

Министерство образования и науки Российской Федерации
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»**

Д.Ю. МУРОМЦЕВ, О.А. БЕЛОУСОВ

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РАСЧЁТА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию
в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и
автоматизации в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлениям 210200 «Проектирование
и технология РЭС», 211000 «Конструирование
и технология электронных средств»*



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
2012

УДК 621.1:004(075.8)
ББК з 844-02я73
М915

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Компьютерное и математическое моделирование»
ФГБОУ ВПО «ТГУ им. Г.Р. Державина»
А.А. Арзамасцев

Доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
М.В. Соколов

Муромцев, Д.Ю.
М915 Компьютерные технологии для расчёта тепловых режимов и механических воздействий : учебное пособие / Д.Ю. Муромцев, О.А. Белоусов – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 88 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-1063-6.

Систематизировано и подробно рассматриваются основные методы теплофизического конструирования функциональных узлов и блоков РЭС, а также вопросы, связанные с обеспечением прочности и жёсткости конструкции РЭС.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 210200 «Проектирование и технология РЭС», 211000 «Конструирование и технология электронных средств», может быть полезно при изучении дисциплины «Компьютерные технологии для расчёта тепловых режимов и механических воздействий» и выполнении лабораторных работ и курсовых проектов, а также может быть использовано студентами смежных специальностей и разных форм обучения.

УДК 621.1:004(075.8)
ББК з 844-02я73

ISBN 978-5-8265-1063-6

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2012

ВВЕДЕНИЕ

Конкурентоспособность вновь создаваемых радиоэлектронных средств (РЭС) в определяющей степени зависит от оперативности и качества их разработки, которые, в свою очередь, зависят от уровня применения компьютерных технологий на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ). РЭС как один из классов промышленной продукции отличаются по сложности реализации, условиям эксплуатации, а также многообразием и сложностью внешних воздействий, что ставит перед их разработчиками задачу удовлетворения зачастую противоречивых требований. В этой связи среди этапов создания РЭС важную роль играет этап проектирования, который не только отличается большой длительностью, достигающей для сложных РЭС 4 – 6 лет, но и связан сформированием основной части информации об изделии, обеспечивающей выпуск различных комплектов документации. Несмотря на столь значительные сроки этапа проектирования РЭС, на отечественных предприятиях радиоэлектронного профиля освоение серийного выпуска РЭС в первые годы эксплуатации сопровождается многочисленными доработками, целью которых является устранение различного рода недостатков, дефектов и предпосылок к отказам, связанных с низким уровнем применения методов компьютерного моделирования разрабатываемых объектов и их составных частей.

С учётом вышеизложенного в данном учебном пособии рассматриваются основные пути решения поставленной проблемы, которые основываются на применении современных компьютерных технологий, в частности, для обеспечения тепловых режимов и механических нагрузок с учётом дестабилизирующих факторов.

Предлагаемое пособие состоит из двух разделов, в которых представлены основные методики теплофизического конструирования радиоэлектронных модулей первого, второго и третьего уровня, а также освещены вопросы обеспечения защиты РЭС от внешних механических воздействий в реальных условиях эксплуатации.

1. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА

подавляющее большинство маломощных радиотехнических устройств 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. РЭС имеет низкий КПД использования энергии источников питания:

$$\eta = \frac{E_1}{E_n}, \quad (1.1)$$

где E_1 – полезная энергия (выходная электрическая энергия на выходе устройства).

$$E_n = E_1 + E_2 + E_3, \quad (1.2)$$

где E_2 – тепловая энергия рассеивания в окружающее пространство; E_3 – энергия, расходуемая на нагревание деталей узлов и элементов.

Для основных схем РЭС $\eta = 0,2 \dots 4\%$; ГВЧ – $\eta = 50 \dots 60\%$.

Отказы гибридно-интегральных модулей (ГИМ) под воздействием температуры, главным образом, возникают при нарушении отвода тепла и местных перегревах, особенно опасных для кристаллов интегральных схем.

Одна из важнейших задач конструктора РЭС состоит в том, чтобы обеспечить требуемые тепловые режимы для каждого элемента.

Прежде чем рассматривать вопросы по обеспечению тепловых режимов РЭС рассмотрим основные понятия теплообмена (рис. 1.1).

Тепловой режим РЭС есть пространственно-временное распределение температуры в РЭС, которое зависит от тепловыделения элементов.

Заданный тепловой режим РЭС – понимается такой тепловой режим, при котором температура каждого из элементов РЭС находится в заданных пределах $T_s \in [T_1, T_2]$.

Температурное поле РЭС – температура отдельных точек РЭС в пространстве.

Широкое использование микросхем и микросборок позволило значительно увеличить плотность компоновки деталей и сократить объём РЭС. Это привело к повышению удельной мощности рассеяния и к повышению температуры внутри РЭА по сравнению с аппаратурой, построенной на дискретных радиоэлементах. Чтобы снизить температуру внутри блоков, необходимо принимать дополнительные меры к охлаждению РЭА.

Охлаждение РЭС – процесс отвода (переноса) тепла от элементов РЭС в окружающую среду.

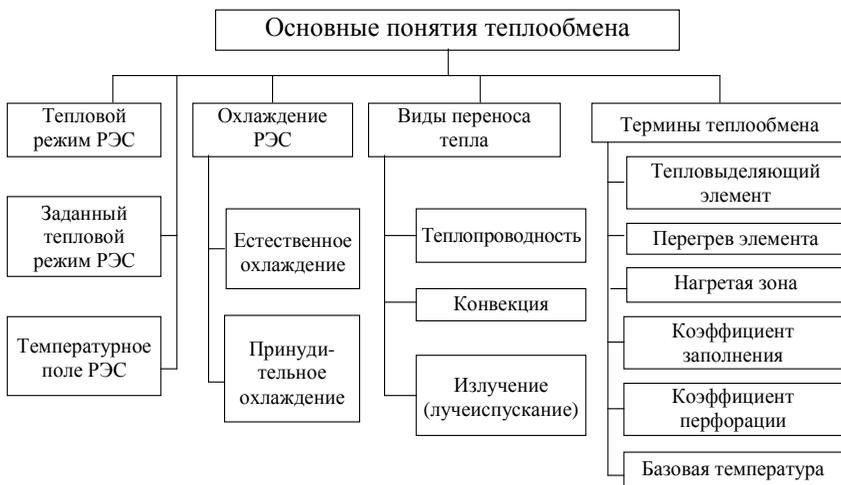


Рис. 1.1. Основные понятия теории теплообмена

Перенос теплоты от нагретого тела к холодному (или к окружающей среде) происходит за счёт теплопроводности, конвекции и теплового излучения.

Теплопроводность (кондукция) – процесс обмена тепловой энергией между телами или частями тел, которые соприкасаются между собой за счёт взаимодействия молекул. При естественном охлаждении РЭС теплопроводность составляет 10%.

Конвекция – процесс обмена теплом между телами за счёт движения частиц (макрочастиц) газа или жидкости. При естественном охлаждении РЭС конвекция составляет 70%.

Излучение – процесс переноса тепла за счёт превращения тепловой энергии в энергию излучения (лучистая энергия). При естественном охлаждении РЭС излучение составляет 20%.

Для описания всех трёх видов теплообмена можно использовать следующее соотношение:

$$Q = \alpha S \Delta T, \quad (1.3)$$

где Q – мощность тепловыделения, Вт; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К); S – площадь поверхности теплообмена, м²; ΔT – перепад температур между двумя изотермическими поверхностями в теле или между двумя телами, К.

Способы охлаждения могут быть охарактеризованы коэффициентом теплоотдачи (Вт/м² · К), значения которого для различных систем охлаждения приведены в табл. 1.1.

1.1. Коэффициенты теплоотдачи для различных систем охлаждения

Система охлаждения	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)
Естественная, воздушная, излучением	2...10
Принудительная воздушная	10...150
Естественная жидкостная	200...600
Принудительная жидкостная	300...3000
Испарительная	500...120 000

Основные термины теплообмена

1. *Тепловыделяющий элемент* – элемент, который генерирует тепло (навесной полупроводниковый прибор, резистор).

2. *Перегрев элемента* – разность между температурой элемента и базовой температурой.

3. *Нагретая зона блока РЭС* – объём пространства внутри блока, где располагаются элементы РЭС.

4. *Коэффициент заполнения блока* – отношение объёма всех элементов РЭС, находящихся внутри корпуса блока, к внутреннему объёму корпуса

$$K_V = \frac{V_{\text{Э}}}{V_{\text{БЛ}}}. \quad (1.4)$$

5. *Коэффициент перфорации блока* – отношение суммы площадей перфорационных отверстий к сумме площадей верхнего и нижнего основания корпуса блока:

$$K_{\text{П}} = \frac{S_{\text{П}}}{S_{\text{Н}} + S_{\text{В}}}. \quad (1.5)$$

6. *Нормальный тепловой режим индивидуального элемента* – режим, при котором температура элемента блока находится в допустимых пределах по техническому заданию на этот элемент.

7. *Удельная мощность корпуса блока* – отношение мощности тепловыделения в блоке к площади корпуса блока.

8. *Удельная мощность нагретой зоны* – отношение мощности тепловыделения в нагретой зоне к площади нагретой зоны блока.

9. *Базовая температура* – температура окружающей среды.

1.2. 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, кассеты или ячейки с микросхемами и отдельными дискретными элементами, имеющими геометрические размеры, соизмеримые с размерами микросхем. Кассеты или ячейки могут располагаться горизонтально или вертикально. При вертикальном расположении кассет или ячеек расчёт будет справедливым при условии, что расстояние между кассетами не превышает 3 мм, для горизонтального расположения кассет 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 размеры 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. 1.2).

Средняя высота элементов определяется по формуле

$$h_{1(2)} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{L_1 L_2}, \quad (1.6)$$

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

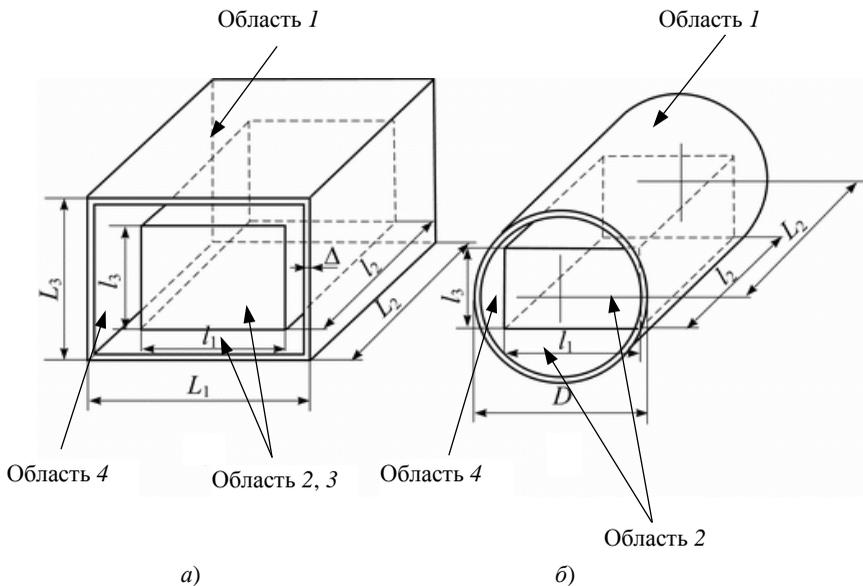


Рис. 1.2. Типы блоков:
a – прямоугольный; *б* – цилиндрический

Высота нагретой зоны в этом случае

$$l_3 = h_{\text{ш}} + h_1 + h_2, \quad (1.7)$$

где $h_{\text{ш}}$ – толщина шасси.

2. Расчёт площадей боковой S_6 , верхней S_B и нижней S_H стенок блока:

$$S_6 = 2L_3(L_1 + L_2); \quad S_B = S_H = L_1L_2. \quad (1.8)$$

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:

$$S_{31} = S_{32} = l_1l_2; \quad S_{34} = 2l_3(l_1 + l_2). \quad (1.9)$$

4. Приведённая степень черноты ϵ_n нагретой зоны в областях *1* и *2* рассчитывается по формулам

$$\epsilon_n = \left[\frac{1}{\epsilon_3} + \left(\frac{1}{\epsilon_k} - 1 \right) \frac{S_3}{S_k} \right]^{-1}; \quad (1.10)$$

$$S_k = S_6 + S_B + S_H,$$

где ϵ_3 , ϵ_k – степени черноты зоны и кожуха выбираются из табл. 1.2.

1.2. 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	0,90
Масляные краски	0,92
Никель полированный	0,08
Олово (луженое кровельное железо)	0,08
Платина	0,10
Резина твёрдая	0,95
Резина мягкая	0,86
Серебро полированное	0,05
Сталь никелированная	0,11
Сталь окисленная	0,80
Стальное литьё	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

$$\varepsilon_{п4} = \varepsilon_3 \varepsilon_k, \quad (1.11)$$

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

$$\sigma_3^1 = 23(L_1 - 2\Delta_4)(L_2 - 2\Delta_4), \quad (1.12)$$

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

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

1.3. Теплофизические параметры сухого воздуха при давлении 101,3·10⁵ Па

$t_m, ^\circ\text{C}$	$\lambda_m \cdot 10^2, \text{Вт/(мК)}$	$\text{M} \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$	Pr	$\rho, \text{кг/м}^3$
-50	2,04	9,23	0,728	1,584
-20	2,28	12,79	0,716	1,390
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	1,090
70	2,97	20,02	0,694	1,029
80	3,05	21,09	0,692	1,000
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 $\frac{1}{4}$ [3], исходя из этого предположения, рассчитывается коэффициент теплоотдачи α_k для всех наружных поверхностей кожуха по формуле

$$\alpha_k = 0,54(\text{Pr}g\beta)^{1/4} \frac{\lambda_m}{\nu_m^{1/2}} \left(\frac{t_i - t_c}{L} \right)^{1/4} N, \quad (1.13)$$

где $\text{Pr} = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля определяется из табл. 1.2; ν_m – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; β – коэффициент объёмного расширения, К^{-1} ; λ_m – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{мК})$; 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

$$\alpha_k = A_1 \left(\frac{t_i - t_c}{L} \right)^{1/4}. \quad (1.14)$$

Здесь коэффициент A_1 находится по табл. 1.4 в зависимости от температуры t_m °С.

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

8. Расчёт коэффициента лучеиспускания выполняется следующим образом:

$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{n}} \Phi_{12} f(t_1, t_2); \quad (1.15)$$

$$f(t_1, t_2) = 5,67 \frac{\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4}{t_1 - t_2}, \quad (1.16)$$

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

1.4. Значения A_1 для воздуха

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

9. Далее рассчитываются полные коэффициенты теплоотдачи с поверхности кожного:

$$\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{кв}} + \alpha_{\text{л}}; \quad \alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{кн}} + \alpha_{\text{л}}; \quad \alpha_{\text{б}} = \alpha_{\text{кб}} + \alpha_{\text{л}}, \quad (1.16)$$

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

10. Тепловая проводимость кожного в окружающую среду

$$\alpha_{\text{к}} = \alpha_{\text{в}}s_{\text{в}} + \alpha_{\text{н}}s_{\text{н}} + \alpha_{\text{б}}s_{\text{б}}. \quad (1.17)$$

11. Температура нагретой зоны t_3^I в первом приближении

$$t_3^I = t_{\text{с}} + (t_{\text{к}} - t_{\text{с}}) \left(1 + \frac{\sigma_{\text{к}}}{\sigma_3} \right). \quad (1.18)$$

12. Расчётная мощность P^I нагретой зоны в предположении, что кожный имеет перегрев $\Delta t_{\text{к}}$ (заданный в п. 6):

$$P^I = \alpha_{\text{к}}(t_{\text{к}} - t_{\text{с}}). \quad (1.19)$$

На этом начальный этап заканчивается.

