

повинно бути $R_{тс.розр} \leq R_{тс.вих.дан}$;

$$R_{тс.вих.дан} = 3,69 \text{ град/Вт};$$

$$R_{тс.роз} = 3,59 \text{ град/Вт};$$

повинно бути $P_{заг.розр} \geq P_{вих.дан}$;

$$P_{заг.розр} = 5,14 \text{ Вт};$$

$$P_{вих.дан} = 5 \text{ Вт}.$$

Отже для транзисторів типу П201-П203 потужністю 5 Вт рекомендується використовувати тепловідвід типу пластини з розмірами $L \times l = 100 \times 100$ мм; товщина пластини $\delta = 3$ мм.

4.4. Приклад розрахунку односторонньо оребреного тепловідводу для транзистора П217, що працює в умовах повітряного примусового охолодження

Потрібно розрахувати конструкцію тепловідводу при однобічному оребренні (вид ОВГ) для забезпечення режимів роботи транзистора П217, що розсіює потужність $P_{вих.дан} = 10$ Вт при припустимій температурі $p-n$ переходу $t_{p-n} = +85^\circ\text{C}$, температурі навколишнього середовища $t_c = +40^\circ\text{C}$ і

швидкості повітряного потоку, що набігає, уздовж ребер $V=1,5$ м/с; транзистор кріпиться на гладкій поверхні тепловідводу (вид тепловідводу ОВГ); тепловий опір перехід – корпус $R_{пк} = 2$ град/Вт, тепловий контактний опір $R_{кт} = 1$ град/Вт.

1. Тепловий опір розрахунок тепловідвід – середовище за вихідними даними

$$R_{тс.вих.дан.} = q \frac{(t_{p-n} - t_c) - P(R_{пк} + R_{кт})}{P_{вих.дан.}} =$$

$$= 0,9 \frac{(85 - 40) - 10(2 + 1)}{10} = 1,35 \text{ град/Вт.}$$

2. Середньоповерхнева температура перегріву

$$t_{перегр} = t_T - t_c; P_{вих.дан.} \cdot R_{тс.вих.дан.} = t_T - t_c;$$

$$t_T = P_{вих.дан.} \cdot R_{тс} + t_c = 10 \cdot 1,35 + 40 = 53,5^\circ \text{C.}$$

3. Задаємося основними розмірами тепловідводу

$$L = 100 \text{ мм, } b = 5 \text{ мм, } h = 22 \text{ мм,}$$

$$\delta = 3 \text{ мм, } n = 13 \text{ ребер, } d = 5 \text{ мм.}$$

За формулою 5 визначаємо

$$l = [b \cdot (n - 1) + \delta \cdot n] = [b \cdot (13 - 1) + 3 \cdot 13] = 99 \text{ мм.}$$

4. Площа гладкої (неоребреної) поверхні тепловідводу складає

$$S_{гп} = l \cdot L = 99 \times 100 = 99 \text{ см}^2.$$

5. Оребрена поверхня тепловідводу

$$S_{оребр} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4;$$

$$S_1 = L \cdot b \cdot (n - 1) = 100 \cdot 50 \cdot (13 - 1) = 60 \text{ см}^2;$$

$$S_2 = 2 \cdot h \cdot L \cdot (n - 1) = 2 \cdot 22 \cdot 100 \cdot (13 - 1) = 528 \text{ см}^2;$$

$$S_3 = 2 \cdot (h + d) \cdot L = 2 \cdot (22 + 5) \cdot 100 = 27 \text{ см}^2;$$

$$S_4 = 2 \cdot d \cdot L + 2 \cdot h \cdot \delta \cdot n + \delta \cdot L \cdot n = 2 \cdot 5 \cdot 100 + 2 \cdot 22 \cdot 3 \cdot 13 + 3 \cdot 100 \cdot 13 = 66,1 \text{ см}^2;$$

$$S_{оребр} = 60 + 528 + 27 + 66,1 = 681,1 \text{ см}^2.$$

6. Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням гладкої поверхні тепловідводу дорівнює

$$\alpha_{н.гп} = \varepsilon \cdot f(t_T, t_c) \cdot \varphi.$$

Приймаємо $\varepsilon = 0,9$ і $\varphi = 1$. Значення $f(t_T, t_c)$ визначаємо з графіка (рисунок 8)

$$f(t_T, t_c) = f(53,5^\circ, 40^\circ) = 7,5 \cdot 10^{-4};$$

$$\alpha_{гп} = 0,9 \cdot 7,5 \cdot 10^{-4} = 6,75 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{град).}$$

