

КОНСТРУИРОВАНИЕ БЛОКОВ РЭС

Часть I

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ БЛОКА РЭС

◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

УДК 621.396.001.6
ББК м844-02 я75
К65

Рекомендовано Редакционно-издательским советом университета

Рецензент

Доктор технических наук, профессор
В.А. Погонин

Составители:



Ю.Л. Муромцев, О.А. Белоусов, Н.А. Кольтюков, Е.Н. Яшин

К65

Конструирование блоков РЭС. Ч. I. Тепловой расчёт блока РЭС : лабораторная работа / сост. : Ю.Л. Муромцев, О.А. Белоусов, Н.А. Кольтюков, Е.Н. Яшин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 28 с. – 100 экз.

Даны методические указания по выполнению лабораторной работы № 7 "Тепловой расчёт блока РЭС" по курсу "Конструирование радиоэлектронных средств", приведен список рекомендуемой литературы.

Предназначена для студентов специальности 210201 дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.396.001.6

ББК м844-02 я75

© ГОУ ВПО "Тамбовский государственный
технический университет" (ТГТУ), 2009
Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет"

КОНСТРУИРОВАНИЕ БЛОКОВ РЭС

Часть I

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ БЛОКА РЭС

Лабораторная работа № 7
по курсу "Конструирование радиоэлектронных средств"
для студентов 4 и 5 курсов специальности 210201
дневной и заочной форм обучения



Тамбов
Издательство ТГТУ
2009

Учебное издание

КОНСТРУИРОВАНИЕ БЛОКОВ РЭС

Часть I

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ БЛОКА РЭС

Лабораторная работа

Составители:

МУРОМЦЕВ Юрий Леонидович,
БЕЛОУСОВ Олег Андреевич,
КОЛЬТЮКОВ Николай Александрович,
ЯШИН Евгений Николаевич

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 20.03.2009.

Формат 60 × 84 / 16. 1,63 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 151

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

При разработке блоков (радиоэлектронных средств) РЭС немаловажную роль для правильного их функционирования играет обеспечение допустимых тепловых режимов. При тепловых расчётах блок рассматривается как сложная система тел с множеством внутренних источников теплоты. Точное аналитическое описание температурных полей внутри блока невозможно из-за больших вычислительных трудностей и неточности исходных данных: мощности источников теплоты, теплофизических свойств материалов и т.д. Поэтому при расчёте теплового режима блоков РЭА используют приближённые методы анализа и расчёта. Целью расчёта является определение температур нагретой зоны или его отдельных элементов, размеры и виды радиаторов мощных полупроводниковых приборов, что требует знаний и навыков теплофизического конструирования блоков РЭС. При выполнении расчётов рекомендуется использовать пакеты прикладных программ, такие как Microsoft Office, MathCAD и др.

В зависимости от конструкции блока возможны различные варианты лабораторной работы:

- 1) тепловой расчёт герметичного блока;
- 2) тепловой расчёт блока с перфорированным кожухом.

Дополнительно выполняются расчёты с принудительным охлаждением и радиатора для самого мощного полупроводникового прибора в проектируемом блоке.

В работе требуется произвести расчёт температуры нагретой зоны одиночного блока, температуры перфорированного блока РЭС, блока РЭС с принудительным охлаждением, а также рассчитать радиатор теплонагруженного полупроводникового прибора.

Цель работы: из анализа основных технических характеристик и условий эксплуатации произвести расчёты температуры блока РЭС, а также радиатора полупроводникового прибора.

Исходные данные: в качестве исходных данных выдаётся принципиальная электрическая схема блока РЭС с описанием принципа её действия, назначение изделия и эксплуатационные условия, сборочный чертёж блока.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

подавляющее большинство маломощных радиоэлектронных средств лишь небольшую долю потребляемой от источников питания энергии выдают в виде полезной энергии сигналов, остальная часть преобразуется в тепловую энергию и передаётся в окружающую среду. Общие энергозатраты устройства в основном определяются мощностью тепловыделения и плотностью теплового потока, проходящего через кожух (корпус) устройства. Точный анализ температурного состояния блока РЭС связан с большими трудностями, которые объясняются сложностью конструкции и происходящих в ней процессов, поэтому методика расчётов для разных типов блоков РЭС будет отличаться. В большинстве случаев общий расчёт выполняется в соответствии с четырьмя типовыми методиками.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕТОЙ ЗОНЫ ОДИНОЧНОГО БЛОКА

Приведённая ниже методика расчёта справедлива для одиночных блоков в РЭС, имеющих геометрические размеры в пределах 600 мм по трём измерениям. Предполагается, что блок имеет форму прямоугольного параллелепипеда или цилиндра, ось которого может быть расположена горизонтально или вертикально. Внутренняя архитектура блока может представлять собой различные конструктивные варианты: шасси с расположенными на нём крупными электрорадиоэлементами, каскеты или ячейки с микросхемами и отдельными дискретными элементами, имеющими геометрические размеры, соизмеримые с размерами микросхем. Каскеты или ячейки могут располагаться горизонтально или вертикально. При вертикальном расположении каскет или ячеек расчёт будет справедлив при условии, что расстояние между каскетами не превышает 3 мм, для горизонтального расположения каскет или ячеек такого ограничения нет.

Исходные данные

P – суммарная мощность тепловыделения в блоке (потребляемая мощность блока или определяемая из анализа схемы электрической принципиальной), Вт; $L_1, L_2, L_3, (D, H)$ – геометрические раз-

меры блока прямоугольной формы (или цилиндрической), м; l_1, l_2, l_3 – размеры нагретой зоны, м; t_c – температура окружающей среды, °С.

Последовательность расчёта

1. Определение размеров; l_1, l_2, l_3 нагретой зоны. Для кассет или ячеек, объединённых в единый блок, размеры нагретой зоны определяются максимальными размерами этого блока. Если в качестве несущего элемента используется шасси с расположенными на нём крупногабаритными элементами, то размеры нагретой зоны будут следующими: два измерения совпадают с размерами шасси $l_1 \approx L_1, l_2 \approx L_2$, а третье l_3 определяется суммой высот шасси h и высотой средних размеров элементов, расположенных с одной и другой сторон шасси h_1 и h_2 (см. рис. 1).

Средняя высота элементов определяется по формуле

$$h_{1(2)} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{L_1 L_2}, \quad (1)$$

где V_i – объём i -го элемента на поверхности шасси; L_1, L_2 – размеры шасси; n – количество элементов с одной стороны шасси.