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

13. Поскольку область l (см. рис. 1.2) замкнутая, то используют конвективно-кондуктивные коэффициенты верхней $K_{\text{в}}$ и боковой $K_{\text{б}}$ воздушной прослойки между нагретой зоной и внутренней поверхностью кожного:

$$k_i = Nf \left(\frac{h_i}{l} \right) A_2 \sqrt[4]{\frac{t_3^I - t_{\text{к}}}{h_i}}, \quad i \in \{\text{в}, \text{б}\}, \quad (1.20)$$

где h_i – толщина воздушной прослойки между нагретой зоной и кожным 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 кожного. Значение A_2 находится из табл. 1.5, а величину $f(h_i/l)$ находят из графика (рис. 1.3).

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

1.5. Значения A_2 для воздуха

$T_m, ^\circ\text{C}$	0	50	100	200
A_2	0,63	0,58	0,56	0,44

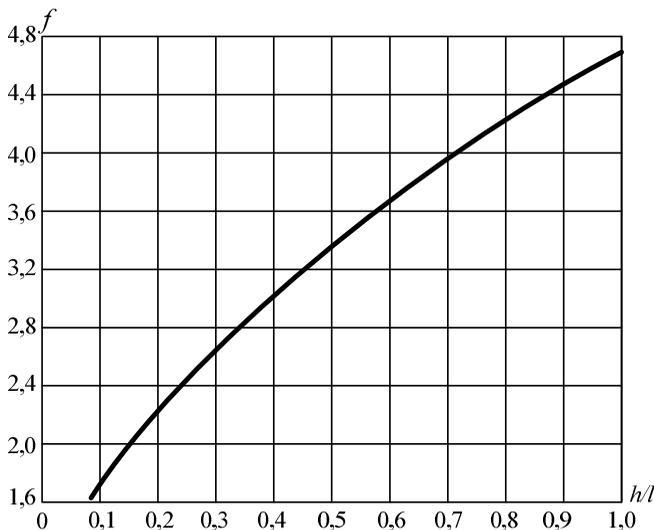


Рис. 1.3. Значение функции $f(h_i/l)$

14. Определяют лучистую составляющую коэффициента теплопередачи областей 1, 2 и 4 (см. рис. 1.2) для воздушного зазора между боковой поверхностью нагретой зоны и кожухом. При этом величина приведенной 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 $\alpha_{п1}$, $\alpha_{п2}$, $\alpha_{п4}$.

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

$$K_1 = k_1 + \alpha_{п1}; K_4 = k_4 + \alpha_{п4}; K_2 = \lambda_2/h_n + \alpha_{п2}. \quad (1.21)$$

Для нагретой зоны, ориентированной вертикально, коэффициенты теплопередачи равны

$$K_1 = k_1 + \alpha_{п1}; K_2 = k_2 + \alpha_{п2}; K_4 = (k_1 + k_2)/2 + \alpha_{п4}. \quad (1.22)$$

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

$$t_3^{\text{II}} = t_c + P^I \left(\frac{1}{\sigma_{\text{к}}^I} + \frac{1}{\sigma_{\text{к}}^{\text{II}}} \right), \quad (1.23)$$

где $\sigma_{\text{к}}^I$ – тепловая проводимость от кожуха в окружающую среду, полученная при расчёте в первом приближении; $\sigma_{\text{к}}^{\text{II}}$ – тепловая проводимость

от нагретой зоны к кожуху, рассчитанная во втором приближении по формуле $\sigma_{\text{к}}^{\text{II}} = K_1 S_{31} + K_2 S_{32} + K_4 S_{34}$.

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

$$t_{\text{п}}^{\text{III}} = (t_3^{\text{I}} + t_3^{\text{II}}) / 2. \quad (1.24)$$

Получают одну точку тепловой характеристики блока $\Delta t_3 = f(P)$ и $\Delta t_{\text{к}} = f(P)$ (рис. 1.5). 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 $\Delta t_3 = f(P)$ и $\Delta t_{\text{к}} = f(P)$. Искомые температуры кожуха и зоны находят по этим характеристикам при мощности фактически рассеиваемой в блоке $P_{\text{н}}$.

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

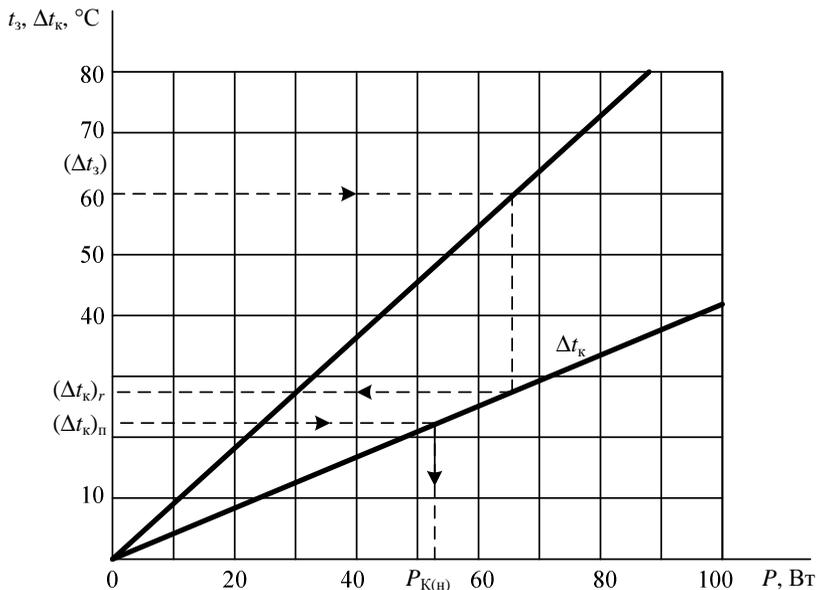


Рис. 1.5. Тепловые характеристики

1.3. 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. 1.6.

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 и 2 (см. рис. 1.6, а) и шасси, м²;

t_c – температура окружающей среды.

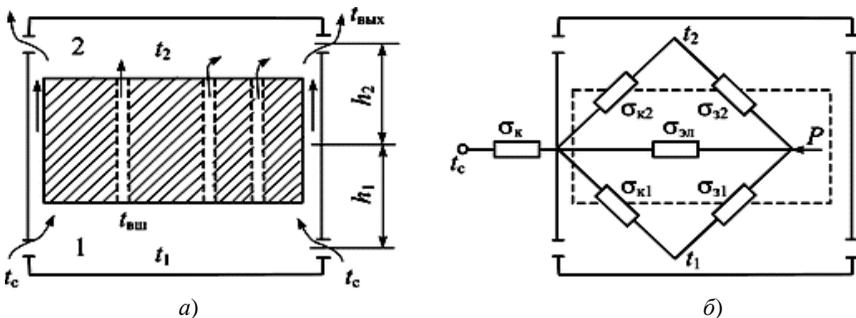


Рис. 1.6. Тепловые модели блока:

а – расчётная модель блока; б – эквивалентная схема тепловых проводимостей

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. 1.5).

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

$$(\Delta t_{кп}) = 0,75(\Delta t_{кг}), \quad (1.25)$$

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

Затем по графику рис. 1.3 находят мощность $P_{к}$, соответствующую этому перегреву.

3. Задаются коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{зк}^I$ от зоны к кожуху (рекомендуется величину $\alpha_{зк}^I$ в первом приближении выбирать равной 4...6, Вт/(м²·К) [3, 4].

4. Мощность теплоотода от зоны к кожуху за счёт лучеиспускания

$$P_{зл} = \epsilon_{п} f(t_3, t_к) (t_3 - t_к) \Phi_{зк} S_3, \quad (1.26)$$

где $\epsilon_{п}$ – приведённая степень черноты нагретой зоны и внутренней поверхности кожуха (если ϵ_3 и $\epsilon_к$ имеют значения больше 0,75, то $\epsilon_{п} = \epsilon_3 \epsilon_к$, величину $\epsilon_{п}$ можно взять из расчёта блока при условии герметичности кожуха); $\Phi_{зк} = 1$ – 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 определяется решением уравнения

$$at_1^2 + bt_1 + c = 0. \quad (1.27)$$

Здесь

$$a = 2(S_{31} + S_{к1}) - \frac{S_{к1}}{S_{к2}}(S_{32} + S_{к2} - S_{31} - S_{к1}); \quad (1.28)$$

$$b = \left(2 + \frac{S_{к1}}{S_{к2}}\right) A_1 + A_2 - D(S_{32} + S_{к2} - S_{31} - S_{к1}) + \left(S_{31} - S_{к1} \frac{S_{32}}{S_{к2}}\right) t_c; \quad (1.29)$$

$$A_1 = S_{31}t_3 + S_{к1}t_к; \quad A_2 = S_{32}t_3 + S_{к2}t_к; \quad A = A_1 + A_2; \quad (1.30)$$

$$D = S_{\kappa} \frac{t_{\kappa}}{S_{\kappa 2}} - \frac{P_{3\text{Л}} - P_{\kappa}}{\alpha_{3\kappa}^1 S_{\kappa 2}}; \quad (1.31)$$

$$c = DA_1 + [A - (S_{32} + S_{\kappa 2})D]t_c, \quad (1.32)$$

где S_{31} , S_{32} , $S_{\kappa 1}$, $S_{\kappa 2}$ – поверхности нагретой зоны и кожуха в соответствующих областях.

Из двух значений температуру 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

$$t_2^I = D - \frac{S_{\kappa 1} t_1}{S_{\kappa 2}}. \quad (1.33)$$

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

$$t_{\text{ВШ}}^I = 2t_1^I - t_c. \quad (1.34)$$

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

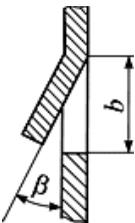
$$t_{\text{ВЫХ}}^I = 2t_2^I - t_{\text{ВШ}}^I. \quad (1.35)$$

9. Количество протекающего воздуха через блок определяется выражением

$$G^I = S_1 \mu_1 T_c \rho_c \sqrt{2g} \sqrt{\frac{\frac{h_1 + h_2}{T_c} - \frac{h_1}{T_1} - \frac{h_2}{T_2}}{T_c + \left(\frac{S_1 \mu_1}{S_2 \mu_2}\right)^2 T_2 + \left(\frac{S_1 \mu_1}{S_{\text{ш}} \mu_{\text{ш}}}\right)^2 T_1}}, \quad (1.36)$$

где S_1 , S_2 , $S_{\text{ш}}$ – 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 , $\mu_{\text{ш}}$ – 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 раскрыва (табл. 1.6); T_1 , T_2 , T_c – абсолютные температуры соответствующих областей.

1.6. 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. 1.7) уточняют коэффициент теплоотдачи α^{II} .
 Масса воздуха, заполняющего блок, при температуре 20 °С равна

$$G_0 = V_{\text{бл}} K_3 \rho_{\text{в}}, \quad (1.37)$$

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.

α , Вт/м²·К

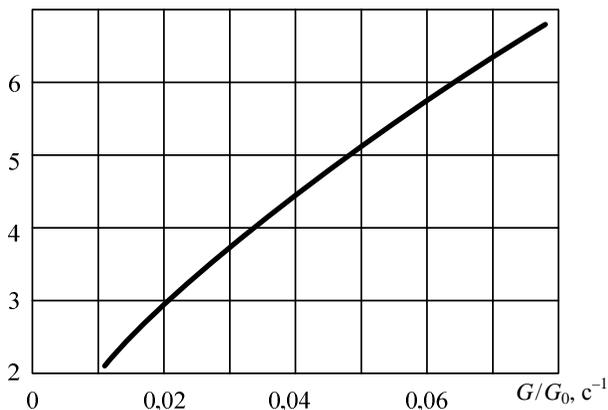


Рис. 1.7. Зависимость коэффициента теплопередачи от количества протекающего воздуха и массы заполняющего блок воздуха

11. По уточнённом значению α^{II} повторяют расчёт во втором приближении, при этом принимают температуру зоны t_3 , температуру кожуха $t_{\text{к}}$, мощности $P_{\text{зл}}$ (получена по п. 4) и $P_{\text{к}}$ (получена из графика на рис. 1.3 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. 1.5) уточняют значение α^{III} .

13. Мощность, рассеиваемая блоком, во втором приближении равна

$$P^{\text{II}} = P_{\text{к}} + 2G^{\text{II}}c_p(t_2^{\text{II}} - t_1^{\text{II}}), \quad (1.38)$$

где $c_p = 1,01 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – удельная теплоёмкость воздуха при температуре 20°C .

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

$$t_{\text{к}}^{\text{II}*} = \frac{1}{S_{\text{к1}}} \left[\frac{2c_p G^{\text{II}}}{\alpha^{\text{II}}} (t_1 - t_c) + (S_{\text{з1}} + S_{\text{к1}}) t_1^{\text{II}} - S_{\text{з1}} t_3^{\text{II}} \right]. \quad (1.39)$$

15. Если величина разности температур $t_{\text{к}}$ и $t_{\text{к}}^{\text{II}}$ составляет более 5%, то проводят расчёт в третьем приближении:

$$t_{\text{к}}^{\text{III}} = t_{\text{к}}^{\text{II}} - 0,1(t_{\text{к}} - t_{\text{к}}^{\text{II}}). \quad (1.40)$$

Для найденной температуры $t_{\text{к}}^{\text{III}}$ по графику (рис. 1.3) находят мощность, рассеиваемую кожухом блока, в третьем приближении $P_{\text{к}}^{\text{III}}$.

16. Находят значение функции температур $f(t_3; t_{\text{к}}^{\text{III}})$ по формуле (11) и определяют $P_{\text{зл}}^{\text{III}}$. Далее уточняют величину D^{III} с учётом $(P_{\text{зл}}^{\text{II}} - P_{\text{к}}^{\text{III}})$; здесь $P_{\text{к}}^{\text{III}}$ получена из графика при температуре $t_{\text{к}}^{\text{III}}$. Рассчитывают t_1^{III} , t_2^{III} , t_3^{III} и находят G^{III} .

17. По полученным данным из графика (рис. 1.7) находят α^{III} . Мощность, рассеиваемая блоком, в третьем приближении равна

$$P^{\text{III}} = P_{\text{к}}^{\text{III}} + 2G^{\text{III}}c_p(t_2^{\text{III}} - t_1^{\text{III}}). \quad (1.41)$$

18. Температура кожуха в третьем приближении определяется выражением

$$t_{\text{к}}^{\text{III}*} = \frac{1}{S_{\text{к1}}} \left[\frac{2G^{\text{III}}c_p}{\alpha^{\text{III}}} (t_1^{\text{III}} - t_2) + (S_{\text{з1}} + S_{\text{к1}}) t_1^{\text{III}} - S_{\text{з1}} t_3 \right]. \quad (1.42)$$

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

$$\frac{t_k - t_k^{\text{III}}}{t_k - t_k^{\text{III}^*}} = \frac{t_k^{\text{II}} - t_k^{\text{III}}}{t_{k1}^{\text{II}^*} - t_{k1}^{\text{III}^*}}; \quad P = P^{\text{III}} + \frac{t_k - t_k^{\text{III}}}{t_k^{\text{II}} - t_k^{\text{III}}} (P^{\text{II}} - P^{\text{III}}). \quad (1.43)$$

Полученные в результате расчёта мощность P и соответствующая ей температура t_k наносятся на график рис. 1.5. По двум точкам строят характеристику $\Delta t_k = f(P)$ (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.