7. Конвективний коефіцієнт гладкої поверхні тепловідводу розраховується на основі даних таблиці 3 для умови тепловіддачі

$$\alpha_{к.гп} = 16,8 \cdot V^{0,45} = 20,2 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{град).}$$

8. Коефіцієнт тепловіддачі гладкої поверхні тепловідводу

$$\alpha_{гп} = \alpha_{н.гп} + \alpha_{к.гп} = 6,75 \cdot 10^{-4} + 20,2 \cdot 10^{-4} =$$

$$= 26,95 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{град)}.$$

9. Потужність, що розсіюється гладкою поверхнею тепловідводу

$$P_{\text{зл}} = \alpha_{\text{зл}} S_{\text{зл}} (t_{\text{T}} - t_{\text{C}}) = 26,95 \cdot 10^{-4} \cdot 99 \cdot 13,5 = 3,61 \text{ Вт}.$$

10. Тепловий опір гладкої поверхні тепловідводу

$$R''_{\text{T.C}} = \frac{1}{\alpha_{\text{зл}} S_{\text{зл}}} = \frac{1}{26,95 \times 10^{-4} \times 99} = 3,7 \text{ град/Вт}.$$

11. Потужність, що розсіюється ребреною поверхнею тепловідводу, визначається за формулою

$$P_{\text{ребр}} = [\alpha_{\text{К}} (t_{\text{T}} - t'_{\text{C}}) + \alpha_{\text{зл}} (t_{\text{T}} - t_{\text{C}})] \cdot S_{\text{ребр}};$$

Попередньо визначаються такі величини:

а) температура перегріву поверхні тепловідводу

$$t_{\text{T}} - t_{\text{C}} = 53,5 - 40 = 13,5^{\circ}\text{C};$$

б) визначується температура

$$t_{\text{m}} = \frac{t_{\text{T}} + t_{\text{C}}}{2} = \frac{53,5 + 40}{2} = 46,8^{\circ}\text{C};$$

в) визначення функції $A_4(t_{\text{m}})$ виконується за визначуваною температурою (t_{m}) з графіка (рисунок 15)

$$A_4(t_{\text{m}}) = A_4(46,8) = 0,325;$$

г) визначення значень K і M з графіка (рисунки 16, 17) або за формулами

$$K = (t_{\text{T}} - t_{\text{C}})^{\frac{1}{4}} = \sqrt[4]{13,5} = 1,92;$$

$$M = \sqrt[4]{100} = 3,16;$$

д) значення η визначається за формулою

$$\eta = A_4(t_{\text{m}}) \cdot b \cdot C;$$

$$\eta = 0,325 \times 5 \times \frac{1,92}{3,16} \approx 0,99;$$

е) величина відносного температурного напору H визначається з графіка (рисунок 14)

$$H = H(\eta) = H(0,99) = 0,49;$$

ж) температура середовища між ребрами

$$t'_{\text{C}} = t_{\text{T}} - H(t_{\text{T}} - t_{\text{C}}) = 53,5 - 0,49 \cdot 13,5 = 46,9^{\circ}\text{C};$$

и) визначення температури t'_{m} і $A_4(t'_{\text{m}})$ здійснюється з графіків (рисунки 9, 10)

$$t'_{\text{m}} = 0,5(53,5 + 46,9) = 50,2^{\circ}\text{C};$$

$$A_4(t'_{\text{m}}) = 1,325 \cdot 10^{-4};$$

к) температура перегріву ребреної поверхні

$$t_T - t'_c = 53,5 - 46,9 = 6,62^\circ\text{C};$$

л) конвективний коефіцієнт тепловіддачі поверхні тепловідводу (таблиця 3)

$$\alpha_{к.оробр} = 1,16 \cdot A_3 \sqrt{\frac{\rho}{L}} = 1,16 \cdot 3,16 \cdot \sqrt{\frac{1,11 \times 1,5}{0,1}} = 14,9 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{град})$$