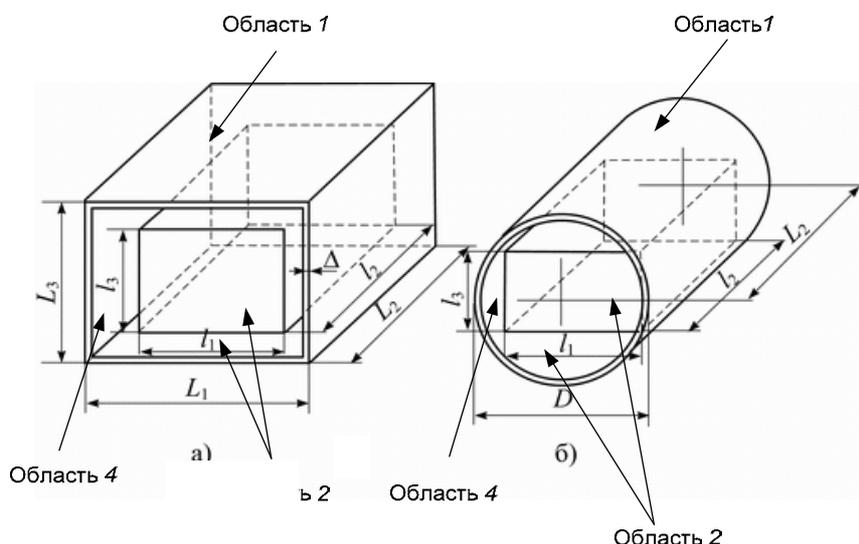


Рис. 1. Типы блоков:

a – прямоугольный; *б* – цилиндрический

Высота нагретой зоны в этом случае

$$l_3 = h_{ш} + h_1 + h_2, \quad (2)$$

где $h_{ш}$ – толщина шасси.

2. Расчёт площадей боковой S_6 , верхней $S_в$ и нижней $S_н$ стенок блока

$$S_6 = 2L_3(L_1 + L_2), \quad S_в = S_н = L_1 L_2. \quad (3)$$

3. Определение площадей нагретой зоны, обращённых в области 1, 2 и 4, здесь область 1 – расположена над нагретой зоной, область 2 – под нагретой зоной, а область 4 – между боковой поверхностью нагретой зоны и кожухом.

$$S_{31} = S_{32} = l_1 l_2, \quad S_{34} = 2l_3 (l_1 + l_2). \quad (4)$$

4. Приведённая степень черноты $\epsilon_{\text{п}}$ нагретой зоны в областях 1 и 2 рассчитывается по формулам

$$\epsilon_{\text{п}} = \left[\frac{1}{\epsilon_3} + \left(\frac{1}{\epsilon_k} - 1 \right) \frac{S_3}{S_k} \right]^{-1}; \quad (5)$$

$$S_k = S_0 + S_B + S_H,$$

где ϵ_3 , ϵ_k – степени черноты зоны и кожа выбираются из табл. 1.

1. Степень черноты различных поверхностей

Материал	ϵ
Алюминий полированный	0,05
Алюминий окисленный	0,25
Алюминий грубополированный	0,18
Алюминиевая фольга	0,09
Асбестовый картон	0,96
Бронза полированная	0,16
Бумага	0,92
Вольфрам	0,05
Графит	0,75
Дюралюминий (Д16)	0,39
Железо полированное	0,26
Золото	0,10
Ковар	0,82
Краски эмалевые	0,92
Лак	0,88
Латунь полированная	0,03
Латунь прокатная	0,20
Медь полированная	0,02
Медь окисленная	0,65
Муар	0,9
Масляные краски	0,92
Никель полированный	0,08
Олово (луженое кровельное железо)	0,08
Платина	0,1
Резина твёрдая	0,95
Резина мягкая	0,86
Серебро полированное	0,05
Сталь никелированная	0,11
Сталь окисленная	0,8
Стальное литье	0,54
Саиса	0,96

Стекло	0,92
Силумин	0,25
Титан	0,63
Фарфор	0,92
Хром полированный	0,10
Цинк	0,25
Щеллак чёрный матовый	0,91

Приведённая степень черноты нагретой зоны в области 4 равна

$$\varepsilon_{п4} = \varepsilon_3 \varepsilon_k, \quad (6)$$

так как размеры нагретой зоны, обращённой в область 4, могут значительно отличаться от размеров шасси. Для блоков с заполнением в виде кассет или ячеек рекомендуется степень черноты боковой поверхности нагретой зоны определять по выражению для $\varepsilon_{п}$.

5. Ориентировочное значение тепловой проводимости участка от нагретой зоны к кожуху рассчитывается по формуле

$$\sigma_3^I = 23(L_1 - 2\Delta_4)(L_2 - 2\Delta_4), \quad (7)$$

где Δ_4 – толщина корпуса блока (если блок имеет тонкостенный кожух, то толщину Δ_4 можно не учитывать).

6. Необходимо задать температуру перегрева кожуха $\square t_k$. Для блоков, имеющих мощность тепловыделения 100...200 Вт при размерах 300...400 мм, температура перегрева кожуха $\square t_k = 10...15$ °С. В этом случае температура кожуха равна $t_k = t_c + \square t_k$. Определяющая (средняя) температура $t_m = (t_k + t_c) / 2$.

2. Теплофизические параметры сухого воздуха при давлении $101,3 \cdot 10^5$ Па

$t_m, \text{°C}$	$\lambda_m \cdot 10^2, \text{Вт/(мК)}$	$\text{M} \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$	Pr	$\rho, \text{кг/м}^3$
-50	2,04	9,23	0,728	1,584
-20	2,28	12,79	0,716	1,39
0	2,44	13,28	0,707	1,295
10	2,51	14,16	0,705	1,247
20	2,60	15,06	0,703	1,205
30	2,68	16,00	0,701	1,165
40	2,76	16,96	0,699	1,128
50	2,83	17,95	0,698	1,093
60	2,90	18,97	0,696	1,09
70	2,97	20,02	0,694	1,029
80	3,05	21,09	0,692	1,00
90	3,13	22,10	0,690	0,972
100	3,21	23,13	0,688	0,946
120	3,34	25,45	0,686	0,898

7. Для большинства одиночных блоков РЭС, имеющих небольшую мощность тепловыделения, конвективный теплообмен подчиняется закону степени $1/4$ [4], исходя из этого предположения рассчи-

тывается коэффициент теплоотдачи α_k для всех наружных поверхностей кожуха выполняется по формуле

$$\alpha_k = 0,54(\beta gr)_m^{1/4} \frac{\lambda_m}{\nu_m^{1/2}} \left(\frac{t_i - t_c}{L} \right)^{1/4} N, \quad (8)$$

где β – коэффициент объёмного расширения, K^{-1} ; g – ускорение силы тяжести, m/c^2 ; $Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля определяется из табл. 2; ν_m – кинематическая вязкость, m^2/c ; a – коэффициент теплопроводности, m^2/c ; λ_m – теплопроводность, $Вт/(мК)$; t_i – температура i -й грани кожуха; L – определяющий размер, м (для вертикально ориентированной поверхности это высота, для горизонтально ориентированной поверхности – меньшая сторона); N – коэффициент ориентации нагретой поверхности: для вертикальной стенки $N = 1$, для нагретой поверхности, обращённой вниз, $N = 0,7$ и вверх $N = 1,3$.

Для воздуха значение α_k равно

$$\alpha_k = A_1 \left(\frac{t_i - t_c}{L} \right)^{1/4}. \quad (9)$$

Здесь коэффициент A_1 находится по табл. 3 в зависимости от температуры t_m $^{\circ}C$.

3. Значения A_1 для воздуха

$t_m, ^{\circ}C$	10	20	30	40	60	80	100
A_1	1,4	1,38	1,36	1,34	1,31	1,29	1,27

Для большинства блоков РЭС кожух выполнен из материала с хорошей теплопроводностью, поэтому его можно считать изотермической поверхностью и, следовательно, температура кожуха в любой точке принимать одинаковой.