1.4. 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. 1.8). 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.

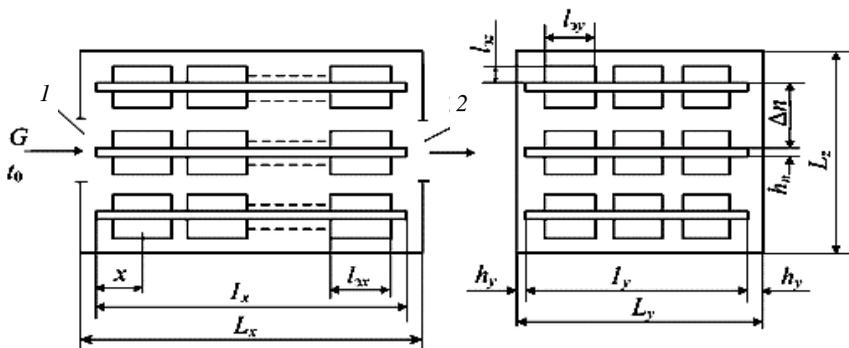


Рис. 1.8. Схема блока кассетной конструкции с принудительным воздушным охлаждением:

1 – входное, 2 – выходное отверстия

Исходные данные

P_3 – мощность, выделяемая всеми элементами блока, Вт (потребляемая мощность блока или выбирается из анализа схемы электрической принципиальной);

$N_{\text{п}}$ – число печатных плат (кассет) в блоке;

L_y и L_z – внутренние размеры кожуха по координатам Y и Z ;

$h_{\text{п}}$ – толщина печатной платы;

l_y – ширина печатной платы; l_{y_i} и l_{z_i} – размеры элемента (микросхемы).

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

$$S_x = L_y L_z - h_{\text{п}} l_{\text{п}} N_{\text{п}} - \sum_{i=1}^{2N_{\text{п}}} l_{z_i} n_{y_i} \cdot \quad (1.44)$$

3. Число Рейнольдса равно

$$\text{Re}_3 = \frac{G l'}{v S_x}, \quad (1.45)$$

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

4. Коэффициент теплоотдачи i -й микросхемы рассчитывается по формуле

$$\alpha_3 = 0,8 \frac{\lambda_{\text{в}}}{l'} \sqrt{\text{Re}_3}. \quad (1.46)$$

5. Перегрев воздуха $\vartheta_{\text{в3}}$, протекающего вблизи микросхемы, расположенной на расстоянии x от начала платы:

$$\vartheta_{\text{в3}} = \frac{\sum_{i=1}^m P_{3i}}{1000 G \rho}, \quad (1.47)$$

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

$$\vartheta_3 = \vartheta_{\text{в3}} + \frac{P_3}{\alpha_3 S_3}, \quad (1.48)$$

где S_3 – площадь поверхности элемента, омываемая воздушным потоком.

Температура поверхности корпуса элемента равна

$$t_3 = t_0 + \vartheta_3, \quad (1.49)$$

где t_0 – температура воздушного потока на входе блока.

7. Средний перегрев воздуха $\vartheta_в$ на выходе блока определяется по формуле

$$\vartheta_в = \frac{\sum P_3}{1000 G_p}. \quad (1.50)$$

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

Пример расчёта температуры одиночного блока с естественным охлаждением

Примерные размеры блока $L_1 = 0,281$ м; $L_2 = 0,204$ м; $L_3 = 0,195$ м.

Размеры нагретой зоны $l_1 = 0,26$ м; $l_2 = 0,19$ м; $l_3 = 0,18$ м.

Температура окружающей среды $t_c = 20$ °С, рассеиваемая блоком мощность в виде теплоты $P_0 = 12$ Вт.

Величины воздушных зазоров между нагретой зоной и нижней поверхностью корпуса $h_n = 0,015$ м, нагретой зоной и верхней поверхностью корпуса $h_в = 0,015$ м, нагретой зоной и боковой поверхностью корпуса $h_б = 0,02$ м.

Находим площади поверхностей нагретой зоны:

$$S_в = S_n = l_1 l_2; \quad S_б = 2l_3 (l_1 + l_2);$$
$$S_в = S_n = 0,0494 \text{ м}^2; \quad S_б = 0,162 \text{ м}^2.$$

Рассчитываем приведённые степени черноты нагретой зоны в разных областях поверхностей нагретой зоны

$$\varepsilon_{\Pi} = \left(\frac{1}{\varepsilon_3} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{\kappa}} - 1 \right) \frac{S_3}{S_{\kappa}} \right)^{-1},$$

где $\varepsilon_{\Pi n}$, $\varepsilon_{\Pi в}$, $\varepsilon_{\Pi б}$ – соответственно ε поверхностей нагретой зоны: нижней, верхней и боковой; S_3 , S_{κ} – площади нагретой зоны и корпуса

$$\varepsilon_{\Pi n} = \varepsilon_{\Pi в} = 0,496; \quad \varepsilon_{\Pi б} = 0,42.$$

Рассчитываем удельную поверхностную мощность корпуса блока q_{κ} :

$$q_{\kappa} = P_0 / S_{\kappa} = 12 / 0,262 = 45,8 \text{ Вт/м}^2.$$

В соответствии с найденной q_k задаётся перегревом корпуса блока $\Delta t_k = 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Коэффициент лучеиспускания определяется по формуле

$$\alpha_{л} = \varepsilon_{п} \varphi_{12} f(t_1, t_2);$$

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

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

$$\alpha_{лн} = 0,4965 \cdot 67 \cdot \frac{\left(\frac{25 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100}\right)^4}{25 - 20} = 2,903 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_{лб} = 0,425 \cdot 67 \cdot \frac{\left(\frac{25 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100}\right)^4}{25 - 20} = 2,458 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Определяем коэффициент теплоотдачи α_k для всех наружных поверхностей кожуха блока:

$$\alpha_k = A_1 \left(\frac{t_1 - t_2}{L}\right)^{1/4} N,$$

где A_1 – коэффициент, зависящий от температуры, введён для упрощения расчётов [3 – 5]; N – коэффициент ориентации нагретой поверхности: для вертикальной стенки $N = 1$; для нагретой поверхности, обращённой вниз; $N = 0,7$ и вверх $N = 1,3$; L – определяющий размер, м: для вертикально ориентированной поверхности – высота, для горизонтально ориентированной поверхности – меньшая сторона.

Коэффициенты теплоотдачи нижней и боковой поверхностей кожуха блока:

$$\alpha_{кн} = 1,38 \cdot \left(\frac{25 + 20}{0,015}\right)^{1/4} = 5,897 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_{кб} = 1,38 \cdot \left(\frac{25 + 20}{0,02}\right)^{1/4} = 5,487 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Рассчитываем полные коэффициенты теплоотдачи с поверхности кожуха блока:

$$\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{кв}} + \alpha_{\text{л}}, \quad \alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{кн}} + \alpha_{\text{л}}, \quad \alpha_{\text{б}} = \alpha_{\text{кб}} + \alpha_{\text{л}};$$

$$\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{н}} = 5,897 + 2,903 = 8,8;$$

$$\alpha_{\text{б}} = 5,487 + 2,458 = 9,945.$$

Определяем тепловую проводимость кожуха блока в окружающую среду:

$$\sigma_{\text{к}} = \sigma_{\text{в}} S_{\text{в}} + \alpha_{\text{н}} S_{\text{н}} + \alpha_{\text{б}} S_{\text{б}};$$

$$S_{\text{н}} = 0,0494 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{б}} = 0,162 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{в}} = 0,0494 \text{ м}^2;$$

$$\sigma_{\text{к}} = 2,157 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где $\sigma_{\text{к}}$ – тепловая проводимость кожуха блока в окружающей среде [3, 4].

Определяем температуру нагретой зоны в первом приближении:

$$t_{\text{с}}^{\text{I}} = t_{\text{с}} + (t_{\text{к}} - t_{\text{с}}) \left(1 + \frac{\sigma_{\text{к}}}{\sigma_3} \right),$$

где $t_{\text{к}}$ и $t_{\text{с}}$ – температуры корпуса и среды соответственно.

$$t_1 = 20 + (25 - 20) \left(1 + \frac{2,157}{1,2} \right) = 33,987 \text{ } ^\circ\text{C},$$

Определяем расчётную мощность нагретой зоны:

$$P^{\text{I}} = \sigma_{\text{к}} (t_{\text{к}} - t_{\text{с}}),$$

$$P^{\text{I}} = 2,157 \cdot 5 = 10,785 \text{ Вт}.$$

Рассчитаем конвективно-кондуктивные коэффициенты верхней и боковой воздушной прослойки между нагретой зоной и внутренней поверхностью кожуха блока:

$$k_i = Nf \left(\frac{h_i}{l} \right) A_2 \sqrt[4]{\frac{t_3^{\text{I}} - t_{\text{к}}}{h_i}},$$

где h_i – толщина воздушной прослойки между нагретой зоной и кожухом блока в соответствующей области, м; A_2 – коэффициент, зависящий от

температуры, введён для упрощения расчётов [3, 4]; $l = \sqrt{l_1 l_2}$ – для верхней области; $l = \sqrt{l_3 l_2}$ и $l = \sqrt{l_3 l_1}$ – для боковых областей нагретой зоны и кожуха блока:

$$k_H = 0,7 \cdot 0,61 \cdot 1,6 \cdot \sqrt[4]{\frac{33,987 - 25}{0,015}} = 3,38;$$

$$k_B = 1,3 \cdot 0,61 \cdot 1,6 \cdot \sqrt[4]{\frac{33,987 - 25}{0,015}} = 6,277;$$

$$k_G = 1 \cdot 0,61 \cdot 1,7 \cdot \sqrt[4]{\frac{33,987 - 25}{0,02}} = 4,774.$$

Определим коэффициенты лучеиспускания для различных поверхностей корпуса:

$$\alpha_{\text{лн}2} = 0,496 \cdot 5,67 \cdot \frac{\left[\left(\frac{33,987 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right]}{33,987 - 20} = 3,039,$$

где $\alpha_{\text{лн}2}$ – коэффициент лучеиспускания во втором приближении [3, 4]:

$$\alpha_{\text{лб}2} = 0,42 \cdot 5,67 \cdot \frac{\left[\left(\frac{33,987 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right]}{33,987 - 20} = 2,573.$$

Определяем коэффициенты теплопередачи и тепловую проводимость между нагретой зоной и корпусом:

$$\alpha_{B2} = \alpha_{H2} = 5,897 + 3,039 = 8,936;$$

$$\alpha_{G2} = 5,487 + 2,573 = 8,06;$$

$$\sigma_{K2} = 8,936S_B + 8,936S_H + 8,06S_G = 2,189 \text{ Вт/К}^2.$$

Определяем температуру нагретой зоны во втором приближении:

$$t_3^{\text{II}} = t_c + P \left(\frac{1}{\sigma_3} + \frac{1}{\sigma_K} \right),$$

где P – мощность, полученная при расчёте в первом приближении, Вт; σ_3 – тепловая проводимость от нагретой зоны к кожуху блока, рассчитанная во втором приближении, Вт/К²; σ_K – тепловая проводимость от кожуха

блока в окружающую среду полученная при расчёте в первом приближении, Вт/К².

$$t_2 = 20 + 10,785 \left(\frac{1}{2,157} + \frac{1}{2,189} \right) = 30,927 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Сравним температуры нагретой зоны, полученные при расчётах в первом и во втором приближениях. Если разница будет составлять более 10%, то надо произвести расчёт температуры нагретой зоны в третьем приближении:

$$\delta = \frac{t_1 - t_2}{t_1} = \frac{33,987 - 30,927}{33,987} = 0,09;$$

$\delta = 9\%$, следовательно, нет необходимости производить расчёт температуры нагретой зоны в третьем приближении.

Таким образом, корпус проектируемого блока РЭС в целом удовлетворяет допустимым значениям перегрева с учётом климатического исполнения и для охлаждения проектируемого изделия рациональной является система, основанная на естественном воздушном охлаждении.

1.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТА

Для определения температуры корпуса электрорadioэлемента, установленной в модуле 1-го уровня, операции выполняют в следующей последовательности.

1. Определение эквивалентного коэффициента теплопроводности модуля, в котором расположена микросхема для вариантов:

– при отсутствии теплопроводных шин $\lambda_{\text{экр}} = \lambda_{\text{п}}$, где $\lambda_{\text{п}}$ – теплопроводность материала основания платы [2, 3, 5];

– при наличии теплопроводных шин

$$\lambda_{\text{экр}} = (1 - A)\lambda_{\text{п}} \left[1 - \frac{V_{\text{ш}}}{V_{\text{п}}} + \frac{1}{(V_{\text{ш}}/V_{\text{п}})(\lambda_{\text{ш}}/\lambda_{\text{п}}) + 1 - V_{\text{ш}}/V_{\text{п}}} \right]^{-1} + A \frac{\lambda_{\text{п}}}{2} \left[1 + \frac{\lambda_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{п}}} \frac{V_{\text{ш}}}{V_{\text{п}}} + \frac{1}{1 - V_{\text{ш}}/V_{\text{п}}} \right] \quad (1.51)$$

где A – поверхностный коэффициент заполнения платы модуля теплопроводными шинами, $A = S_{\text{ш}}/S_{\text{п}}$; $S_{\text{ш}}$ – суммарная площадь, занимаемая теплопроводными шинами на ПП; $V_{\text{п}}$ – объём ПП с учётом объёма теплопроводных шин; $V_{\text{ш}}$ – объём теплопроводных шин на ПП; $\lambda_{\text{ш}}$ – теплопроводность материала теплопроводной шины;

Теплофизические параметры некоторых материалов приведены в табл. 1.7.

1.7. Теплофизические свойства материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)
Алюминий	208
Бронза	64
Латунь	85,8
Медь	390
Сталь	45,5
Асбестовая ткань	0,169
Асбест листовой	0,116
Слюда	0,583
Пластмасса полихлорвиниловая	0,443
Фторопласт-4	0,25
Полистирол	0,09...0,14
Эбонит	0,163
Стеклотекстолит	0,24...0,34
Стекло	0,74
Фарфор	0,834
Картон	0,231
АЛ-9	151
АЛ-2	175
АМЦ	188
Пенопласт ПХВ-2	0,04
Пенополиуретан ЭПЭ	0,06

2. Определение эквивалентного радиуса корпуса микросхем:

$$R = \sqrt{\frac{S_{0ис}}{\pi}}, \quad (1.52)$$

где $S_{0ис}$ – площадь основания микросхемы.

3. Расчёт коэффициента распространения теплового потока

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\delta_{п} \lambda_{ЭКВ}}}, \quad (1.53)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплообмена с 1-й и 2-й сторон ПП; для естественного теплообмена $\alpha_1 + \alpha_2 = 17$ Вт/(м²·К); $\delta_{п}$ – толщина ПП модуля.