м) коефіцієнт випромінювання ребреної поверхні

$$\alpha_{л.оробр} = \varepsilon f(t_T, t_c) \cdot \varphi,$$

де значення φ визначається з рисунка 7

$$\varphi = f\left(\frac{h}{b}\right) = f\left(\frac{22}{5}\right) = f(4,4) = 0,1;$$

значення $f(t_T, t_c)$ – з рисунка 8

$$f(t_T, t_c) = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \text{ град});$$

н) остаточне значення $P_{оробр}$ складає

$$P_{оробр} = [\alpha_{к.оробр} (t_T - t'_c) + \alpha_{л.оробр} \cdot (t_T - t_c)] S_{оробр} = \\ = (14,9 \cdot 10^{-4} \cdot 6,62 + 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot 13,5) \cdot 681 = 13,6 \text{ Вт}.$$

12. Тепловий опір ребреної поверхні

$$R'_{TC} = \frac{t_T - t_c}{P_{оробр}} = \frac{53,5 - 40}{13,6} = 0,993 \text{ град}/\text{Вт}.$$

13. Загальне розрахункове значення теплового опору тепловідводу

$$R_{TC} = \frac{R'_{TC} \cdot R''_{TC}}{R'_{TC} + R''_{TC}} = \frac{0,993 \cdot 3,7}{0,993 + 3,7} = 0,83 \text{ град}/\text{Вт}.$$

14. Розрахункове значення потужності, що віддається тепловідводом

$$P_{заг.розр.} = P_{гл} + P_{оробр} = 3,61 + 13,6 = 17,21 \text{ град}/\text{Вт}.$$

15. Перевірка правильності розрахунку:

повинно бути $R_{TC,розр.} \leq R_{TC,вих.дан.}$

$$R_{TC,розр.} = 0,83; < R_{TC,вих.дан.} = 1,35;$$

повинно бути $P_{заг.розр.} > P_{вих.}$

$$P_{заг.розр.} = 17,21 \text{ Вт} > P_{вих.дан.} = 10 \text{ Вт}.$$

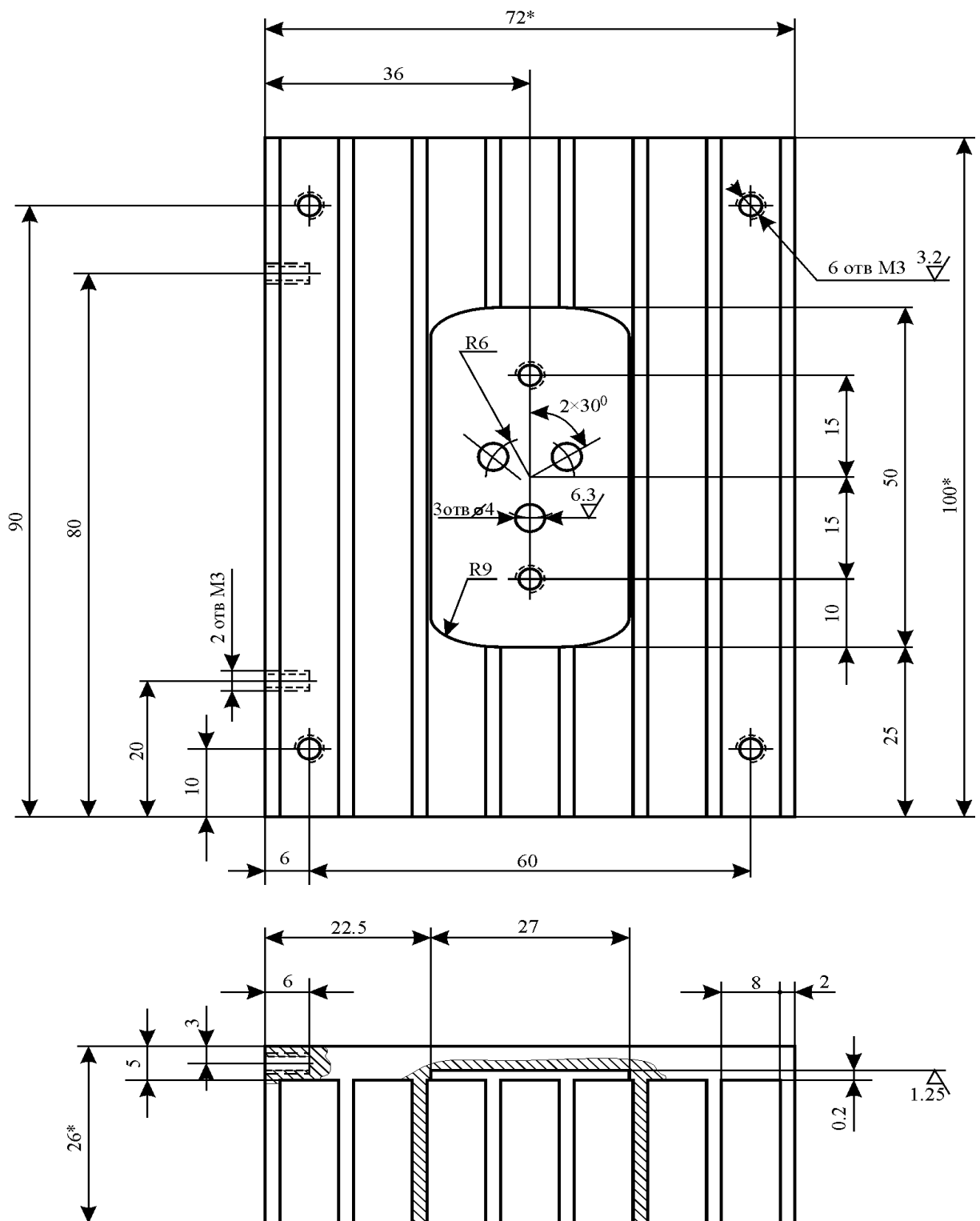
Отже, розрахунок з великим надлишком задовольняє задані умови. Тому доцільно зменшити габаритні розміри ребреного тепловідводу за рахунок зменшення розміру L на 15 – 20% і зробити перерахунок.