8. Расчёт коэффициента лучеиспускания выполняется следующим образом:

$$\alpha_l = \varepsilon_n \varphi_{12} f(t_1, t_2), \quad (10)$$

$$f(t_1, t_2) = 5,67 \frac{\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4}{t_1 - t_2}, \quad (11)$$

где t_1 – температура кожуха; t_2 – температура среды; φ_{12} – коэффициент взаимного облучения (для одиночного блока $\varphi_{12} = 1$).

9. Далее рассчитываются полные коэффициенты теплоотдачи с поверхности кожуха:

$$\alpha_B = \alpha_{кв} + \alpha_l; \quad \alpha_H = \alpha_{кн} + \alpha_l; \quad \alpha_6 = \alpha_{к6} + \alpha_{пл}, \quad (12)$$

где $\alpha_{кв}$, $\alpha_{кн}$, $\alpha_{к6}$ – коэффициенты теплоотдачи верхней, нижней и боковой поверхностей.

10. Тепловая проводимость кожуха в окружающую среду

$$\sigma_k = \alpha_B s_B + \alpha_H s_H + \alpha_6 s_6. \quad (13)$$

11. Температура нагретой зоны t_3^1 в первом приближении

$$t_3^I = t_c + (t_k - t_c) \left(1 + \frac{\sigma_k}{\sigma_3} \right). \quad (14)$$

12. Расчётная мощность P^I нагретой зоны в предположении, что кожух имеет перегрев Δt_k (заданный в п. 6)

$$P^I = \sigma_k (t_k - t_c). \quad (15)$$

На этом начальный этап заканчивается.

Второй этап предполагает более точное определение тепловой проводимости от нагретой зоны к кожуху.

13. Поскольку область 1 (см. рис. 1) замкнутая, то используют конвективно-кондуктивные коэффициенты верхней K_v и боковой K_b воздушной прослойки между нагретой зоной и внутренней поверхностью кожуха

$$k_i = Nf \left(\frac{h_i}{l} \right) A_2 \sqrt[4]{\frac{t_3^I - t_k}{h_i}}, \quad i \in \{v, b\}, \quad (16)$$

где h_i – толщина воздушной прослойки между нагретой зоной и кожухом в соответствующей области; l – конвективная составляющая теплопередача, при этом $l = \sqrt{l_1 l_2}$ – для верхней области; $l = \sqrt{l_3 l_2}$ и $l = \sqrt{l_3 l_1}$ – для боковых областей нагретой зоны и кожуха. Значение A_2 находится из табл. 4, а величину $f(h_i / l)$ находят из графика (рис. 2).

4. Значения A_2 для воздуха

$T_m, \square C$	0	50	100	200
A_2	0,63	0,58	0,56	0,44

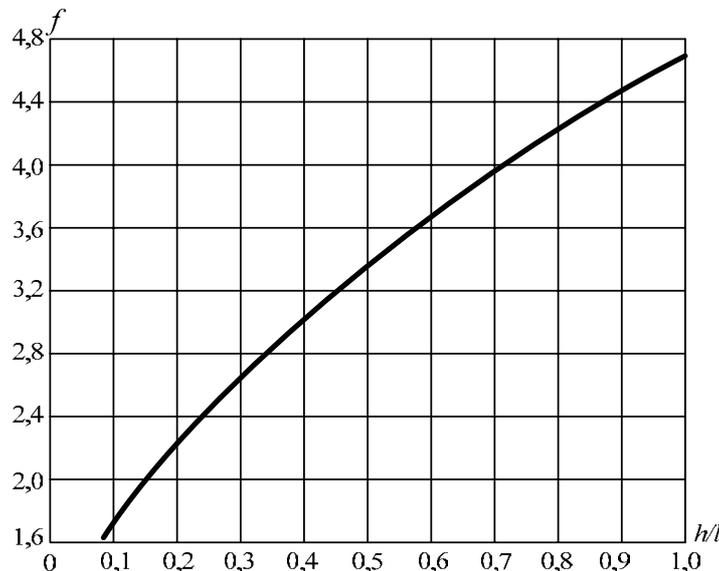


Рис. 2. Значение функции $f(h_i / l)$

В области, расположенной под нагретой зоной и кожухом, конвекция всегда отсутствует, и теплопередача определяется теплопроводностью воздуха (среды).

14. Определяют лучистую составляющую коэффициента теплопередачи областей 1, 2 и 4 (см. рис. 1) для воздушного зазора между боковой поверхностью нагретой зоны и кожухом. При этом величина приведённой степени черноты, полученная при расчёте в первом приближении, сохраняется,

а коэффициент взаимной облученности принимается равным единице; температура нагретой зоны берётся равной температуре, полученной при расчёте в первом приближении. В результате получают величины

$\alpha_{л1}, \alpha_{л2}, \alpha_{л4}$.

15. Полные коэффициенты теплопередачи всех областей для нагретой зоны, расположенной горизонтально, рассчитываются следующим образом:

$$K_1 = k_1 + \alpha_{л1}; \quad K_4 = k_4 + \alpha_{л4}; \quad K_2 = \alpha_2 / h_n + \alpha_{л2}. \quad (17)$$

Для нагретой зоны, ориентированной вертикально, коэффициенты теплопередачи равны

$$K_1 = k_1 + \alpha_{л1}; \quad K_2 = k_2 + \alpha_{л2}; \quad K_4 = (k_1 + k_2) / 2 + \alpha_{л4}. \quad (18)$$

16. Температура нагретой зоны t_3^{II} во втором приближении определяется выражением

$$t_3^{II} = t_c + P^I \left(\frac{1}{\sigma_k^I} + \frac{1}{\sigma_k^{II}} \right), \quad (19)$$

где σ_k^I – тепловая проводимость от кожуха в окружающую среду, полученная при расчёте в первом приближении; σ_k^{II} – тепловая проводимость от нагретой зоны к кожуху, рассчитанная во втором приближении по формуле $\sigma_k^{II} = K_1 S_{31} + K_2 S_{32} + K_4 S_{34}$.

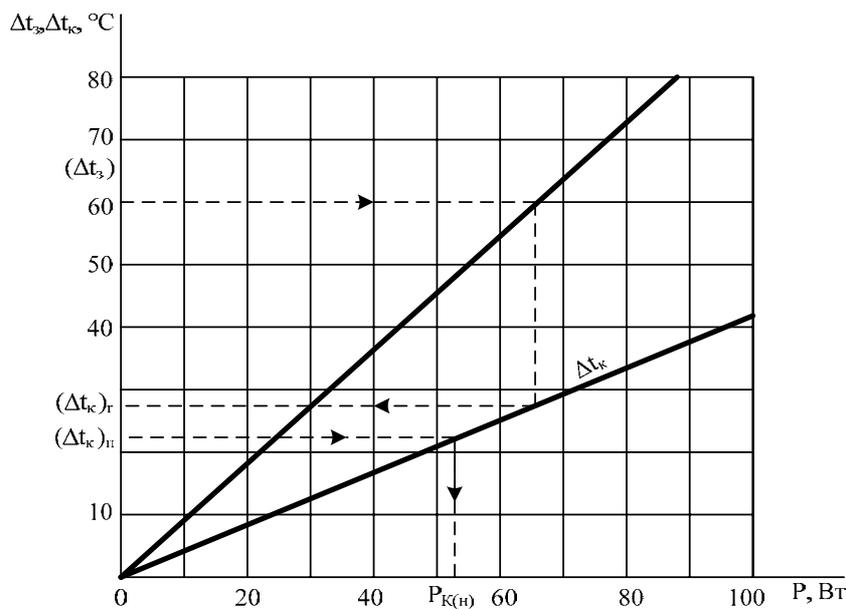


Рис. 3. Тепловые характеристики

17. Сравнивают температуры нагретой зоны, полученные при расчётах в первом и во втором приближениях. Если разница составляет более 10 %, то проводят расчёт в третьем приближении, при этом