4. Определение искомого перегрева поверхности корпуса микросхемы:

$$\Delta t_{ис} = \Delta t_B + k \left[\frac{Q}{k_{\alpha} (S_{ис} - S_{0ис}) + \frac{1}{\frac{\delta_3}{\lambda_3 \pi R^2} + \frac{1}{B + M \pi R \lambda_{\text{эКВ}} \delta_{\text{П}} m \frac{K_1(mR)}{K_0(mR)}}}} \right] + \sum_{i=1}^N \frac{Q_i \frac{K_0(mr_i)}{K_0(mR_i)}}{k_{\alpha i} (S_{ис i} - S_{0ис i}) \left\{ 1 + \left[\frac{\delta_{3i}}{\lambda_{3i} \pi R_i^2} + \frac{1}{k_{\alpha i} (S_{ис i} - S_{0ис i})} \right] \right.} \rightarrow \quad (1.54)$$

$$\left. \dots \rightarrow \left(\frac{B_i + M \pi R_i \lambda_{\text{эКВ}} \delta_{\text{П}} m \frac{K_1(mR_i)}{K_0(mR_i)}}{K_0(mR_i)} \right) \right\},$$

где B и M – условные величины, введённые для упрощения формы записи: при одностороннем расположении корпусов микросхем на ПП $B = 8,5\pi R^2$ Вт/К, $M = 2$; при двустороннем расположении корпусов $B = 0$, $M = 1$; k – эмпирический коэффициент: для корпусов микросхем, центр которых отстоит от торцов ПП на расстоянии менее $3R$, $k = 1,14$; для корпусов микросхем, центр которых отстоит от торцов ПП на расстоянии более $3R$, $k = 1$, k_{α} – коэффициент теплоотдачи от корпусов микросхем

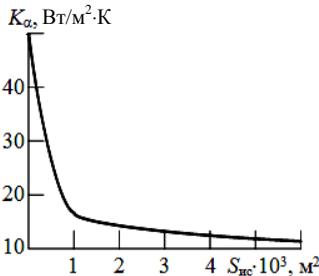


Рис. 1.9. Зависимость коэффициента теплоотдачи K_{α} от площади поверхности корпуса микросхемы

определяется по графику рис. 1.9; K_1 и K_0 – модифицированные функции Бесселя; N – число i -х корпусов микросхем, расположенных вокруг корпуса рассчитываемой микросхемы на расстоянии не более $10/m$, т.е. $r_i \leq 10/m$; Δt_B – среднеобъёмный перегрев воздуха в блоке; Q – мощность, рассеиваемая i -й микросхемой; $S_{ис i}$ – суммарная площадь поверхности i -й микросхемы; δ_{3i} – зазор между микросхемой и ПП; λ_{3i} – коэффициент теплопроводности материала, заполняющего этот зазор.

5. Определение температуры поверхности корпуса микросхемы

$$t_{\text{ис}} = t_0 + \Delta t_{\text{ис}}, \quad (1.55)$$

Дискретный ЭРЭ можно считать аналогично микросхеме локальным источником теплоты на пластине, и методика определения температуры поверхности его корпуса будет аналогична. Необходимо лишь ввести соответствующие значения геометрических параметров в (1.51) – (1.54).

Пример расчёта теплонагруженных элементов функционального узла

Расчёт теплонагруженных элементов проводится по следующей методике.

1. При расчёте теплового режима блоков РЭС используют приближённые методы анализа и расчёта. Целью расчёта является определение температур нагретой зоны и среды вблизи поверхности ЭРЭ, необходимых для оценки надёжности.

Для определения температуры корпуса ЭРЭ расчёт проводится в следующей последовательности:

1.1. Определяется эквивалентный коэффициент теплопроводности модуля при отсутствии теплопроводных шин:

$$\lambda_{\text{эkv}} = \lambda_{\text{п}},$$

где $\lambda_{\text{п}} \approx 0,25$ – теплопроводность материала основания платы (стеклотекстолит), Вт/(м·К).

1.2. Определяется эквивалентный радиус корпуса ЭРЭ:

$$R = \sqrt{\frac{S_{0\text{ис}}}{\pi}},$$

где $S_{0\text{ис}}$ – площадь основания ЭРЭ.

В качестве примера рассмотрим расчёт R для следующих элементов функционального узла:

$$- \text{ОР2177} \quad R = \sqrt{\frac{112}{\pi}} \approx 40,4 \text{ мм} = 40,4 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$- \text{ОР4177} \quad R = \sqrt{\frac{314}{\pi}} \approx 10 \text{ мм} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

- 564ИЕ10, 564КП1, 564КП2, 564ПУ4

$$R = \sqrt{\frac{108}{\pi}} \approx 5,9 \text{ мм} = 5,9 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

- 564КТ3, 564ЛА7, 564ЛА8, 564ЛН2, 564ЛП2, 564ЛП13, 564ТМ2,
1НТ251 $R = \sqrt{\frac{82,5}{\pi}} \approx 5,1 \text{ мм} = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
- 1478ФН1У $R = \sqrt{\frac{38,5}{\pi}} \approx 3,5 \text{ мм} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
- 3ОТ110Б $R = \sqrt{\frac{254,5}{\pi}} \approx 9 \text{ мм} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
- P1-12-0,125 $R = \sqrt{\frac{14}{\pi}} \approx 2,1 \text{ мм} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
- P1-12-0,5 $R = \sqrt{\frac{40}{\pi}} \approx 3,6 \text{ мм} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
- SM4001 $R = \sqrt{\frac{18,8}{\pi}} \approx 2,4 \text{ мм} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
- 2ДС523ВР $R = \sqrt{\frac{25}{\pi}} \approx 2,8 \text{ мм} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$

1.3. Рассчитывается коэффициент распространения теплового потока:

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\delta_{\text{п}} \lambda_{\text{ЭКВ}}}},$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплообмена с 1-й и 2-й сторон ПП;
 $\delta_{\text{п}} = 2 \text{ мм}$ – толщина ПП функционального узла.

Для естественного теплообмена $\alpha_1 + \alpha_2 = 17 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

$$m = \sqrt{\frac{17}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25}} = 184,4 \text{ м}^{-1}.$$

1.4. Определяется искомый перегрев поверхности корпуса ЭРЭ:

$$\Delta t_{\text{ис}} = \Delta t_{\text{в}} + k \left[\frac{Q}{k_{\alpha}(S_{\text{ис}} - S_{0\text{ис}}) + \frac{1}{\frac{\delta_3}{\lambda_3 \pi R^2} + \frac{1}{B + M \pi R \lambda_{\text{ЭКВ}} \delta_{\text{п}} m \frac{K_1(mR)}{K_0(mR)}}}} \right] +$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{i=1}^N \frac{Q_i \frac{K_0(mr_i)}{K_0(mR_i)}}{k_{\alpha i} (S_{\text{ис}i} - S_{0\text{ис}i})} \left\{ 1 + \left[\frac{\delta_{zi}}{\lambda_{zi} \pi R_i^2} + \frac{1}{k_{\alpha i} (S_{\text{ис}i} - S_{0\text{ис}i})} \right] \right. \\
& \left. \dots \rightarrow \frac{\left(B_i + M \pi R_i \lambda_{\text{эКВ}} \delta_{\text{п}} m \frac{K_1(mR_i)}{K_0(mR_i)} \right)}{\right\},
\end{aligned}$$

где $\Delta t_{\text{в}}$ – среднеобъёмный перегрев воздуха в блоке, °С, принимаем $\Delta t_{\text{в}} = 0$; B и M – условные величины, введённые для упрощения формы записи (при двустороннем расположении корпусов ЭРЭ: $B = 0$, $M = 1$); k – эмпирический коэффициент для корпусов ЭРЭ:

– центр которых отстоит от торцов ПП на расстоянии менее $3R$ $k = 1,14$;

– центр которых отстоит от торцов ПП на расстоянии более $3R$ $k = 1$ (ОР4177 $k = 1,14$; остальные ЭРЭ имеют $k = 1$);

$r_i \leq 10/m$ – расстояние до ближайшего ЭРЭ; k_{α} – коэффициент теплоотдачи от корпусов ЭРЭ, который определяется по графику, приведённому на рис. 1.9.

Для элементов в рассмотренном примере k_{α} будет равно следующей величине:

- ОР4177 $k_{\alpha} \approx 30 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- ОР2177 $k_{\alpha} \approx 50 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- 564ИЕ10, 564КП1, 564КП2, 564ПУ4 $k_{\alpha} \approx 50 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- 564КТ3, 564ЛА7, 564ЛА8, 564ЛН2, 564ЛП2, 564ЛП13, 564ТМ2, 1НТ251 $k_{\alpha} \approx 50 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- 1478ФН1У $k_{\alpha} \approx 50 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- 3ОТ110Б $k_{\alpha} \approx 50 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- Р1-12-0,125 $k_{\alpha} \approx 50 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- Р1-12-0,5 $k_{\alpha} \approx 50 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- SM4001 $k_{\alpha} \approx 50 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- 2ДС523ВР $k_{\alpha} \approx 50 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

K_1 и K_0 – модифицированные функции Бесселя, их значения определяются по графику (рис. 1.10).

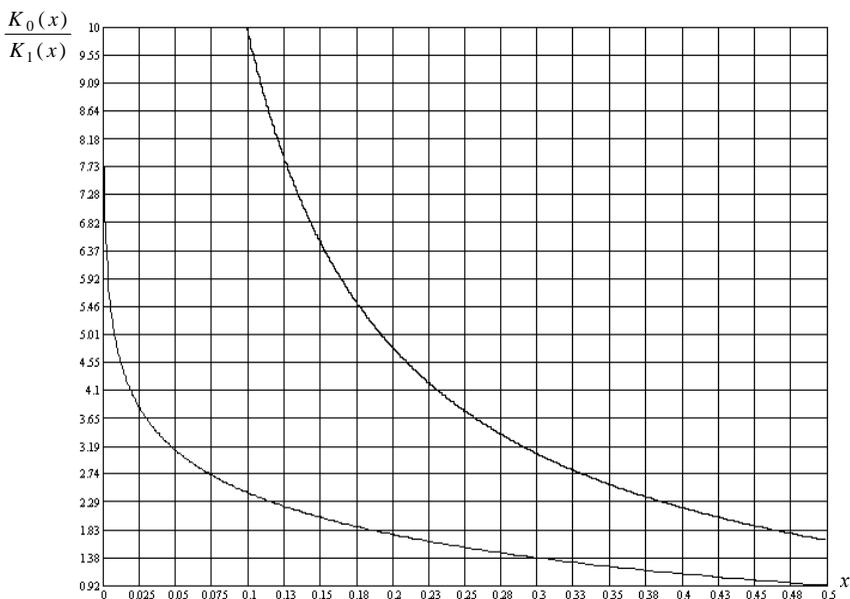


Рис. 1.10. Модифицированные функции Бесселя первого и второго рода:
 x – минимальное расстояние до ближайшего ЭРЭ

- ОР4177 $K_1/K_0 \approx 1$;
- ОР2177 $K_1/K_0 \approx 1$;
- 564ИЕ10, 564КП1, 564КП2, 564ПУ4 $K_1/K_0 \approx 2$;
- 564КТ3, 564ЛА7, 564ЛА8, 564ЛН2, 564ЛП2, 564ЛП13, 564ТМ2,
 1НТ251 $K_1/K_0 \approx 2$;
- 1478ФН1У $K_1/K_0 \approx 2$;
- 3ОТ110Б $K_1/K_0 \approx 2$;
- Р1-12-0,125 $K_1/K_0 \approx 2$;
- Р1-12-0,5 $K_1/K_0 \approx 2$;
- SM4001 $K_1/K_0 \approx 2$;
- 2ДС523ВР $K_1/K_0 \approx 2$.

N – число i -х корпусов ЭРЭ, расположенных вокруг корпуса рассматриваемого ЭРЭ:

- ОР4177 $N = 5$;
- ОР2177 $N = 3$;
- 564ИЕ10, 564КП1, 564КП2, 564ПУ4 $N = 4$;

- 564КТ3, 564ЛА7, 564ЛА8, 564ЛН2, 564ЛП2, 564ЛП13, 564ТМ2,
1НТ251 $N = 4$;
- 1478ФН1У $N = 3$;
- 3ОТ110Б $N = 1$;
- Р1-12-0,125 $N = 4$;
- Р1-12-0,5 $N = 2$;
- SM4001 $N = 2$;
- 2ДС523ВР $N = 2$.

$Q_{ис}$ – мощность, рассеиваемая используемой интегральной схемой (ИС):

- ОР4177 $Q_{ис} = 0,12$ Вт;
- ОР2177 $Q_{ис} = 0,12$ Вт;
- 564ИЕ10, 564КП1, 564КП2, 564ПУ4 $Q_{ис} = 0,12$ Вт;
- 564КТ3, 564ЛА7, 564ЛА8, 564ЛН2, 564ЛП2, 564ЛП13, 564ТМ2,
1НТ251 $Q_{ис} = 0,15$ Вт;
- 1478ФН1У $Q_{ис} = 0,12$ Вт;
- 3ОТ110Б $Q_{ис} = 0,12$ Вт;
- Р1-12-0,125 $Q_{ис} = 0,125$ Вт;
- Р1-12-0,5 $Q_{ис} = 0,5$ Вт;
- SM4001 $Q_{ис} = 0,15$ Вт;
- 2ДС523ВР $Q_{ис} = 0,15$ Вт.

$S_{исi}$ – суммарная поверхностная площадь используемых ИС:

- ОР4177 $S_{ис} = 112 \text{ мм}^2 = 112 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;
- ОР2177 $S_{ис} = 314 \text{ мм}^2 = 314 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;
- 564ИЕ10, 564КП1, 564КП2, 564ПУ4 $S_{ис} = 756 \text{ мм}^2 = 756 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;
- 564КТ3, 564ЛА7, 564ЛА8, 564ЛН2, 564ЛП2, 564ЛП13, 564ТМ2,
1НТ251 $S_{ис} = 825 \text{ мм}^2 = 825 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;
- 1478ФН1У $S_{ис} = 154 \text{ мм}^2 = 154 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;
- 3ОТ110Б $S_{ис} = 1272,5 \text{ мм}^2 = 1272,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;
- Р1-12-0,125 $S_{ис} = 742 \text{ мм}^2 = 742 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;
- Р1-12-0,5 $S_{ис} = 40 \text{ мм}^2 = 40 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;
- SM4001 $S_{ис} = 56,4 \text{ мм}^2 = 56,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;
- 2ДС523ВР $S_{ис} = 50 \text{ мм}^2 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

δ_{zi} – зазор между ПП и ЭРЭ:

$$\delta_{zi} = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ мм};$$

$\lambda_{zi} \approx 0,25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ – коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор между ПП и ЭРЭ (воздух).