5. ТЕХНОЛОГІЧНІ І КОНСТРУКТИВНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПРОЕКТУВАННЯ ТЕПЛОВІДВОДІВ РЕА

Вибір оптимальної конструкції тепловідводу визначається конструктивними і технологічними вимогами, що ставляться до апаратури.

Матеріал радіатора підбирається відповідно до вимог його експлуатації. Основні матеріали – метали з високою теплопровідністю – алюмінієві сплави АЛ-2; АЛ-9; АД; магнієві сплави МЛ5; МЛ6. Товщина ребер вибирається виходячи з технологічних міркувань у межах 1 – 3 мм. Через те, що більшість тепловідводів, що випускаються промисловістю, виконується методом лиття під тиском (для великих партій виробів) або фрезеруванням, товщину ребра менше 1 – 1,5мм не вдається виготовити. Товщина плити, виходячи з технологічних і конструктивних міркувань, вибирається в межах 3 – 5 мм. Висота ребра приймається з умови рівномірного розподілу температури уздовж ребра і складає не більш 40 мм. Відстань між ребрами для випадку природної конвенкції вибирається в межах 8 ÷ 10 мм. Переріз ребра може бути різним: оптимальне прямокутне ребро вимагає на 50%, трикутне – на 4% більше матеріалу, ніж ребро параболічного перерізу. Тому більш доцільно виготовляти тепловідводи з ребрами трикутного і параболічного перетину, тому що вони дозволяють значно зменшити вагу тепловідводу. Однак практично у виробках РЕА значно частіше усе-таки використовуються тепловідводи з прямокутними ребрами. У промисловій апаратурі в даний час знаходять застосування також тепловідводи голчастого (штиркового) типу, особливо ефективні при примусовому повітряному охолодженні. Тепловіддача їх на 30% вище оребрених тепловідводів при однакових розмірах. При примусовому охолодженні ці тепловідводи не вимагають орієнтації охолоджувального потоку повітря.

З метою збільшення тепловіддачі і зменшення теплового опору поверхні тепловідводу (крім місця кріплення НПП) покриваються чорним лаком або фарбою, піддаються оксидуванню або анодируванню до ступеня чорноти $\epsilon=0,8 \div 0,9$. При вертикальній орієнтації ребер ефективність тепловідводу значно підвищується за рахунок поліпшення конвективного теплообміну. Універсальність орієнтації радіатора при цьому досягається за рахунок різьбових отворів, що виготовляються в торцевій поверхні плити радіатора (бічне чи горизонтальне розташування радіатора – фіксація гвинтами в 2-х отворах М3 у торцях плити на рисунку 24) чи 4 таких самих отворів при горизонтальному розташуванні на плоскій стінці радіатора (4 отвори М3 на рисунку 24).