$$t_p^{III} = (t_3^I + t_3^{II}) / 2. \quad (20)$$

Получают одну точку тепловой характеристики блока $\alpha_{t_3} = f(P)$ и $\alpha_{t_k} = f(P)$ (рис. 3). Второй точкой будет начало координат. Для получения третьей точки задаются другим значением температуры перегрева кожуха и проводят расчёт заново. По трём полученным точкам строят характеристики $\alpha_{t_3} = f(P)$ и $\alpha_{t_k} = f(P)$. Искомые температуры кожуха и зоны находят по этим характеристикам при мощности фактически рассеиваемой в блоке P_n .

Если температура перегрева для элементов блока оказывается выше допустимой, то решают вопрос о применении другого вида охлаждения блока, например, использование жалюзи или перфорации в корпусе

2. ТЕМПЕРАТУРА ПЕРФОРИРОВАННОГО БЛОКА

Для увеличения интенсивности теплоотвода кожух блока перфорируют либо в нём делают жалюзи. При равной площади перфорационных отверстий и жалюзи, последние пропускают несколько меньший поток воздуха. Необходимо иметь в виду, что при перфорированном кожухе внутренний объём блока скорее запыляется по сравнению с блоком, имеющим жалюзи. В зависимости от конструктивных особенностей внутреннего строения блока нагретую зону можно представить в нескольких вариантах:

- основной конструктив блока – горизонтальное шасси с расположенными на нём крупногабаритными теплоизлучающими элементами, Предполагается, что шасси имеет отверстия для прохода воздуха;
- блок состоит из ряда кассет или ячеек, расположенных горизонтально или вертикально;
- для шасси с крупногабаритными элементами и кассет, расположенных вертикально или горизонтально, размеры нагретой зоны определяются как и в случае "герметичного" блока.

Тепловые модели блока, используемые при расчётах, приведены на рис. 4.

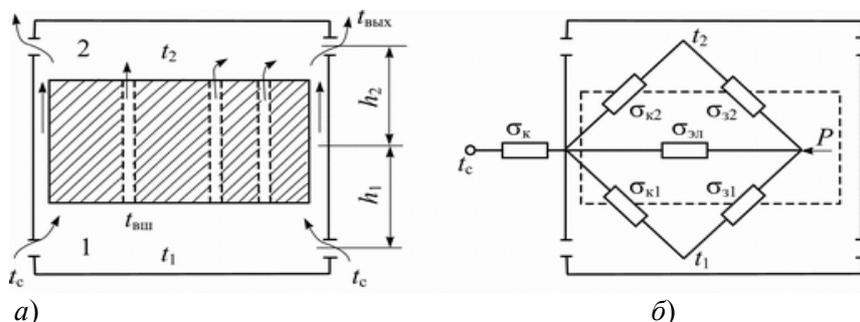


Рис. 4. Тепловые модели блока:

a – расчётная модель блока; *б* – эквивалентная схема тепловых проводимостей

Исходные данные

P – суммарная мощность тепловыделения в блоке (потребляемая мощность блока или выбирается из анализа схемы электрической принципиальной), Вт; L_1, L_2, L_3 – геометрические размеры блока, м; $s_1, s_2, s_{ш}$ – площади отверстий кожуха в областях 1, 2 (см. рис. 4, *a*) и шасси; m^2 ; t_c – температура окружающей среды.

Последовательность расчёта

1. Расчёт начинают с предположения, что кожух не имеет вентиляционных отверстий, т.е. блок "герметичный". Строят тепловые характеристики по методике расчёта температуры нагретой зоны одиночного блока (рис. 3).

2. Задаются перегревом нагретой зоны Δt_3 и находят перегрев кожуха герметичного блока для этой температуры. Перегрев кожуха перфорированного блока определяется по формуле

$$(\Delta t_k)_п = 0,75(\Delta t_k)_г, \quad (21)$$

где подстрочные индексы п, г означают соответственно перфорированный и герметичный корпус.

Затем по графику рис. 3 находят мощность P_k , соответствующую этому перегреву.

3. Задаются коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{зк}^1$ от зоны к кожуху (рекомендуется величину $\alpha_{зк}^1$ в первом приближении выбирать равной 4 – 6, Вт/(m^2K) [4].

4. Мощность теплоотвода от зоны к кожуху за счёт лучеиспускания

$$P_{3л} = \varepsilon_{п} f(t_3, t_k) (t_3 - t_k) \varphi_{3к} S_3, \quad (22)$$

где $\varepsilon_{п}$ – приведённая степень черноты нагретой зоны и внутренней поверхности кожуха (если ε_3 и ε_k имеют значения больше 0,75, то $\varepsilon_{п} = \varepsilon_3 \varepsilon_k$, величину $\varepsilon_{п}$ можно взять из расчёта блока при условии герметичности кожуха); $\varphi_{3к} = 1$ – кожух "обтягивает" нагретую зону; S_3 – площадь поверхность нагретой зоны (определена ранее при расчёте "герметичного" блока).

5. Температура t_1^I воздуха в первой (нижней) области определяются решения уравнения

$$at_1^2 + bt_1 + c = 0; \quad (23)$$

здесь

$$a = 2(S_{31} + S_{к1}) - \frac{S_{к1}}{S_{к2}}(S_{32} + S_{к2} - S_{31} - S_{к1}); \quad (24)$$

$$b = \left(2 + \frac{S_{к1}}{S_{к2}}\right)A_1 + A_2 - D(S_{32} + S_{к2} - S_{31} - S_{к1}) + \left(S_{31} - S_{к1} \frac{S_{32}}{S_{к2}}\right)t_c; \quad (25)$$

$$A_1 = S_{31}t_3 + S_{к1}t_k, \quad A_2 = S_{32}t_3 + S_{к2}t_k, \quad A = A_1 + A_2; \quad (26)$$

$$D = S_k \frac{t_k}{S_{к2}} - \frac{P_{3л} - P_k}{\alpha_{3к}^1 S_{к2}}; \quad (27)$$

$$c = DA_1 + [A - (S_{32} + S_{к2})D]t_c, \quad (28)$$

где S_{31} , S_{32} , $S_{к1}$, $S_{к2}$ – поверхности нагретой зоны и кожуха в соответствующих областях.

Из двух значений температур выбирают такое, чтобы выполнялось условие, $t_1^I < t_2^I$, так как температура воздуха в первой области (нижней) всегда ниже, чем во второй (верхней).