- OP4177:

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{inc2} = & 1,14 \left[\frac{0,12}{30(112 - 112) \cdot 10^{-6} + \frac{1}{10^{-3}}} + \frac{1}{0,025\pi(40,4 \cdot 10^{-3})^2 + \frac{\pi(40,4 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 1}{1}} \right] + \\
 & + \frac{4 \cdot 0,125 \frac{0,8}{35}}{\left[50(742 - 14) \cdot 10^{-6} \right] \left[1 + \left[\frac{10^{-3}}{0,025\pi(2,1 \cdot 10^{-3})^2 + \frac{1}{50(742 - 14) \cdot 10^{-6}}} \right] \pi \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2 \right]} + \\
 & + \frac{0,11 \frac{0,8}{1,35}}{\left[50(676 - 33,8) \cdot 10^{-6} \right] \left[1 + \left[\frac{10^{-3}}{0,025\pi(3,3 \cdot 10^{-3})^2 + \frac{1}{50(676 - 33,8) \cdot 10^{-6}}} \right] \times \right]} \rightarrow \\
 & \rightarrow \frac{0,11 \frac{0,8}{1,35}}{\times \pi \cdot 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2} = 14,064 \text{ } ^\circ\text{C}.
 \end{aligned}$$

- OP2177:

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{\text{inc3}} &= 1 \left[\frac{0,12}{50(628 - 314) \cdot 10^{-6} + \frac{1}{10^{-3}}} + \frac{1}{0,025\pi(10 \cdot 10^{-3})^2 + \pi(10 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 1} \right] + \\
 &+ \frac{3 \cdot 0,125 \frac{0,8}{35}}{\left[50(742 - 14) \cdot 10^{-6} \right] \left[1 + \frac{1}{\left[0,025\pi(2,1 \cdot 10^{-3})^2 + \frac{1}{50(742 - 14) \cdot 10^{-6}} \right]} \right]} \times \\
 &\rightarrow \frac{3 \cdot 0,125 \frac{0,8}{35}}{\pi \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2} = 17,253 \text{ } ^\circ\text{C}.
 \end{aligned}$$

– 564ИЕ10, 564КПШ, 564КП2, 564ПУ4:

$$\begin{aligned}
 \Delta t_{\text{ис4}} = & 1 \left[\frac{0,12}{50(756-108) \cdot 10^{-6} + \frac{1}{10^{-3}}} + \frac{1}{0,025\pi(5,9 \cdot 10^{-3})^2 + \frac{1}{\pi(5,9 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2}} \right] + \\
 & \frac{3 \cdot 0,125 \frac{0,8}{3,5}}{[50(742-14) \cdot 10^{-6}] \left[1 + \frac{10^{-3}}{0,025\pi(2,1 \cdot 10^{-3})^2 + 50(742-14) \cdot 10^{-6}} \right] + \frac{1}{\pi \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2}} \right] + \\
 & \frac{0,12 \frac{0,8}{0,08}}{[50(825-82,5) \cdot 10^{-6}] \left[1 + \frac{10^{-3}}{0,025\pi(10,4 \cdot 10^{-3})^2 + 50(825-82,5) \cdot 10^{-6}} \right] \times} \rightarrow \\
 & \frac{0,12 \frac{0,8}{0,08}}{\times \pi \cdot 10,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2} = 21,327 \text{ } ^\circ\text{C}.
 \end{aligned}$$

- 564КТ3, 564ЛА7, 564ЛА8, 564ЛН2, 564ЛП2, 564ЛП13, 564ГМ2, 1НТ251:

$$\begin{aligned}
 \Delta t_{\text{нс5}} = & \left[\frac{0,15}{50(756-108) \cdot 10^{-6} + \frac{1}{10^{-3}}} + \frac{1}{0,025\pi(5,1 \cdot 10^{-3})^2 + \frac{1}{\pi(5,1 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2}} \right] + \\
 & \frac{3 \cdot 0,125 \frac{0,8}{3,5}}{\left[50(742-14) \cdot 10^{-6} \right] \left[1 + \frac{10^{-3}}{0,025\pi(2,1 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{1}{50(742-14) \cdot 10^{-6}} \right] \left[\pi \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2 \right]} + \\
 & \frac{0,12 \frac{0,8}{0,08}}{\left[50(825-82,5) \cdot 10^{-6} \right] \left[1 + \frac{10^{-3}}{0,025\pi(10,4 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{1}{50(825-82,5) \cdot 10^{-6}} \right] \times} \\
 & \left. \frac{0,12 \frac{0,8}{0,08}}{\left[50(825-82,5) \cdot 10^{-6} \right] \left[1 + \frac{10^{-3}}{0,025\pi(10,4 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{1}{50(825-82,5) \cdot 10^{-6}} \right] \times} \right] = 22,252 \text{ } ^\circ\text{C}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta t_{\text{нс6}} = & 1 \left[\frac{0,12}{50(154 - 38,5) \cdot 10^{-6} + \frac{1}{10^{-3}}} + \frac{1}{0,025\pi(3,5 \cdot 10^{-3})^2 + \pi(3,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2} \right] + \\
 & + \frac{3 \cdot 0,125 \frac{0,8}{3,5}}{\left[50(742 - 14) \cdot 10^{-6} \right] \left[1 + \frac{10^{-3}}{0,025\pi(2,1 \cdot 10^{-3})^2 + 50(742 - 14) \cdot 10^{-6}} \right] \left[\pi \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2 \right]} \\
 = & 19,188 \text{ } ^\circ\text{C}.
 \end{aligned}$$

- ЗОТ110Б:

$$\Delta t_{\text{nc7}} = 1 \left[\frac{0,12}{50(1272,5 - 254,5) \cdot 10^{-6} + \frac{1}{10^{-3}}} + \frac{1}{0,025\pi(9 \cdot 10^{-3})^2 + \frac{1}{\pi(9 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2}} \right] +$$

$$+ \frac{0,12 \frac{0,8}{0,08}}{\left[50(825 - 82,5) \cdot 10^{-6} \right] \left[1 + \frac{10^{-3}}{0,025\pi(10,4 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{1}{50(825 - 82,5) \cdot 10^{-6}} \right] \left[\pi \cdot 10,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2 \right]}$$

= 19,503 °C.

- P1-12-0,125:

$$\begin{aligned}
 \Delta t_{\text{inc9}} = & 1 \left[\frac{0,125}{50(1028-14) \cdot 10^{-6} + \frac{1}{10^{-3} \left(0,025\pi(2,1 \cdot 10^{-3})^2 + \frac{1}{\pi(2,1 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2} \right)}} \right] + \\
 & + \frac{0,11 \frac{0,8}{1,3}}{\left[50(676-33,8) \cdot 10^{-6} \right] \left[1 + \frac{10^{-3}}{0,025\pi(3,3 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{1}{50(676-33,8) \cdot 10^{-6}} \right] \left[\pi \cdot 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2 \right]} + \\
 & + \frac{3 \cdot 0,125 \frac{0,8}{3,5}}{\left[50(742-14) \cdot 10^{-6} \right] \left[1 + \frac{10^{-3}}{0,025\pi(2,1 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{1}{50(742-14) \cdot 10^{-6}} \right] \times} \rightarrow \\
 & \rightarrow \frac{3 \cdot 0,125 \frac{0,8}{3,5}}{\times \pi \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2} = 13,61 \text{ } ^\circ\text{C}.
 \end{aligned}$$

- P1-12-0,5:

$$\Delta_{\text{mic10}} = 1 \left[\frac{0,5}{50(251-40) \cdot 10^{-6} + \frac{1}{10^{-3} \left(0,025\pi(3,6 \cdot 10^{-3})^2 + \frac{1}{\pi(3,6 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2} \right)}} \right] +$$

$$+ \frac{2 \cdot 0,12 \frac{0,8}{0,08}}{\left[50(1272,5 - 254,5) \cdot 10^{-6} \right] \left[1 + \frac{10^{-3}}{0,025\pi(9 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{1}{50(1272,5 - 254,5) \cdot 10^{-6}} \right] \left[\pi \cdot 9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2 \right]}$$

= 34,508 °C.

- SM4001:

$$\begin{aligned}
 \Delta_{\text{тс11}} = & 1 \left[\frac{0,15}{50(112,8 - 18,8) \cdot 10^{-6} + \frac{1}{10^{-3}}} + \frac{1}{\frac{0,025\pi(2,8 \cdot 10^{-3})^2}{0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2}} \right] + \\
 & + \frac{2 \cdot 0,125 \frac{0,8}{3,5}}{\left[50(742 - 14) \cdot 10^{-6} \right] \left[1 + \frac{1}{\frac{10^{-3}}{0,025\pi(2,1 \cdot 10^{-3})^2} + 50(742 - 14) \cdot 10^{-6}} \right] \left[\pi \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2 \right]} \\
 = & 29,492 \text{ } ^\circ\text{C}.
 \end{aligned}$$

- 2JC523BP:

$$\Delta f_{\text{rel}12} = 1 \left[\frac{0,15}{50(100 - 25) \cdot 10^{-6} + \frac{10^{-3}}{0,025\pi(2,8 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{1}{\pi(2,8 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2}} \right] +$$

$$+ \frac{2 \cdot 0,12 \frac{0,8}{0,08}}{\left[50(1625 - 82,5) \cdot 10^{-6} \right] \left[1 + \frac{10^{-3}}{0,025\pi(10,4 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{1}{50(82,5 - 82,5) \cdot 10^{-6}} \right] \left[\pi \cdot 10,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 184,4 \cdot 2 \right]}$$

$$= 35,746 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

1.5. Определяется температура поверхности корпусов ЭРЭ, приведённых в вышерассмотренном примере:

$$t_{ис} = t_0 + \Delta t_{ис},$$

- ОР4177 $t_{ис} = 20 + 14 = 34 \text{ }^\circ\text{C}$;
- ОР2177 $t_{ис} = 20 + 17 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 564ИЕ10, 564КП1, 564КП2, 564ПУ4 $t_{ис} = 20 + 21 = 41 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 564КТ3, 564ЛА7, 564ЛА8, 564ЛН2, 564ЛП2, 564ЛП13, 564ТМ2, ИТ251 $t_{ис} = 20 + 22 = 42 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 1478ФН1У $t_{ис} = 20 + 19 = 39 \text{ }^\circ\text{C}$;
- ЗОТ110Б $t_{ис} = 20 + 20 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Р1-12-0,125 $t_{ис} = 20 + 14 = 34 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Р1-12-0,5 $t_{ис} = 20 + 35 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$;
- SM4001 $t_{ис} = 20 + 30 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 2ДС523ВР $t_{ис} = 20 + 36 = 56 \text{ }^\circ\text{C}$.

В результате проведённых расчётов можно сделать вывод о том, что температурный режим всех ЭРЭ функционального узла соответствует указанной группе эксплуатации и не требует дополнительного охлаждения.

1.6. 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 $0,1 \dots 1,0$ град/Вт).

Последовательность расчёта

1. Определяется перегрев места крепления прибора с радиатором

$$\Delta t = (t_{п. \max} - t_c) - P_{рас} (R_{вн} + R_{кт}), \quad (1.56)$$

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

2. Тепловое сопротивление теплосток – среда определяется по формуле

$$R_{тс} = \frac{(t_{п. \max}) - t_c - P_{рас} (R_{вн} + R_{кт})}{q P_{рас}}, \quad (1.57)$$

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

3. Среднеповерхностная температура перегрева радиатора (рис. 1.7)

$$\Delta t_p = P_{\text{рас}} R_{\text{тс}} \quad (1.58)$$

4. По значению Δt_p (рис. 1.11) находят минимальную высоту радиатора L_{min} .

5. Задаются габаритами радиатора: l – ширина радиатора; b – расстояние между рёбрами; h – высота ребра; d – толщина основания. Рекомендуется придерживаться следующих соотношений, при основании радиатора: 90×90 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 рёбрами

$$b = \frac{L_{\text{min}} - \delta n}{n - 1}, \quad (1.59)$$

где n и δ – число и толщина ребра.

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

Толщина и высота ребра выбираются из условия

$$\frac{\delta}{h^2} > \frac{\alpha}{\lambda}, \quad (1.60)$$

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

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

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

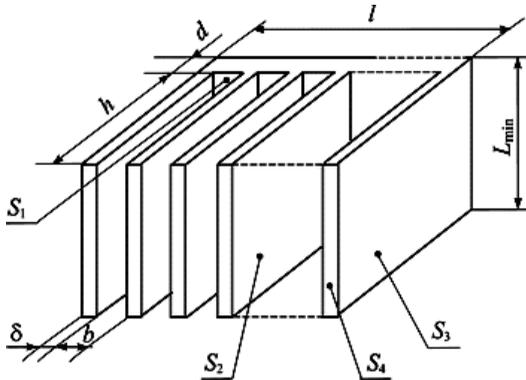


Рис. 1.11. Односторонний ребристый радиатор

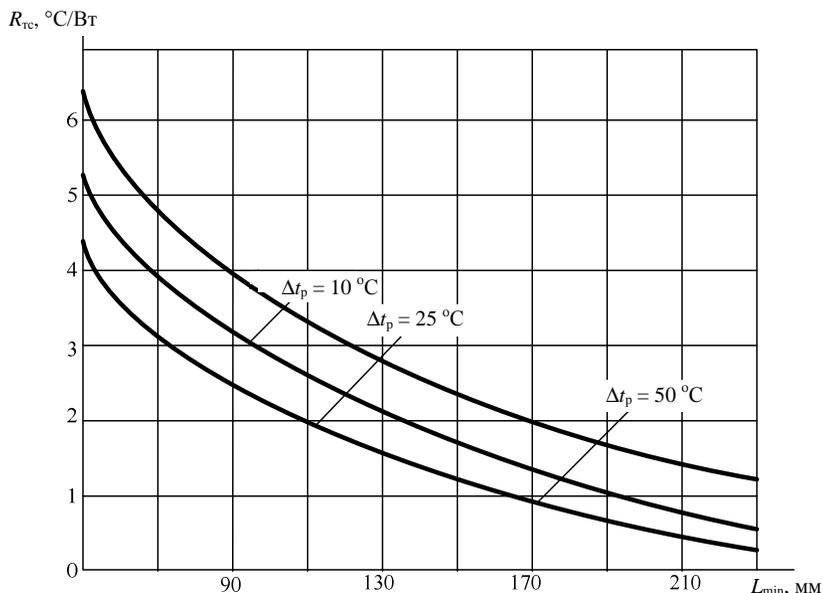


Рис. 1.12. Изменение сопротивления R_{tc} от размера ребра радиатора и Δt_p при 50 $^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 0,9$; $\delta = 0,2$ см; $h = 30$ мм

1.8. Материалы для радиаторов

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

1.9. Степень черноты поверхностей некоторых материалов

Материал	Степень черноты
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 Bi [4]:

$$Bi = 0,5\alpha\delta/\lambda, \quad (1.61)$$

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

8. Всю 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

$$S_{\text{ореб}} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = (n - 1)(bL_{\min}) + 2hl(n - 1) + 2(h + d)L_{\min} + n[2h\delta + \delta L_{\min}]. \quad (1.62)$$

9. Полные коэффициенты теплоотдачи оребрённой и неоребрённой поверхностей

$$\alpha_{\text{гл}} = \alpha_{\text{л.гл}} + \alpha_{\text{к.гл}}, \quad \alpha_{\text{ореб}} = \alpha_{\text{л.ореб}} + \alpha_{\text{к.ореб}}, \quad \alpha_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{п}} \Phi_{ij} f(t_{\text{т}}, t_{\text{с}}). \quad (1.63)$$

Для поверхностей S_1 и S_2 коэффициенты взаимной облучённости определяются из графика (рис. 1.13) или рассчитываются

$$f(t_{\text{м}}, t_{\text{с}}) = 5,67 \left[(t_{\text{м}} + 273)^4 - (t_{\text{с}} + 273)^4 \right] 10^{-8} (t_{\text{м}} - t_{\text{с}})^{-1}. \quad (1.64)$$

Конвективный коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{см}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$,

$$\alpha_{\text{к}} = 5,62A(t_{\text{м}}) B; \quad (1.65)$$

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

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

Величина $A(t_{\text{м}})$ учитывает свойства среды и находится по графику рис. 1.10.

Влияние атмосферного давления на величину $A(t_{\text{м}})$ находят из графика рис. 1.14.