* - Розміри для довідок.

1. Покриття – анодне оксидування (крім площадки з $R_a = 1,25$).

Колір – чорний.

2. Відхилення від площинності площадки з $R_a = 1,25$ не більш 1:50.

3. Інші ТТ за ОСТ 4ГО.070.14

Рисунок 24 – Тепловідвід

Площина плити тепловідводу повинна щільно прилягати до площини корпусу РЕА, а транзистор устанавлюється на радіатор у порожнину орєбреної сторони. При цьому розміри порожнини вибираються виходячи з розмірів притискної шайби. Така конструкція має максимальну ефективність і одержала найбільше поширення. При необхідності кріплення тепловідводу торцевою поверхнею до плати радіатор виконується з литою основою (рисунок 23), товщина якої порівнюється з товщиною плати радіатора. Кріплення тепловідводу до плати РЕА здійснюється за допомогою 2 – 4 гвинтів.

Напівпровідникові прилади (НПП) найчастіше кріпляться до тепловідводу за допомогою скоб і гвинтів, що входять у комплект постачання (рисунок 25 а;б). Скоби з 2 отворами (рисунок 25 а) поставляються разом з НПП. Їх геометричні розміри представлені в [6]. Розміри скоб з 3 отворами (рисунок 25 б) приведені в [7].

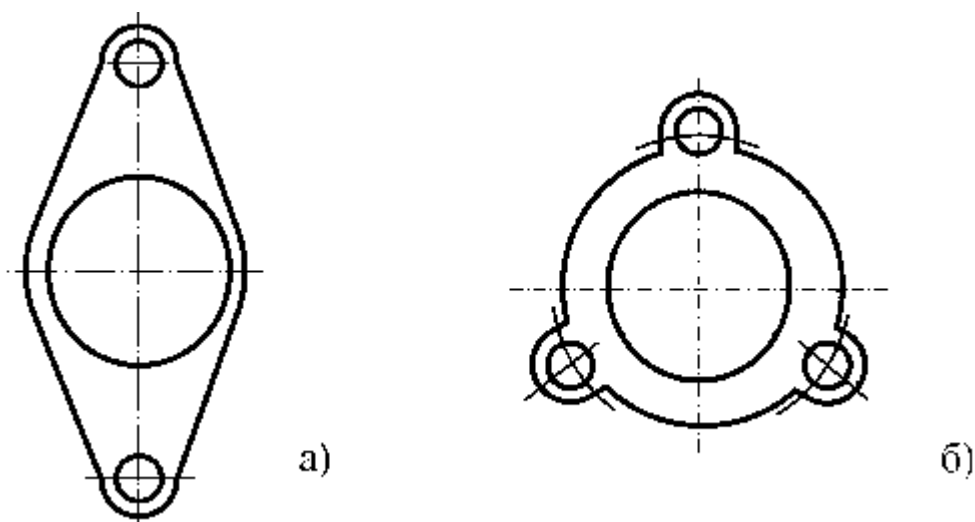


Рисунок 25 – Скоби

Кріплення повинне забезпечувати надійний тепловий контакт. З цією метою в радіаторі здійснюється шліфування місця контакту з НПП на глибину $0,2 \div 0,3$ мм при шорсткості поверхні $Ra \ 2,5 \div 1$. Площинність повинна бути не нижче 1:50 (рисунок 23). Неприпустиме свердління загального отвору в тепловідводі для усіх виводів НПП, тому що при цьому зменшується площа теплового контакту. Отвори для кожного з виводів повинні бути мінімального діаметра, що допускається розмірами виводу з урахуванням необхідного шару ізоляції, що накладається на виводи. Для ізоляції використовуються пластмасові трубки – “кембрики” або текстолітові втулки, що щільно фіксуються в отворах плити тепловідводу (рисунок 26).