6. Температура воздуха во второй области в первом приближении равна

$$t_2^I = D - \frac{S_{к1}t_1^I}{S_{к2}}. \quad (29)$$

7. Температура воздуха вблизи отверстий шасси или каналов между вертикальными кассетами $t_{вш}^I$ рассчитывается по формуле

$$t_{вш}^I = 2t_1^I - t_c. \quad (30)$$

8. Температура воздуха на выходе из кожуха $t_{вых}^I$ (из области 2) равна

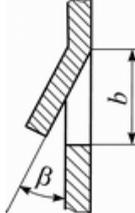
$$t_{вых}^I = 2t_2^I - t_{вш}^I. \quad (31)$$

9. Количество протекающего воздуха через блок определяется выражением

$$G^I = S_1 \mu_1 T_c \rho_c \sqrt{2g} \sqrt{\frac{\frac{h_1 + h_2}{T_c} - \frac{h_1}{T_1} - \frac{h_2}{T_2}}{T_c + \left(\frac{S_1 \mu_1}{S_2 \mu_2}\right)^2 T_2 + \left(\frac{S_1 \mu_1}{S_{ш} \mu_{ш}}\right)^2 T_1}}, \quad (32)$$

где S_1 , S_2 , $S_{ш}$ – площади перфораций в областях 1, 2 и шасси (нагретой зоне); h_1 и h_2 – средневзвешенные расстояния от середины нагретой зоны в областях 1 и 2 до центра группирования отверстий; μ_1 , μ_2 , $\mu_{ш}$ – коэффициенты расхода воздуха через жалюзи в соответствующих областях (если имеются перфорации, то $\mu = 0,65$). Величина μ для жалюзи зависит от их формы и угла раскрытия (табл. 5); T_1 , T_2 , T_c – абсолютные температуры соответствующих областей.

5. Величина μ для жалюзи при разных углах раскрыва

β , град.	Значение μ при b/l			Эскиз жалюзи
	1 : 4	1 : 3	1 : 2	
15	0,30	0,27	0,23	
30	0,45	0,43	0,39	
45	0,56	0,54	0,50	
60	0,62	0,60	0,56	
90	0,65	0,64	0,62	

10. По графику (рис. 5) уточняют коэффициент теплоотдачи α^{II} .

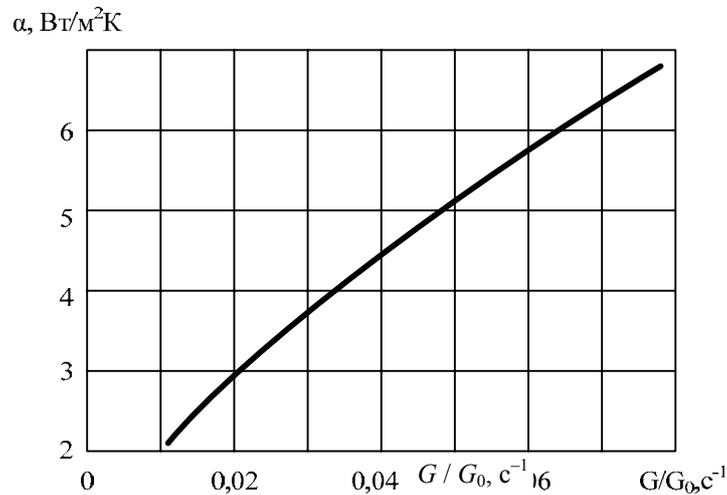


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопередачи от количества протекающего воздуха и массы заполняющего блок воздуха
 Масса воздуха, заполняющего блок, при температуре 20 °С равна

$$G_0 = V_{\text{бл}} K_3 \rho_{\text{в}}, \quad (33)$$

где $V_{\text{бл}}$ – внутренний объём блока; K_3 – коэффициент заполнения блока ($K_3 = V_{\text{дет}} / V_{\text{бл}}$); $\rho_{\text{в}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при температуре 20 °С.

11. По уточненному значению α^{II} повторяют расчёт во втором приближении, при этом принимают температуру зоны t_3 , температуру кожуха $t_{\text{к}}$, мощности $P_{\text{эл}}$ (получена по п. 4) и $P_{\text{к}}$ (получена из графика на рис. 3 при перегреве кожуха на $\Delta t_{\text{к}}$) оставляют неизменными.

12. В результате расчёта во втором приближении находят температуры t_1^{II} , t_2^{II} , $t_{\text{вых}}^{\text{II}}$ и G^{II} . Затем находят величину отношения G^{II}/G_0 и по графику (рис. 5) уточняют значение α^{III} .

13. Мощность, рассеиваемая блоком, во втором приближении равна

$$P^{\text{II}} = P_{\text{к}} + 2G^{\text{II}} c_p (t_2^{\text{II}} - t_1^{\text{II}}), \quad (34)$$

где $c_p = 1,01 \times 10^3 \text{ Дж/(кгК)}$ – удельная теплоёмкость воздуха при температуре 20 °С.

14. Температура $t_{\text{к}}^{\text{II}*}$ во втором приближении рассчитывается по формуле

$$t_k^{II*} = \frac{1}{S_{k1}} \left[\frac{2c_p G^{II}}{\alpha^{II}} (t_1 - t_c) + (S_{31} + S_{k1}) t_1^{II} - S_{31} t_3^{II} \right]. \quad (35)$$

15. Если величина разности температур t_k и t_k^{II} составляет более 5 %, то проводят расчёт в третьем приближении:

$$t_k^{III} = t_k^{II} - 0,1(t_k - t_k^{II}). \quad (36)$$

Для найденной температуры t_k^{III} по графику (рис. 3) находят мощность, рассеиваемую кожухом блока, в третьем приближении P_k^{III} .

16. Находят значение функции температур $f(t_3; t_k^{III})$ по формуле (11) и определяют $P_{3л}^{III}$. Далее уточняют величину D^{III} с учетом $(P_{3л}^{II} - P_k^{III})$; здесь P_k^{III} получена из графика при температуре t_k^{III} . Рассчитывают $t_1^{III}, t_2^{III}, t_3^{III}$ и находят G^{III} .

17. По полученным данным из графика (рис. 5) находят \square^{III} . Мощность, рассеиваемая блоком, в третьем приближении равна

$$P^{III} = P_k^{III} + 2G^{III} c_p (t_2^{III} - t_1^{III}). \quad (37)$$

18. Температура кожуха в третьем приближении определяется выражением

$$t_k^{III*} = \frac{1}{S_{k1}} \left[\frac{2G^{III} c_p}{\alpha^{III}} (t_1^{III} - t_2) + (S_{31} + S_{k1}) t_1^{III} - S_{31} t_3 \right]. \quad (38)$$

19. Окончательные значения температуры кожуха t_k и рассеиваемой мощности P в блоке находятся из соотношений

$$\frac{t_k - t_k^{III}}{t_k - t_k^{III*}} = \frac{t_k^{II} - t_k^{III}}{t_k^{II*} - t_k^{III*}}; \quad P = P^{III} + \frac{t_k - t_k^{III}}{t_k^{II} - t_k^{III}} (P^{II} - P^{III}). \quad (39)$$

Полученные в результате расчёта мощность P и соответствующая ей температура t_k наносятся на график рис. 3. По двум точкам строят характеристику $\square = f(P)$ (начало координат и t_k). Зная фактическую мощность, рассеиваемую в блоке, по этим двум характеристикам окончательно находят температуры перегрева зоны и кожуха. В случае, если они оказываются больше допустимых, необходимо увеличить площадь перфорационных отверстий либо перейти на принудительное охлаждение (вентиляцию) блока.