10. Мощность, рассеиваемая гладкой поверхностью радиатора, Вт ,

$$P_{\text{гл}} = \alpha_{\text{гл}} S_{\text{гл}} (t_{\text{т}} - t_{\text{с}}). \quad (1.66)$$

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

$$R_{\text{тс}}^{\text{II}} = \frac{1}{\alpha_{\text{гл}} S_{\text{гл}}}. \quad (1.67)$$

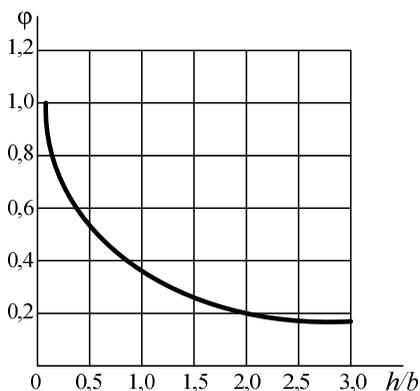


Рис. 1.13. Коэффициент взаимной облучённости

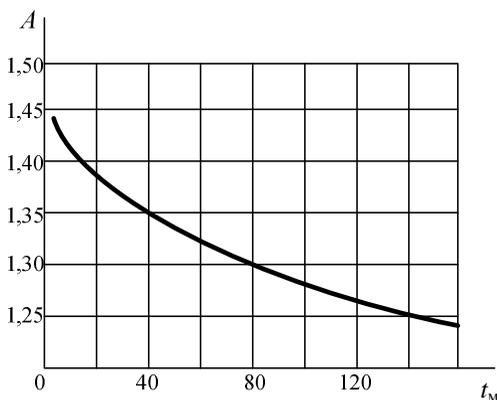


Рис. 1.14. Зависимость $A = f(t_m)$

12. Мощность, рассеиваемая оребрённой поверхностью,

$$P_0 = \sum P_i = \sum S_i [\alpha_{ik}(t_{it} - t_{ic}) + \alpha_{in}(t_{it} - t_c)], \quad (1.68)$$

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 ; вблизи поверхностей S_1 и S_2 (между рёбрами) равна

$$t_{ic} = t_r - (t_r - t_c) H, \quad (1.69)$$

где H – относительный температурный напор; t_r – среднеповерхностная температура теплотока.

Если рёбра располагаются вертикально, то

$$H = f(\eta), \quad (1.70)$$

где $\eta = A_4(t_M) bC$, $t_M = 0,5(t_T + t_c)$, $C = (t_T - t_c)^{1/4}/(L)^{1/4}$ (рис. 1.15 – 1.17); $t_{ci} = t_c$ 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,

$$R_{тс}^I = \frac{t_T - t_c}{P_{ор\epsilon б}}. \quad (1.71)$$

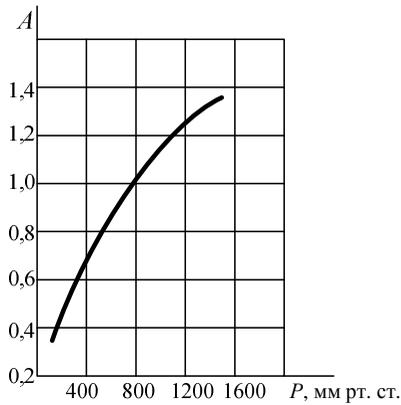


Рис. 1.15. Зависимость A от атмосферного давления

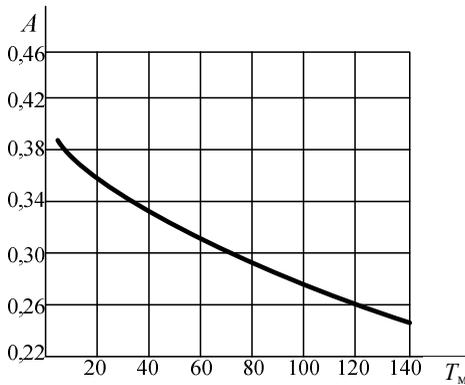


Рис. 1.16. Зависимость $A = f(t_M)$

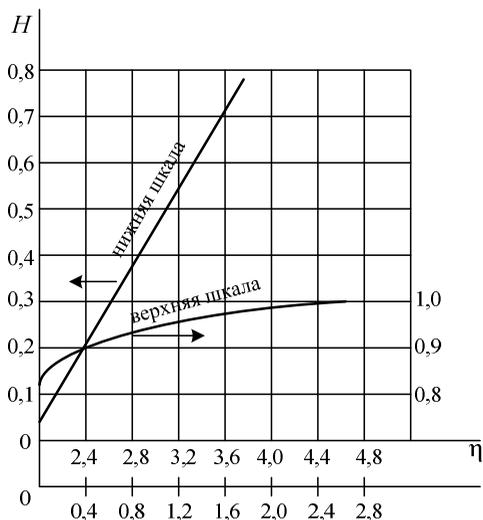


Рис. 1.17. Зависимость $H = f(\eta)$

Общее тепловое сопротивление равно

$$R_{\text{тс}}^{\text{расч}} = \frac{R_{\text{тс}}^{\text{I}} R_{\text{тс}}^{\text{II}}}{R_{\text{тс}}^{\text{I}} + R_{\text{тс}}^{\text{II}}}. \quad (1.72)$$

Мощность, рассеиваемая радиатором, Вт,

$$P_{\text{общ. расч}} = P_{\text{гл}} + P_{\text{орб}}. \quad (1.73)$$

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

Радиатор с двухсторонним оребрением

Расчёт двустороннего оребренного радиатора производится по тем же формулам, что и расчёт односторонне оребренного радиатора. При этом неоребренную 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 оребренной поверхности.

Радиатор типа пластины

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

2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ РЭС ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

2.1. ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РЭС

Все виды РЭА подвергаются воздействию внешних механических нагрузок, которые передаются к каждой детали, входящей в конструкцию. Механические воздействия имеют место в работающей РЭА, если она установлена на подвижном объекте, или только при транспортировке её в нерабочем состоянии, как в случае стационарной и некоторых видов во-зимой РЭА.

На транспортируемую РЭС в процессе её эксплуатации воздействуют вибрации, ударные нагрузки и линейные ускорения.

Гармонические вибрации характеризуются частотой, амплитудой, ускорением.

Ударные нагрузки характеризуются числом одиночных ударов или их серией (обычно оговаривают максимальное число ударов), длительностью ударного импульса и его формой, мгновенной скоростью при ударе, перемещением соударяющихся тел.

Линейные ускорения характеризуются ускорением, длительностью, знаком воздействия ускорения.

Возникающие при вибрациях, ударах и ускорениях перегрузки оценивают соответствующими *коэффициентами*.

Для уменьшения воздействия вибраций и ударов микроэлектронную вычислительную аппаратуру устанавливают на *амортизаторы* или применяют *демпфирующие материалы*.

Воздействие линейных ускорений эквивалентно увеличению массы аппаратуры и при значительной длительности воздействия требует увеличения прочности конструкции.

Амортизаторы от линейных перегрузок практически не защищают.

Как показывает опыт эксплуатации транспортируемых РЭС, наибольшее разрушающее воздействие на конструкцию оказывают вибрации. Как правило, конструкция аппарата, выдержавшая воздействие вибрационных нагрузок в определённом частотном диапазоне, выдерживает ударные нагрузки и линейные ускорения с значительно большими значениями соответствующих параметров.

Понятие виброустойчивости и вибропрочности. В отношении конструкции ЭВА различают два понятия: вибрационная устойчивость и вибрационная прочность.

Вибрационная устойчивость – свойство объекта при заданной вибрации выполнять заданные функции и сохранять значения своих параметров в пределах нормы.

Вибрационная прочность – прочность при заданной вибрации и после прекращения её. Воздействие транспортной тряски складывается из ударов и вибраций.

Введение амортизаторов между РЭС и объектом в качестве среды, уменьшающей амплитуду передаваемых колебаний и ударов, снижает действующие на РЭС механические силы, но не уничтожают их полностью.

В некоторых случаях образованная с введением амортизаторов резонансная система влечёт за собой возникновение низкочастотного механического резонанса, который приводит к увеличению амплитуды колебаний РЭС.

Понятие жёсткости и механической прочности конструкции. При разработке конструкции РЭС необходимо обеспечить требуемую жёсткость и механическую прочность её элементов.

Жёсткость конструкции есть отношение действующей силы к деформации конструкции, вызванной этой силой.

Под прочностью конструкции понимают нагрузку, которую может выдержать конструкция без остаточной деформации или разрушения. Повышение прочности конструкции РЭС связано с усилением её конструктивной основы, применением ребер жёсткости, контровки болтовых соединений и т.д. Особое значение имеет повышение прочности несущих конструкций и входящих в них узлов методами заливки и обволакивания. Заливка пеноматериалом позволяет сделать узел монолитным при незначительном увеличении массы.

Во всех случаях нельзя допускать образования механической колебательной системы. Это касается крепления монтажных проводов, микросхем, экранов и других частей, входящих в РЭС.

Амортизация конструкции РЭС. Один из эффективных методов повышения устойчивости конструкции микроэлектронной вычислительной аппаратуры, как транспортируемой, так и стационарной, к воздействию вибраций, а также ударных и линейных нагрузок – использование амортизаторов. Действие амортизаторов основано на *демпфировании* резонансных частот, т.е. поглощении части колебательной энергии. Аппаратура, установленная на амортизаторах, в общем случае может быть представлена в виде механической колебательной системы с *шестью степенями свободы*: совокупностью связанных колебаний, состоящих из линейных перемещений, и вращательных колебаний по каждой из трёх координатных осей.

Эффективность амортизации характеризуется *коэффициентом динамичности* или *передачи*, числовое значение которого зависит от отношения частоты действующих вибраций f к частоте амортизированной системы f_0 [3, 4].

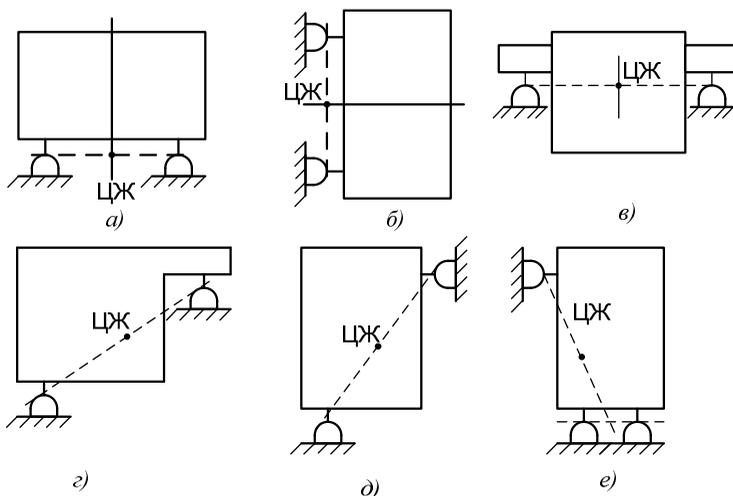


Рис. 2.1. Основные схемы расположения амортизаторов

При разработке схемы амортизации необходимо стремиться к тому, чтобы система имела минимальное число собственных частот и чтобы они были в 2–3 раза ниже наименьшей частоты возмущающей силы.

Для амортизированной аппаратуры следует как можно больше уменьшать собственную частоту, а для неамортизированной, напротив, увеличивать, приближая её к верхней границе возмущающих воздействий или превышая её.

Схемы размещения амортизаторов. Конструирование системы амортизации РЭА обычно начинается с выбора типа амортизаторов и схемы их размещения. Выбор амортизаторов производят исходя из допустимой нагрузки и предельных значений параметров, характеризующих условия эксплуатации. К таким параметрам относятся: температура окружающей среды, влажность, механические нагрузки, присутствие в атмосфере паров масла, дизельного топлива и т.д.

Выбор схемы расположения амортизаторов зависит главным образом от расположения аппаратуры на носителе и условий динамического воздействия. Основные схемы расположения амортизаторов на блоке представлены на рис. 2.1. Вариант *а*) довольно часто используется для амортизации сравнительно небольших по габаритам блоков. Такое расположение амортизаторов удобно с позиций общей компоновки блоков на объекте. Блоки можно расположить в непосредственной близости друг от друга. Однако при этом расположении амортизаторов принципиально невозможно получить совпадение центра тяжести (ЦТ) с центром масс (ЦМ) и, следовательно, никогда не получить рациональной системы.

То же можно сказать про вариант размещения б). Вариант размещения в) позволяет получить рациональную систему, однако такое расположение амортизаторов не всегда удобно при размещении на объекте. Кроме того, при таком размещении амортизаторов нерационально используется объём, отводимый для РЭА на объекте. Размещение типа г) и д) является разновидностью варианта в) и используется, в том случае, если лицевая панель блока размещается вблизи амортизатора, расположенного снизу. Размещение амортизаторов, представленное на рис. 2, е, используется в стоечной аппаратуре, когда высота РЭА значительно больше глубины и ширины стойки. Чтобы ослабить колебания стойки вокруг осей x и y , ставят дополнительно два амортизатора сверху стойки.

2.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ, ВЛИЯНИЕ ИХ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ РЭС

2.1.1. Механические и акустические воздействия

В процессе эксплуатации и транспортировки РЭС подвергаются механическим и акустическим воздействиям. Виды и параметры механических и акустических воздействий приведены в табл. 2.1.

Способность РЭС противодействовать вибрации характеризуется вибропрочностью и виброустойчивостью.

Виброустойчивость – способность РЭС выполнять заданные функции во включенном состоянии в условиях воздействия вибрации.

2.1. Механические и акустические воздействия

Воздействия	Параметры
Линейное ускорение (изменение вектора скорости объекта)	Ускорение (a , m/c^2 или g), длительность ($t_{\text{дл}}$, с), знак воздействия ускорения (\pm)
Удар (быстрое изменение ускорения объекта, на котором установлена РЭС)	Длительность удара ($t_{\text{и}}$, мс) и его форма, мгновенная скорость при ударе (V_y , мм/с), перемещение соударяющихся тел (S , мм)
Вибрация (периодические колебания, которые возникают в РЭС при контакте с источником колебаний)	Частота (f , Гц), ускорение (a , m/c^2 или g), амплитуда (S , мм)
Акустический удар (вид механических воздействий, который характеризуется давлением звука)	Сила звука, спектр звуковых частот
Невесомость (механический фактор характеризующийся отсутствием силы притяжения Земли)	

Вибропрочность – способность РЭС противостоять разрушающему воздействию вибрации в нерабочем состоянии и продолжать нормально работать при включении после снятия вибрационных нагрузок.

Способность РЭС противодействовать ударам характеризуется удароустойчивостью и ударопрочностью.

Удароустойчивость – способность РЭС выполнять заданные функции во включенном состоянии в условиях воздействия ударов.

Ударопрочность – способность РЭС противостоять разрушающему воздействию ударов в нерабочем состоянии и продолжать нормально работать при включении после снятия ударных нагрузок.

2.1.2. Влияние механических воздействий на работоспособность РЭС

В общем случае воздействие на РЭС всех без исключения дестабилизирующих механических факторов вызывает деформацию отдельных частей конструкции РЭС, в результате чего может произойти изменение параметров РЭС или её физическое разрушение. Например, вследствие расшатывания жёстких конструкций шкафов, ослабления болтового соединения или разрыва проводников и мест пайки, появления усталости металлических контактов в реле и т.д.