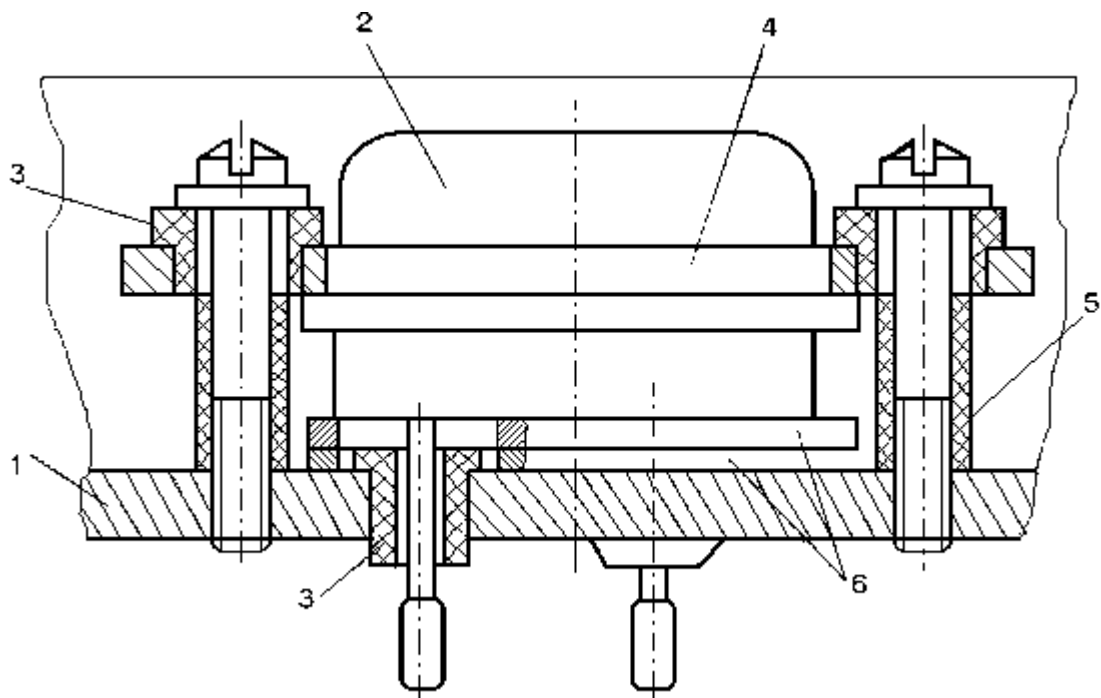


Рисунок 26 – Тепловідвід з потужним транзистором
 1 – тепловідвід; 2 – транзистор; 3 – втулки текстолітові; 4 – шайба пружинна; 5 – трубка ПХВ – (кембрик); 6 – прокладка алюмінієва

Для електричної ізоляції НПП від тепловідводу варто застосовувати ізоляційні прокладки: окисдований алюміній, лавсан, плівки (ПТЕФ), що мають мінімальні теплові опори.

Для зниження контактного теплового опору варто застосовувати мастило з масла, що не висихає, чи тонку фольгу з м'якого матеріалу. Придатне берилієве мастило КРТ-8 чи поліметиленаксанова рідина ПМС-200. При використанні ізоляційних прокладок збільшується загальний тепловий опір системи корпус – тепловідвід – навколишнє середовище. У зв'язку з цим краще кріпити НПП до радіатора без ізолюючих прокладок, але з мастилом, а тепловідвід ізолювати від шасі. Тепловідводи слід кріпити віддалік від елементів схем, що нагріваються, а в разі потреби додатково встановлювати між ними поліровані алюмінієві екрани.

Способи кріплення НПП до тепловідводу різні і залежать від геометричних розмірів, форми і конструкції транзисторів. Найбільше розповсюджений спосіб кріплення потужного транзистора до тепловідводу представлений на рисунку 26. Транзистор іншої конструкції (наприклад, транзистори серій КТ 814, 815 і т.п. встановлюють у спеціально профрезеровану в радіаторі порожнину і кріпляться за допомогою гвинта (рисунок 27).