3. ТЕМПЕРАТУРА ЭЛЕМЕНТОВ БЛОКА С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

В блоках аппаратуры, построенных по кассетному принципу, удельная мощность тепловыделения оказывается весьма большой, что заставляет разработчиков использовать воздушное принудительное охлаждение (рис. 6). Воздух под напором вентилятора нагнетается в блок через входное отверстие, омывает, тепловыделяющие элементы и через выходное отверстие выбрасывается наружу. Предполагается, что тепловыделение всех микросхем одинаково. Микросхемы располагаются на печатных платах, входящих в кассеты. Кассеты расположены вдоль воздушного потока и расстояние между ними не менее 3 мм. Для обеспечения равенства сечений воздушных каналов в блоке имеются выравнивающие заслонки.

Исходные данные

P_3 – мощность, выделяемая всеми элементами блока, Вт (потребляемая мощность блока или выбирается из анализа схемы электрической принципиальной); N_n – число печатных плат (касет) в бло-

ке; L_y и L_z – внутренние размеры кожуха по координатам Y и Z ; h_n – толщина печатной платы; l_y – ширина печатной платы; l_{zy} и l_{zx} – размеры элемента (микросхемы).

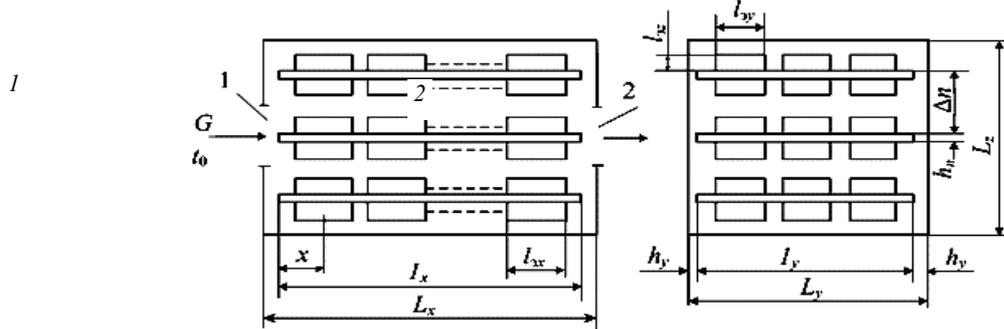


Рис. 6. Схема блока кассетной конструкции с принудительным воздушным охлаждением:

1 – входное; 2 – выходное отверстия

Последовательность расчёта

1. Задаются объёмным расходом воздуха G (берётся из справочных данных на применяемые типы вентиляторов).

2. Площадь среднего поперечного сечения воздушного канала на расстоянии x от входного отверстия определяется по формуле

$$S_x = L_y L_z - h_n l_n N_n - \sum_{i=1}^{2N_n} l_{zyi} n_{yi} \cdot \quad (40)$$

3. Число Рейнольдса равно

$$Re_3 = \frac{Gl'}{\nu S_x}, \quad (41)$$

где l' – определяющий размер микросхемы в направлении воздушного потока; ν – кинематическая вязкость воздуха.

4. Коэффициент теплоотдачи i -й микросхемы рассчитывается по формуле

$$\alpha_3 = 0,8 \frac{\lambda_B}{l'} \sqrt{Re_3}. \quad (42)$$

5. Перегрев воздуха ϑ_{B3} , протекающего вблизи микросхемы, расположенной на расстоянии x от начала платы:

$$\vartheta_{B3} = \frac{\sum_{i=1}^m P_{3i}}{1000 G \rho}, \quad (43)$$

где P_{3i} – мощность тепловыделения i -го элемента, расположенного до сечения x ; ρ – плотность воздуха; G – объёмный расход воздуха.

6. Перегрев воздуха за ϑ_3 счёт тепловыделения одного дискретного элемента

$$\vartheta_3 = \vartheta_{B3} + \frac{P_3}{\alpha_3 S_3}, \quad (44)$$

где S_3 – площадь поверхности элемента, омываемая воздушным потоком.

Температура поверхности корпуса элемента равна

$$t_3 = t_0 + \vartheta_3, \quad (46)$$

где t_0 – температура воздушного потока на входе блока.

7. Средний перегрев воздуха ϑ_B на выходе блока определяется по формуле

$$\vartheta_B = \frac{\sum P_3}{1000G\rho}. \quad (47)$$

Приведенный расчёт справедлив для одиночного блока. Если в набегающем воздушном потоке располагается вентилятор, то к суммарной мощности тепловыделения микросхем необходимо добавить мощность тепловыделения вентилятора.

4. РАСЧЁТ РАДИАТОРА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА

Исходные данные

$t_{п. \max}$ – максимальная температура перехода; $R_{вн}$ – внутреннее тепловое сопротивление прибора; $P_{рас}$ – мощность, рассеиваемая прибором; t_c – температура окружающей среды; $R_{кт}$ – контактное сопротивление прибор – теплосток (величина $R_{кт}$ лежит в пределах 0,1...1,0 град/Вт).

Последовательность расчёта

1. Определяется перегрев места крепления прибора с радиатором

$$\Delta t = (t_{п. \max} - t_c) - P_{рас} (R_{вн} + R_{кт}), \quad (48)$$

где $R_{кт}$ – контактное сопротивление прибор – теплосток $R_{кт} = 2,2 \cdot 10^{-4} / S_k$, S_k – площадь контактной поверхности, м²; $R_{тс}$ – тепловое сопротивление теплосток (радиатор) – среда. При этом должно выполняться условие $P_{\max} \leq P_{рас}$.

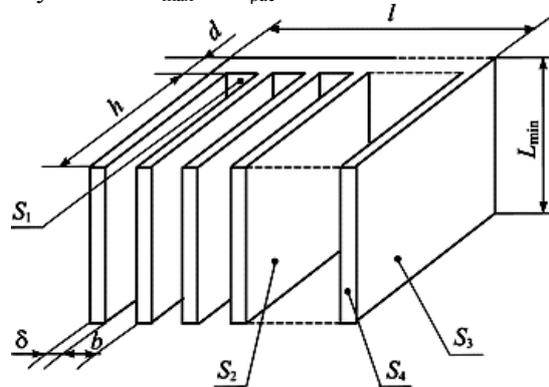


Рис. 7. Односторонний ребристый радиатор

2. Тепловое сопротивление теплосток – среда определяется по формуле

$$R_{тс} = \frac{(t_{п. \max} - t_c) - P_{рас} (R_{вн} + R_{кт})}{qP_{рас}}, \quad (49)$$

где q – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения температуры по радиатору ($q \leq 0,9$).

3. Среднеповерхностная температура перегрева радиатора $\leq t_p$ (рис. 7)

$$\leq t_p = P_{рас} R_{тс}. \quad (50)$$

4. По значению Δt_p (рис. 8) находят минимальную высоту радиатора L_{\min} .