Например, на наземную РЛС воздействуют дестабилизирующие механические факторы: удары, ускорения и вибрация при перевозке техники (в нерабочем состоянии), а также вибрация и акустические удары при развертывании и эксплуатации техники. Наиболее неблагоприятные условия для РЭС, размещаемых вблизи колон привода вращающихся антенн, работающих двигателей (бензиновых и дизельных агрегатов питания), мест размещения и крепления преобразователей напряжения на основе генераторов – электродвигателей.

Влияние невесомости (особенно длительной) на работоспособность РЭС сравнительно мало изучено. Выяснено что невесомость оказывает отрицательное действие в местах соприкосновения движущихся поверхностей механических деталей (при этом изменяются свойства смазывающих масел) и в местах крепления массивных блоков, установленных на земле с начальным напряжением, обусловленным их собственными массами.

2.3. ОБЪЕКТЫ-НОСИТЕЛИ И ЗАЩИТА РЭС ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

2.3.1. Объекты-носители

Характер и интенсивность воздействия механических факторов на РЭС зависят от тактики использования и от объекта установки РЭС.

Объекты-носители для установки РЭС можно разделить на три большие группы: стационарные, транспортируемые, портативные (рис. 2.2). Каждая из групп, в свою очередь, включает в себя РЭС различных классов и назначения.

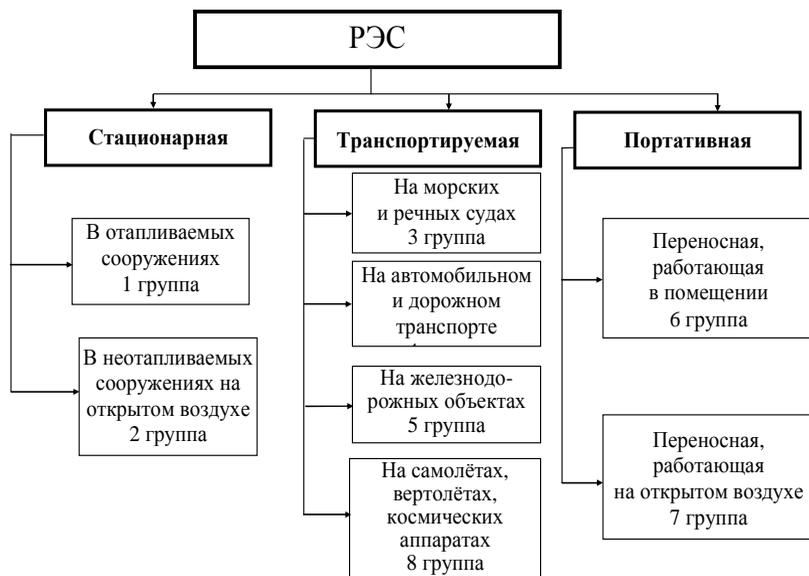


Рис. 2.2. Группы эксплуатации РЭС

Стационарные РЭС подвержены влиянию вибрации, ударов, акустических ударов, возникающих вследствие землетрясений, взрывных воздействий, стрельбы из орудий и т.д.

Транспортируемая (возимая) РЭС по сравнению со стационарными РЭС в большей степени подвержена воздействию вибрации, ударов и ускорений, которые возникают из-за наличия неуравновешенных подвижных масс, при работе двигателей, при передвижении объектов по дорогам, при посадках самолётов, стрельбе из оружия, при изменении скорости движения, при небрежности обслуживающего персонала и т.д.

Характеристики механических воздействий для различных групп РЭС приведены в табл. 2.2.

2.2. Характеристики механических воздействий РЭС

Группы РЭС	Удары		Вибрация		Линейное ускорение $t_{ли}$
	Длительность t_u , м/с	Ускорение a , м/с ²	Диапазон частот $f_{мин}, f_{max}$, Гц	Ускорение a , м/с ²	
1 группа (стационарные РЭС в отапливаемых сооружениях)	–	–	10...30	20	–

Группы РЭС	Удары		Вибрация		Линейное ускорение $t_{ли}$
	Длительность $t_{и}$, м/с	Ускорение a , м/с ²	Диапазон частот $f_{мин}, f_{макс}$, Гц	Ускорение a , м/с ²	
2 группа (стационарные РЭС на открытом воздухе)	–	–	10...30	20	–
3 группа (автомобильный и дорожный транспорт)	5...10	150	4...80	20...70	3
4 группа (морские и речные суда)	5...10	150	4...150	60...80	–
5 группа (железнодорожные объекты)	3...10	400	2...100	20	–
6 группа (переносная РЭС в помещении)	5...10	100	10...30	10	–
7 группа (переносная РЭС вне помещений)	5...10	100	10...70	40	–
8 группа (летательные аппараты)	5...15	100...900	5...2000	1...200	10...80

Уменьшить количество отказов аппаратуры вследствие воздействия вибрации и ударов возможно следующими путями:

- расчётом при конструировании собственных частот конструкций и подбор материалов с тем, чтобы не допустить явления механического резонанса;
- введением в конструкцию РЭС дополнительных амортизаторов;
- обеспечением механической жёсткости и прочности конструкций РЭС.

2.3.2. Расчёты механических нагрузок блока

Статический расчёт амортизаторов

Целью расчёта является определение статических нагрузок на амортизаторы и выбор их типоразмеров.

Расчёт начинают с нахождения положения центра масс блока. Обычно считают, что для таких изделий положение центра масс. Для каждого функционального узла и крупного узла или детали совпадает с центром симметрии (рис. 2.3).

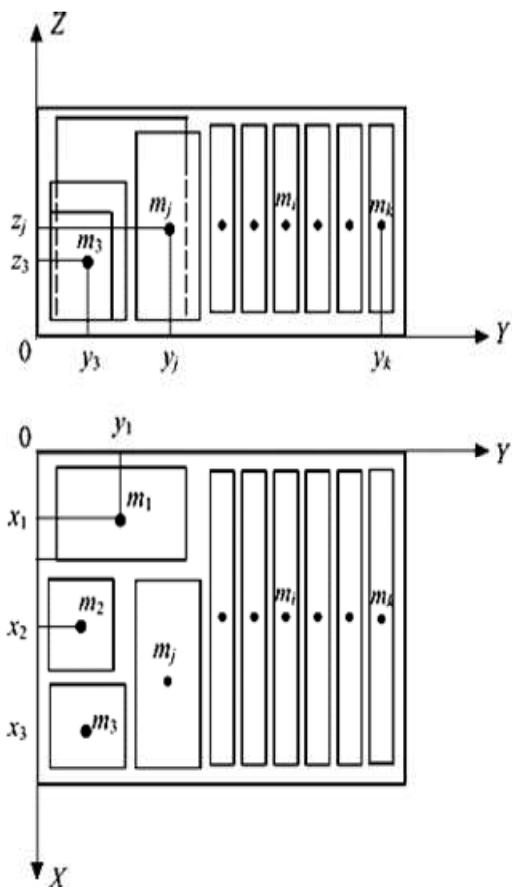


Рис. 2.3. К определению положения центра масс

Используя моменты первого рода, находят координаты центра масс блока[4]:

$$X_M = \frac{\sum x_i m_i}{\sum m_i}; Y_M = \frac{\sum y_i m_i}{\sum m_i}; Z_M = \frac{\sum z_i m_i}{\sum m_i},$$

где x_i , y_i , z_i – координаты центров масс функциональных узлов и деталей, входящих в блок; m_i – массы этих изделий.

Наиболее часто используют вариант симметричного расположения амортизаторов на блоке РЭС (рис. 2.4). Амортизаторы располагают на блоке таким образом, чтобы проекции амортизаторов на плоскость XU не выходили за контур проекции блока.

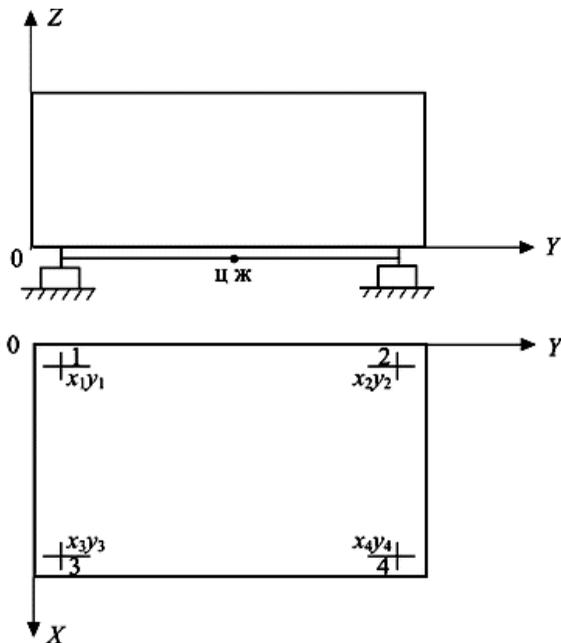


Рис. 2.4. Схема расположения амортизаторов на блоке РЭС

Определяют координаты центра жёсткости амортизаторов, используя моменты первого рода:

$$X_c = \frac{\sum c_{xi} x_i}{\sum c_{xi}}; \quad Y_c = \frac{\sum c_{yi} y_i}{\sum c_{yi}}; \quad Z_c = \frac{\sum c_{zi} z_i}{\sum c_{zi}},$$

где x_i, y_i, z_i – координаты размещения амортизаторов; $\sum c_{xi}, \sum c_{yi}, \sum c_{zi}$ – суммарная статическая жёсткость амортизаторов в направлении соответствующих координат; $\sum c_{xi} \cdot x_i, \sum c_{yi} \cdot y_i, \sum c_{zi} \cdot z_i$ – статические моменты жёсткости амортизаторов относительно координатных плоскостей.

3. Условия статического равновесия системы амортизации

$$\begin{aligned} \sum p_i &= G; \\ \sum p_i x_i &= 0; \quad \sum p_i y_i = 0; \quad \sum p_i z_i = 0; \\ \sum p_i x_i y_i &= 0; \quad \sum p_i x_i z_i = 0; \quad \sum p_i y_i z_i = 0, \end{aligned}$$

где p_i – весовая нагрузка, приходящаяся на i -й амортизатор; G – вес блока.

Блок устанавливается на носителе без перекосов (поэтому $Z = 0$), тогда получаем

$$\sum P_i = G; \sum p_i x_i = 0; \sum p_i y_i = 0.$$

4. Задавая координатами размещения амортизаторов, получают систему из четырёх линейных уравнений [4]:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ x_1 y_1 & x_2 y_2 & x_3 y_3 & x_4 y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

5. Решая эту систему (например, с помощью программ MathCAD) относительно нагрузок на амортизаторы, находят статические нагрузки на амортизаторы: p_1, p_2, p_3, p_4 .

6. По полученным статическим нагрузкам и условиям эксплуатации выбирают типоразмер амортизатора.

При несовпадении центра масс блока с центром симметрии, статическая нагрузка на амортизаторы будет разная и, следовательно, осадка однотипных амортизаторов будет различна. Для устранения перекоса блока вводят выравнивающие прокладки между амортизатором и корпусом блока.

7. Осадка амортизаторов

$$\delta_{z1} = p_1 c_{z1}; \delta_{z2} = p_2 c_{z2}; \delta_{z3} = p_3 c_{z3}; \delta_{z4} = p_4 c_{z4}.$$

Из полученных значений δ_{zi} выбирают наименьшее и относительно $\delta_{zi \min}$ определяют толщину выравнивающих прокладок под остальные три амортизатора:

$$\Delta_{\text{пр}} = \delta_{zi} - \delta_{zi \min},$$

где $\Delta_{\text{пр}}$ – толщина выравнивающей прокладки под соответствующий амортизатор.

Таким образом, в результате расчёта получают координаты размещения амортизаторов, их типоразмеры и толщину выравнивающих прокладок.

Резонансные частоты блока на амортизаторах

Расчёт резонансных частот блока может быть произведён только после определения и выбора типоразмеров амортизаторов, т.е. после проведения статического расчёта амортизации. Из проведённого расчёта опре-

деляется положение (координаты) центров тяжести и жёсткости блока, при этом могут встретиться три варианта:

- 1) центр масс и центр жёсткости разнесены;
- 2) центр масс и центр жёсткости лежат на одной вертикали;
- 3) центр масс и центр жёсткости совпадают.

При проведении этого расчёта пренебрегают силами трения, поэтому демпфирующие свойства амортизаторов не учитываются, что приводит к некоторой неточности в определении резонансных частот, но значительно упрощает процесс вычислений.

1. Расчёт начинают с определения координат расположения центра масс (нахождение координат центра масс). Исходя из условий эксплуатации и с учётом статической нагрузки на амортизаторы, выбирают типоразмеры амортизаторов.

2. Задаются расположением амортизаторов на блоке и находят координаты их расположения, при этом начало координат совмещают с центром масс.

Первый случай расчётной модели (рис. 2.5, *a*) приводит к необходимости решения системы из шести линейных дифференциальных уравнений, из которой находят шесть резонансных частот; при этом частоты оказываются взаимосвязанными [4, 3].

Система исходных расчётных выражений первой модели:

$$m \ddot{x} + \sum c_x x + \sum c_x \varphi_y - \sum c_x y \varphi_z = 0; \quad (2.1)$$

$$m \ddot{y} + \sum c_y y - \sum c_y z \varphi_x - \sum c_y x \varphi_z = 0; \quad (2.2)$$

$$m \ddot{z} + \sum c_z z + \sum c_z y \varphi_z - \sum c_z x \varphi_y = 0; \quad (2.3)$$

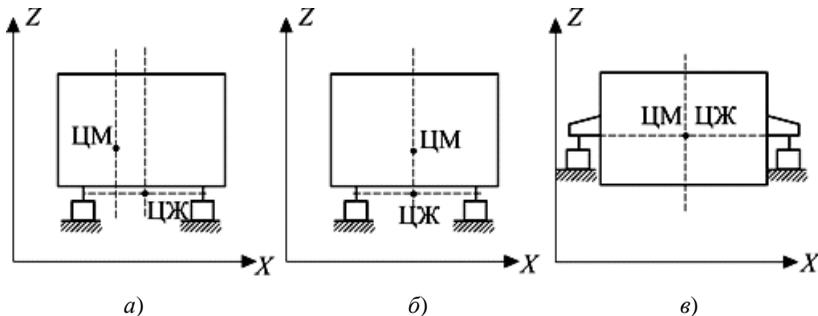


Рис. 2.5. Взаимное расположение центров масс и жёсткости:
a – ЦМ и ЦЖ разнесены; *б* – ЦМ и ЦЖ лежат на оси Z; *в* – ЦМ и ЦЖ совпадают

$$J_x \ddot{\varphi}_x - J_{xy} \ddot{\varphi}_y - J_{xz} \ddot{\varphi}_z - \sum c_y z y + \sum c_z y + \\ + \sum (c_z y^2 + c_y z^2) \varphi_x - \sum c_z x_y \varphi_y - \sum c_y x_z = 0; \quad (2.4)$$

$$-J_{xy} \ddot{\varphi}_x - J_y \ddot{\varphi}_y - J_{yz} \ddot{\varphi}_z + \sum c_x z x - \sum c_z x + \\ + \sum (c_z z^2) \varphi_y - \sum c_z xy \varphi_x - \sum c_x yz \varphi_z = 0; \quad (2.5)$$

$$-J_{xz} \ddot{\varphi}_x - J_{yz} \ddot{\varphi}_y - J_z \ddot{\varphi}_z + \sum c_x z x - \sum c_y x + \\ + \sum (c_z y^2 + c_y x^2) \varphi_z - \sum c_y xz \varphi_x - \sum c_x yz \varphi_z = 0, \quad (2.6)$$

где c_x, c_y, c_z – упругая жёсткость амортизаторов в направлении X, Y, Z ; x, y, z – координаты амортизаторов относительно координатных осей (если начало координат совпадает с центром масс, то оси являются главными); J_x, J_y, J_z – моменты инерции блока относительно координатных осей; J_{xy}, J_{yz}, J_{zx} – центробежные моменты инерции относительно координатных плоскостей; m – масса блока; $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ – углы поворота относительно координатных осей.