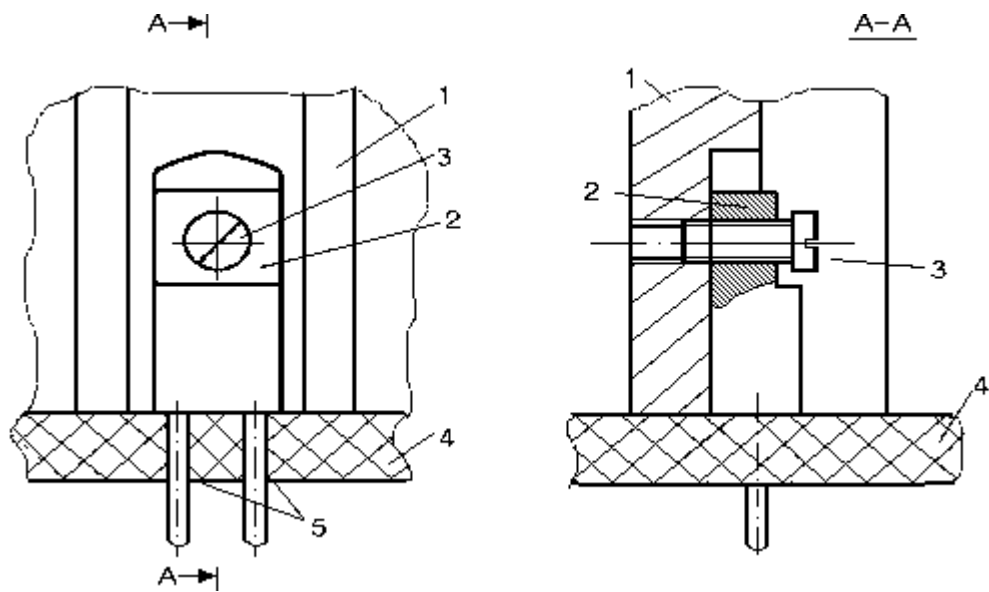


Рисунок 27 – Кріплення транзистора до тепловідводу і плати.
 1 – оребрений радіатор з вифрезерованою площиною; 2 – транзистор;
 3 – гвинт; 4 – плата; 5 – втулки

При цьому виводи НПП розміщуються безпосередньо в платі.
 Існують і інші способи кріплення транзисторів до тепловідводів.

Додаток А

Варіанти завдань на курсову роботу.

Найменування і числові значення вихідних параметрів і характеристик								
Номера варіантів	1. Тип транзистора (матеріал)	2. Потужність розсіювана транзистором, $P_{вих.дан}$ Вт	3. Допустима температура $p-n$ переходу	4. Тепловий опір між переходом і корпусом, $R_{ДК}$ град/Вт	5. Тепловий контактний опір між корпусом і тепловідводом, $R_{КТ}$, град/Вт	6. Температура навколишнього середовища, град	7. Вид тепловідводу (радиатора) А, Б, В	8. Спосіб охолодження I, II V —[м/с] швидкість повітря.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	П 215	10	90	2	0,4	50	Б	I
2	П 216	20	90	2	0,4	20	У	I
3	ГТ 705	15	85	3	0,1÷1,0	25	У	I
4	КТ 808	10	150	2	0,5	50	Б	I
5	КТ 844А	50	175	1	0,2	35	У	I
6	П 217	15	85	2	0,4	30	Б	I
7	КП 904	12	160	15	0,2	25	У	I
8	П 210	10	85	1	0,4	35	Б	I
9	КТ 820	10	150	10	0,5	30	Б	I
10	КТ 801	5	125	2,5	0,5	20	Б	I
11	КТ 802	25	150	2,5	0,5	50	У	I
12	КТ 817	15	150	5	0,5	50	У	I
13	КТ 807	8	150	8	0,3	70	Б	I
14	КТ 705	20	150	3,3	0,5	55	У	I
15	КТ 903	17	115	3,3	0,4	25	У	I
16	КТ 922Д	10	85	3	0,1÷1,0	20	Б	I
17	П 201	5	85	3,5	0,4	50	Б	I
18	П 216	20	90	2	0,4	20	Б	II, $V=1,5$
19	ГТ 705	15	85	3	0,4	25	Б	II, $V=1$
20	КТ 844А	50	175	1	0,2	35	Б	II, $V=2$
21	П 217	15	85	2	0,4	30	У	I
22	КП 904	12	160	15	0,2	25	А	I
23	КТ 802	25	150	2,5	0,5	50	Б	II, $V=2$
24	КТ 803А	20	125	2,5	0,5	35	Б	I
25	КТ 805	17	130	2,5	0,4	30	У	I
26	КТ 807	8	130	2,5	0,3	40	Б	I
27	КТ 808	10	130	2,5	0,3	40	У	I