5. Задаются габаритами радиатора: l – ширина радиатора; b – расстояние между ребрами; h – высота ребра; d – толщина основания. Рекомендуется придерживаться следующих соотношений, при основании радиатора 90 \times 90 мм: $\delta = 3$ мм; $d = 5$ мм; $h = 20$ мм; $b = 12$ мм (естественная конвекция) и $b = 6$ мм (принудительное движение воздуха).

6. Расстояние между ребрами

$$b = \frac{L_{\min} - \delta n}{n - 1}, \quad (51)$$

где n и δ – число и толщина ребра.

Расстояние между ребрами определяют из условия $b \geq A$, где A толщина пограничного слоя (при естественной конвекции $A = 8 \dots 10$ мм, вынужденной – $A \geq 2,5$ мм).

$R_{\text{тс}}, \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$

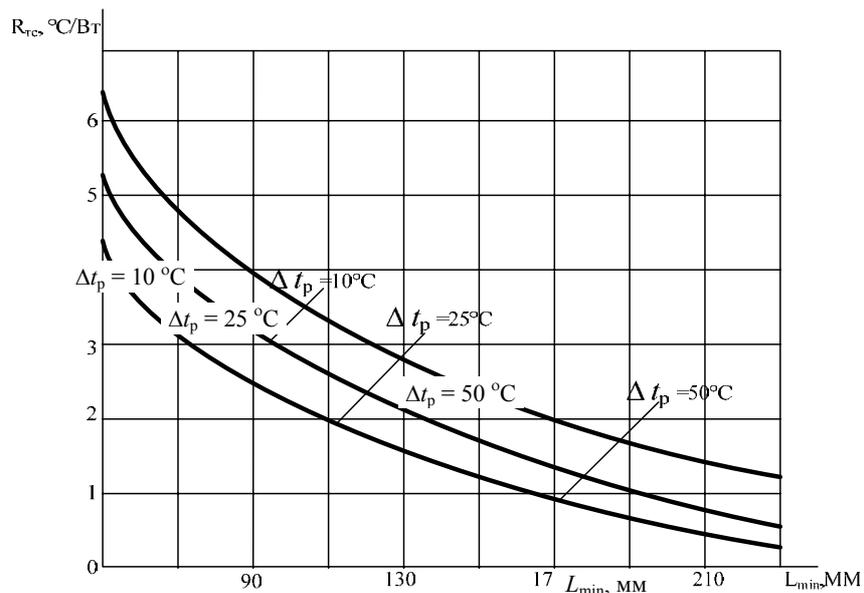


Рис. 8. Изменение сопротивления $R_{\text{тс}}$ от размера ребра радиатора и Δt_p при 50 $^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 0,9$; $\delta = 0,2$ см; $h = 30$ мм

Толщина и высота ребра выбираются из условия

$$\frac{\delta}{h^2} > \frac{\alpha}{\lambda}, \quad (52)$$

где h – высота ребра; α – суммарный коэффициент теплоотвода; λ – теплопроводность материала радиатора.

Ширину радиатора l определяют из конструктивных соображений, считая $l \approx 0,9L_{\min}$:

$$l = n(b + \delta) - b.$$

6. Материалы для радиаторов

Название материала	ρ , кг/м ³	α , Вт / (м ² $^\circ\text{C}$)
Медь	8960	370
Сплавы алюминия	2660	160
Сплавы магния	1760	170
Сталь	7840	55
Нержавеющая сталь	7840	14

7. Степень черноты поверхностей некоторых материалов

Алюминиевый сплав с шероховатой поверхностью	0,06...0,07
Алюминиевый сплав окисленный	0,20...0,30
Алюминиевый сплав анодированный (чёрный)	0,80...0,85
Медь окисленная	0,80...0,88

7. Целесообразность оребрения радиатора определяется в зависимости от значения критерия Био

$$Bi = 0,5\alpha\delta / \lambda, \quad (53)$$

$Bi < 1$ (ребро охлаждается), $Bi > 1$ (ребро изолятор), $Bi = 1$ (ребро не влияет).

8. Вся поверхность радиатора разбивают на части: S_1 – площадь между рёбрами; S_2 – площадь рёбер, обращённая друг к другу; S_3 – площадь крайних рёбер; S_4 – площадь торцов рёбер; S_5 – неоребрённая площадь.

Неоребрённая площадь

$$S_5 = lL.$$

Оребрённая площадь

$$S_{\text{ореб}} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = (n-1)(bL_{\min}) + 2hl(n-1) + 2(h+d)L_{\min} + n \square 2h \square + \square L_{\min} \square. \quad (54)$$

9. Полные коэффициенты теплоотдачи оребрённой и неоребрённой поверхностей

$$\alpha_{\text{гл}} = \alpha_{\text{л.гл}} + \alpha_{\text{к.гл}}, \alpha_{\text{ореб}} = \alpha_{\text{л.ореб}} + \alpha_{\text{к.ореб}}, \alpha_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{п}} \varphi_{ij} f(t_{\text{т}}, t_{\text{с}}). \quad (55)$$

Для поверхностей S_1 и S_2 коэффициенты взаимной облучённости определяются из графика (рис. 9) или рассчитываются

$$f(t_{\text{м}}, t_{\text{с}}) = 5,67 \left[(t_{\text{м}} + 273)^4 - (t_{\text{с}} + 273)^4 \right] 10^{-8} (t_{\text{м}} - t_{\text{с}})^{-1}. \quad (56)$$

Конвективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(см² □ C),

$$\alpha_{\text{к}} = 5,62A(t_{\text{м}})B; \quad (57)$$

$$B = \left(\frac{t_{\text{п.макс}} - t_{\text{с}}}{L_{\min}} \right)^{1/4},$$

где $t_{\text{м}} = 0,5(t_{\text{п.макс}} + t_{\text{с}})$.

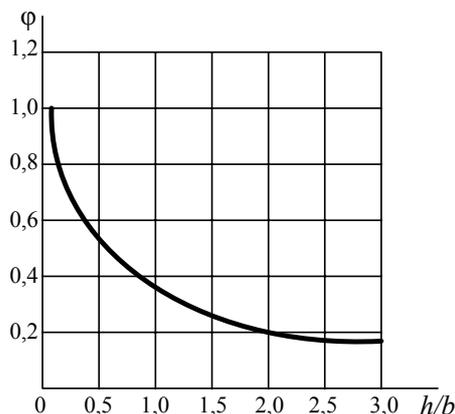


Рис. 9. Коэффициент взаимной облучённости

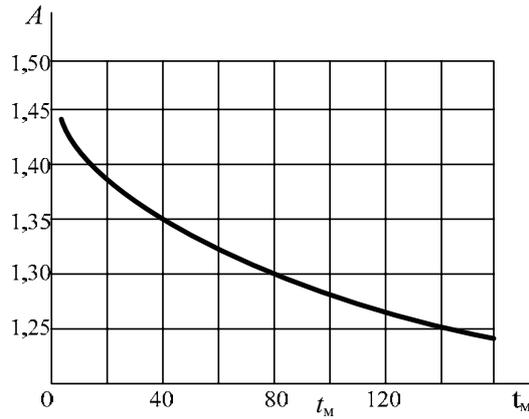


Рис. 10. Зависимость $A = f(t_m)$

Величина $A(t_m)$ учитывает свойства среды и находится по графику (рис. 10).
Влияние атмосферного давления на величину $A(t_m)$ находят из графика рис. 11.