28	КТ 809	12	135	2,5	0,3	45	Б	І
29	КТ 815	20	140	2	0,4	20	Б	І
30	КТ 812	15	140	2	0,4	30	Б	І
31	КТ 817	18	150	2	0,4	35	У	І
32	КТ 819	20	150	2	0,4	40	Б	І
33	КТ 820	10	150	10	0,5	30	У	І
34	КТ 822	25	150	4	0,5	35	Б	І
35	КТ 826	17	125	4	0,5	25	У	І
36	КТ 902	25	130	5	0,4	20	Б	І
37	КТ 903	30	135	5	0,4	25	У	І
38	КТ 827	10	140	4	0,5	25	Б	І
39	КТ 829	15	135	4	0,5	28	У	І
40	П 201	10	85	3,5	0,4	38	Б	І
41	П 210	10	85	1	0,4	35	У	І
42	П 213	11	85	3,5	0,4	40	У	І
43	П 216	12	90	2	0,5	30	Б	І
44	П 303	6	85	10	0,3	35	Б	І
45	КТ 921	16	85	3	0,4	42	У	І
46	КТ 922Д	7	90	3	0,3	20	Б	І
47	КТ 926	18	95	2	0,3	30	У	І
48	КТ 927	14	110	3	0,3	35	Б	І
49	КТ 935	17	95	3	0,4	30	У	І
50	КТ 936Б	22	135	3	0,4	25	Б	І
51	КТ 831Б	27	140	3,5	0,5	20	У	І
52	КТ 814	20	140	3,5	0,4	27	Б	І
53	КТ 835	12	125	4	0,5	23	У	І
54	КТ 836А	14	125	3,5	0,5	30	Б	І
55	КТ 816	7	140	3,5	0,4	40	Б	І
56	П 214	12	90	4	0,4	25	У	І
57	П 217	16	80	2	0,4	30	У	І
58	КТ 904	22	45	3,3	0,4	30	У	І
59	П 215	8	90	4	0,4	35	Б	І
60	КТ 203А	4	85	3,5	0,5	37	Б	І
61	ГТ 701	17	85	10	0,6	41	У	І
62	П 702 (кремн)	14	120	2,5	0,6	44	Б	І
63	ГТ 806	18	80	8	0,5	26	Б	І

Варіант конструктивного виконання і розміщення тепловідводу задаються викладачем кожному студенту індивідуально.

Додаток Б
Титульний лист пояснювальної записки для курсової роботи.

Міністерство освіти і науки України

Вінницький державний технічний університет

Інститут РТЗП
Кафедра ПМБА

**Розрахунок теплофізичних і геометричних параметрів
тепловідводів для напівпровідникових приладів
(варіант № _)**

Курсова робота
з дисципліни: “Тепломасобмін в електронній апаратурі”

Керівник
Студент

доцент, к.т.н.
гр. МА – 01

В.І. Калінін
О.В. Малинич

ЛІТЕРАТУРА

1. Аксенов А.И., Глушкова Д.Н. Отвод тепла в полупроводниковых устройствах. -М.: Энергия, 1971.
2. Терещук Р.М. и др. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства. -К.: Наукова думка, 1982.
3. Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. -М.: Энергия, 1971.
4. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. -М.: Высшая школа, 1984.
5. Правила оформления текстовых документов ГОСТ 2.105-95.
6. Полупроводниковые приборы. Транзисторы. Справочник. -М. ; Энергоатомиздат, 1986.
7. Пименов С.В. Справочник по транзисторам. -К.: Наукова думка, 1985.

Навчальне видання

А.А. Грудін., В.І. Калінін, С.Т. Барась

**РОЗРАХУНОК ТЕПЛОФІЗИЧНИХ І ГЕОМЕТРИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВІДВОДІВ ДЛЯ НАПІВПРОВІДНИ-
КОВИХ ПРИЛАДІВ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Оригінал макет підготовлено авторами
Редактор О.Д. Скалоцька

Навчально-методичний відділ ВДТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001
21021, м.Вінниця, Хмельницьке шосе,95,ВДТУ

Підписано до друку
Формат 29,7x42 $\frac{1}{4}$
Друк різнографічний
Тираж прим.
Зам. №

Гарнітура Times New Roman
Папір офсетний
Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького державного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001
21021, м.Вінниця, Хмельницьке шосе,95,ВДТУ