10. Мощность, рассеиваемая гладкой поверхностью радиатора, Вт,

$$P_{\text{гл}} = \alpha_{\text{гл}} S_{\text{гл}} (t_{\text{r}} - t_{\text{c}}). \quad (58)$$

11. . Величина теплового сопротивления гладкой поверхности, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$,

$$R_{\text{тс}}^{\text{II}} = \frac{1}{\alpha_{\text{гл}} S_{\text{гл}}}. \quad (59)$$

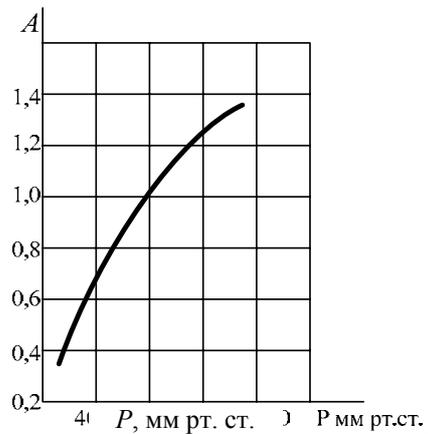


Рис. 11. Зависимость A от атмосферного давления

12. Мощность, рассеиваемая оребрённой поверхностью,

$$P_0 = \sum P_i = \sum S_i [\alpha_{\text{ик}}(t_{\text{ir}} - t_{\text{ic}}) + \alpha_{\text{ин}}(t_{\text{ir}} - t_{\text{c}})], \quad (60)$$

где P_i – мощность, рассеиваемая i -й поверхностью; t_{ic} – температура среды между рёбрами.

Температура воздуха вблизи поверхностей S_3, S_4 и S_5 равна t_{c} .

Температура воздуха вблизи поверхностей S_1 и S_2 (между рёбрами) равна

$$t_{\text{ic}} = t_{\text{r}} - (t_{\text{r}} - t_{\text{c}}) H, \quad (61)$$

где H – относительный температурный напор; t_{r} – среднеповерхностная температура теплового элемента.

Если рёбра располагаются вертикально, то

$$H = f(\eta), \quad (62)$$

где $\eta = A_4(t_m) bC$, $t_m = 0,5(t_r + t_c)$, $C = (t_r - t_c)^{1/4} / (L)^{1/4}$ (рис. 13 и 14); $t_{ci} = t_c$ для S_3, S_4, S_5 . $t_{ci} = t_{ic}$ для S_1 и S_2 (конвективный коэффициент торцевых поверхностей рёбер принимается равным крайним рёбрам).

Тепловое сопротивление оребрённой поверхности, °С/Вт,

$$R_{тс}^I = \frac{t_r - t_c}{P_{орёб}}. \quad (63)$$

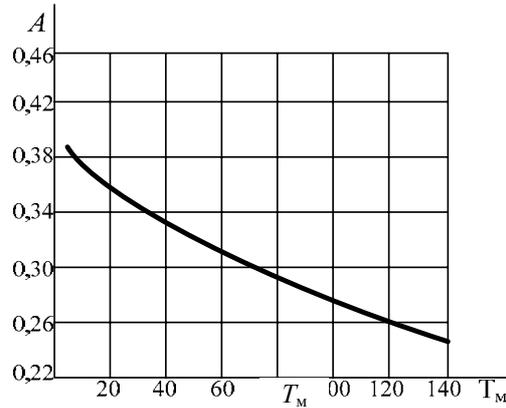


Рис. 12. Зависимость $A = f(t_m)$

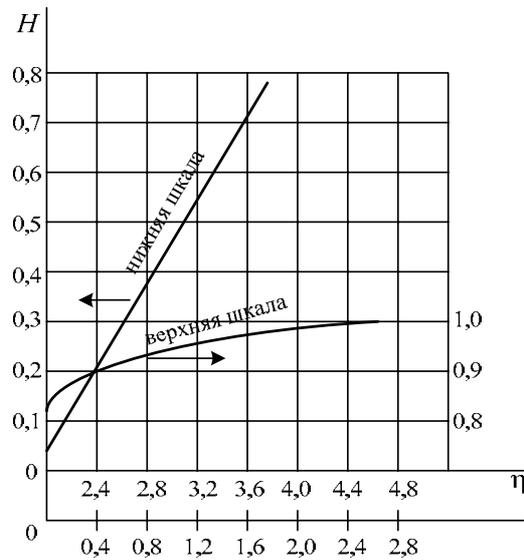


Рис 13. Зависимость $H = f(\eta)$

Общее тепловое сопротивление равно

$$R_{тс}^{расч} = \frac{R_{тс}^I R_{тс}^{II}}{R_{тс}^I + R_{тс}^{II}}. \quad (64)$$

Мощность, рассеиваемая радиатором, Вт,

$$P_{общ. расч} = P_{гл} + P_{орёб}. \quad (65)$$

Необходимо выполнить условие $P_{общ. расч} \geq P_{исх (расч)}$.

Радиатор с двухсторонним оребрением

Расчёт двухстороннего оребрённого радиатора производится по тем же формулам, что и расчёт односторонне оребрённого радиатора. При этом неоребрённую поверхность основания радиатора S_5 замещают соответствующими поверхностями рёбер. Для установки полупроводникового прибора на радиаторе часть рёбер должны быть удалены. Это учитывается соответствующим уменьшением площади оребрённой поверхности.

Радиатор типа пластины

При расчёте пластинчатого радиатора используют расчётные выражения для плоской поверхности (пластина может быть гладкой или изогнутой в виде буквы П).

Содержание отчёта

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Исходные данные.
4. Методические указания по выполнению работы.
5. Полученные расчёты по определению температуры блока и размеров радиатора полупроводникового прибора.
6. Выводы по результатам работы.
7. Список использованной литературы.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте понятие нагретой зоны.
2. Какие основные виды расчётов существуют, для определения температуры блока дайте их краткую характеристику?
3. Как определяются размеры и вид радиатора для полупроводникового прибора?
4. Какие исходные данные используются при тепловом расчёте блоков?
5. Сформулируйте понятие "охлаждение блока РЭС".
6. Сформулируйте понятие теплового режима РЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баканов, Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств : учебное пособие / Г.Ф. Баканов. – СПб. : Изд-во Академия, 2007. – 368 с.
2. Основы конструирования и технологии РЭС : учебное пособие для вузов / Ю.Л. Муромцев и др. – Тамбов : Изд-во ТВВАИУРЭ, 2007. – 267 с.
3. Шуваев, В.А. Методы обеспечения тепловых режимов при проектировании радиоэлектронных средств : учебное пособие / В.А. Шуваев. – Воронеж : ВГТУ, 2008. – 138 с.
4. Гелль, П.П. Конструирование и микроминиатюризация РЭА : учебник для вузов / П.П. Гелль, Н.К. Иванов-Есипович. – Л. : Энергоатомиздат. Ле-нингр. отд., 1984. – 535 с.
5. Дульнев, Г.Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах / Г.Н. Дульнев. – Л. : Энергия, 1968.
6. Родкоп, Л.Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры / Л.Л. Родкоп. – М. : Советское радио, 1976.
7. Конструирование радиоэлектронных средств / под ред. А.С. Назарова. – М. : МАИ, 1996.