Решая эту систему уравнений, находят шесть частот собственных колебаний: три линейных и три вращательных. Данная система допускает решения, отличные от нуля, если её определитель равен нулю.

Решение системы находят в виде

$$\delta_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi); \quad \delta_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi); \quad \delta_3 = A_3 \cos(\omega t + \varphi); \\ \delta_4 = A_4 \cos(\omega t + \varphi); \quad \delta_5 = A_5 \cos(\omega t + \varphi); \quad \delta_6 = A_6 \cos(\omega t + \varphi).$$

Подставляя эти выражения в исходные уравнения (2.1) – (2.6), записывая коэффициенты при соответствующих координатах в виде определителя и решая его, находят постоянные коэффициенты уравнения шестой степени относительно ω^2 :

$$A\omega^{12} + B\omega^{10} + C\omega^8 + D\omega^6 + E\omega^4 + F\omega^2 + G = 0.$$

Если блок установлен на амортизаторах без перекосов, а центры масс и жёсткости лежат на одной вертикали, кроме того, использованы амортизаторы одного типоразмера, у которых упругая жёсткость по X и Y одинакова, то при выполнении этих условий расчётная модель соответствует варианту 2.

Система дифференциальных уравнений распадается на два уравнения независимых и четыре попарно связанных:

$$m \ddot{z} + \sum c_z z = 0; \quad (2.7)$$

$$J_z \ddot{\phi}_z + \sum (c_x y^2 + c_y x^2) \phi_z = 0; \quad (2.8)$$

$$m \ddot{x} + \sum (c_x y^2 + c_y x^2) \phi_z = 0; \quad (2.9)$$

$$J_y \ddot{\phi}_y + \sum c_x z x + \sum (c_x z^2 + c_z x^2) \phi_y = 0; \quad (2.10)$$

$$m \ddot{y} + \sum c_y y - \sum c_y z \phi_x = 0; \quad (2.11)$$

$$J_x \ddot{\phi}_x + \sum c_y y + \sum (c_z y^2 + c_y z^2) \phi_x = 0. \quad (2.12)$$

Из уравнений (2.7) и (2.8) определяют частоты собственных колебаний вдоль оси Z и вращательных колебаний вокруг этой оси:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\sum c_z}{m}}; \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{\sum (c_x y^2 + c_y x^2)}{J_z}}.$$

Из уравнений (2.9) и (2.10) находят ещё две частоты ω_3 и ω_4 , решая биквадратное уравнение

$$\omega_{3,4}^4 - \alpha_1 \omega_{3,4}^2 + b_1 = 0,$$

$$\text{где } a_1 = \frac{\sum (c_x z^2 + c_z x^2)}{J_y} + \frac{\sum c_x}{m}, \quad b_1 = \frac{\sum (c_x) \sum (c_x z^2 + c_z x^2) - (\sum c_x z)^2}{m J_y}.$$

Из уравнений (2.11) и (2.12) находят частоты ω_5 , ω_6 , решая биквадратное уравнение

$$\omega_{5,6}^4 - \alpha_2 \omega_{5,6}^2 + b_2 = 0,$$

$$\text{где } a_1 = \frac{\sum (c_z y^2 + c_y z^2)}{J_x} + \frac{\sum c_y}{m}; \quad b_2 = \frac{\sum (c_y) \sum (c_z y^2 + c_y z^2) - (\sum c_y z)^2}{m J_x}.$$

Если расчётная схема удовлетворяет требованиям третьего варианта, т.е. к перечисленным условиям добавить, что амортизаторы расположены симметрично и центр жёсткости совпадает с центром масс, то система уравнений распадается на шесть независимых частот собственных колебаний:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\sum c_x}{m}}; \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{\sum c_y}{m}}; \quad \omega_3 = \sqrt{\frac{\sum c_z}{m}};$$

$$\omega_4 = \sqrt{\frac{\sum (c_z y^2 + c_y z^2)}{J_x}}; \quad \omega_5 = \sqrt{\frac{\sum (c_z z^2 + c_z z^2)}{J_y}}; \quad \omega_6 = \sqrt{\frac{\sum (c_x y^2 + c_y x^2)}{J_z}}.$$

Используя полученные выражения, находят собственные частоты колебаний блоков.

Абсолютно совместить центр жёсткости с центром масс практически невозможно, как и расположить на одной вертикали, поэтому в инженерных задачах всегда возникает вопрос о степени приближения этих точек.

Для практических задач при размерах блоков в пределах 600 мм можно считать, что центры масс и жёсткости совпадают, если разность между ними не превышает 10 мм, но при меньших размерах блоков эту величину пропорционально уменьшают.

Пример расчёта амортизационной системы блока РЭС

Воздействие транспортной тряски складывается из ударов и вибраций. Основное воздействие на базовый блок устройства навигации механических нагрузок возникает при перемещении его на подвижном наземном объекте. В конструкции данного блока предусмотрены амортизаторы. Приведём методику их расчёта.

Рассчитываются статические нагрузки на амортизаторы. Условия статического равновесия системы амортизации:

$$\begin{aligned} \sum p_i &= G; \\ \sum p_i x_i &= 0, \quad \sum p_i y_i = 0, \quad \sum p_i z_i = 0; \\ \sum p_i x_i y_i &= 0, \quad \sum p_i x_i z_i = 0, \quad \sum p_i y_i z_i = 0, \end{aligned}$$

где p_i – весовая нагрузка, приходящаяся на i -й амортизатор; G – вес блока.

Блок устанавливается на носителе без перекосов (поэтому $Z = 0$), тогда получаем

$$\sum P_i = G, \quad \sum p_i x_i = 0, \quad \sum p_i y_i = 0.$$

Примерная схема расположения амортизаторов в проектируемом блоке РЭС приведена на рис. 2.6.

Задаваясь координатами размещения амортизаторов, получают систему из четырёх линейных уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ x_1 y_1 & x_2 y_2 & x_3 y_3 & x_4 y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

где $x_1 = -0,1855$ м; $x_2 = -0,1855$ м; $x_3 = 0,1855$ м; $x_4 = 0,1855$ м; $y_1 = -0,068$ м; $y_2 = 0,068$ м; $y_3 = -0,068$ м; $y_4 = 0,068$ м.

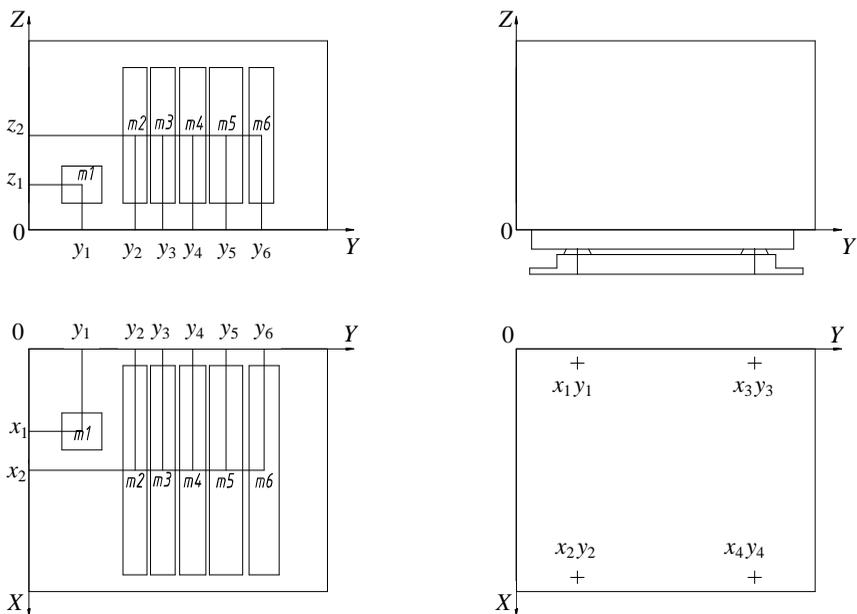


Рис. 2.6. Схема расположения амортизаторов на блоке РЭС

Решая эту систему относительно нагрузок на амортизаторы, находят статические нагрузки на амортизаторы: p_1, p_2, p_3, p_4 :

$$p_1 = 15,9 \text{ Н}; \quad p_2 = 15,9 \text{ Н}; \quad p_3 = 15,9 \text{ Н}; \quad p_4 = 15,9 \text{ Н}.$$

Исходя из полученных значений, выбирается тип амортизаторов АД-4, статические нагрузки в пределах 15...30 Н.

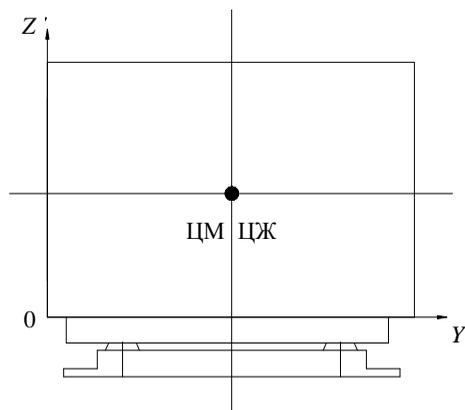


Рис. 2.7. Взаимное расположение центра масс и центра жёсткости

Так как статические нагрузки на все амортизаторы равны, то их осадка также равна, следовательно, выравнивание блока с помощью нивелирующих прокладок не требуется.

Рассчитывается резонансная частота блока на амортизаторах. Так как амортизаторы расположены симметрично и центр масс совпадает с центром жёсткости (рис. 2.7), то резонансная частота находится по формуле

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}},$$

где m – масса блока; K_{Σ} – суммарная жёсткость системы.

$$K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 K_{\text{ам}i} = 159,25 \cdot 4 = 637 \text{ Н/см};$$

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{637}{6,5}} = 15,8 \text{ Гц.}$$

Упаковочная тара для транспортирования

Упаковочная тара должна гарантировать сохранность РЭС при её перевозке любыми транспортными средствами. Контейнер для транспортировки изготавливают из недорогих материалов (металл, слоистое стекловолокно и дерево). Между жёсткой оболочкой тары и поверхностью РЭС прокладывают упругие амортизационные прокладки, гасящие вибрационные и ударные нагрузки при транспортировке (рис. 2.8).

Механические свойства упаковочных материалов характеризуются соотношением приложенной к поверхности материала нагрузкой и деформацией материала, вызываемой этой нагрузкой, т.е. статической жёсткостью

$$P = f(z).$$

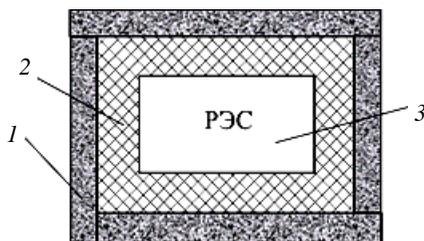


Рис. 2.8. Схема упаковочной тары:

1 – жесткая внешняя оболочка тары; 2 – упругая прокладка; 3 – РЭС

Амортизирующие прокладки могут быть упругие (табл. 2.3) и неупругие. Первые полностью восстанавливают свою толщину после снятия приложенной нагрузки. В неупругих прокладках наблюдается остаточная деформация, поэтому они являются прокладками разового использования.

Исходные данные

m – масса блока;

S – опорная поверхность блока;

K – наибольшая перегрузка, допустимая на РЭС.

Последовательность расчёта

1. Восстанавливающая сила после удара, которая вызовет в прокладке механическое напряжение (Н/см^2)

$$\sigma = \frac{m g}{S} (1 + K), \quad (2.13)$$

где $K = \ddot{z} / g$ – наибольшая перегрузка, допустимая на РЭС.

2. Потенциальная энергия поднятого на высоту H блока РЭС, которая приводит к максимально допустимой деформации прокладки

$$U = m g (H + z).$$

3. Потенциальная энергия, полностью переходящая в энергию деформации прокладки:

$$U = VT_v = ShT_v,$$

где V – объём прокладки; T_v – энергия, накопленная в единице объёма прокладки при минимальной упругой деформации.

2.3. Типы амортизирующих прокладок

Материал	Плотность ρ , г/см^3	Предельное допустимое давление σ_d , Н/см^2	Коэффициент демпфирования γ_m
Пенопласт полиуретановый (поролон)	0,03...0,07	0,8...1,0	0,10
Пенопласт полиуретановый с замкнутой структурой	0,35	20	0,08
Резина губчатая	0,127	3	0,12
Войлок мягкий	0,3	2...3	0,18...0,2
Сетка цельнометаллическая из проволоки ЭИ708 диаметром 0,09	1 1,87 2,68	20 30 140	0,3...0,4 0,3...0,4 0,3...0,4

4. Расчётная толщина прокладки

$$h = \frac{mg(H+z)}{ST_v}$$

Обозначая $\sigma/T_v = \Theta$ и с учётом (2.13), получаем толщину прокладки

$$h = \Theta \frac{H+z}{1+K}$$

5. Для приближённых расчётов удобно пользоваться выражением

$$h = \Theta \frac{H}{K}$$

видно, что чем меньше величина Θ , тем тоньше может быть упругая прокладка тары.

При выборе материала и размеров упругой прокладки исходят из допустимых напряжений, которые может выдержать материал, и минимальной величины безразмерной величины Θ (рис. 2.9).

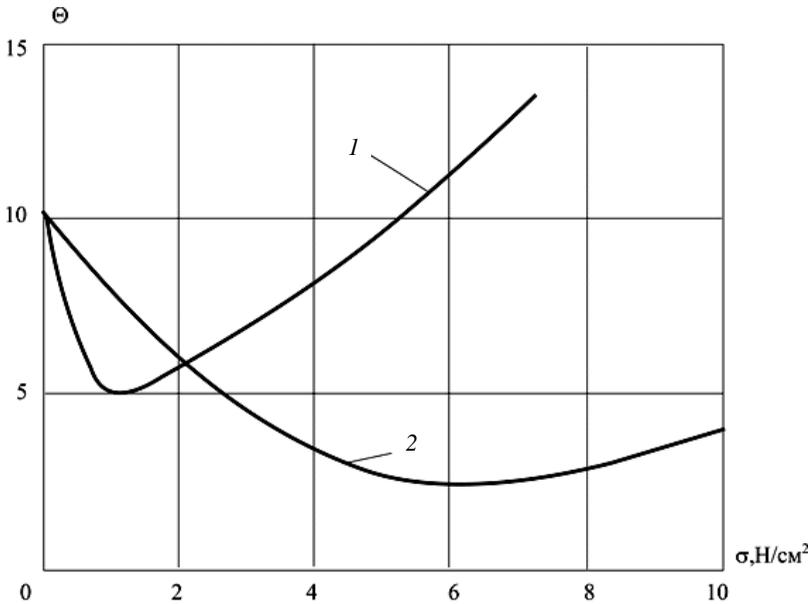


Рис. 2.9. Зависимость $\Theta = f(\sigma)$ для поролона (1) ($\rho = 0,127$ г/см³) и губчатой резины (2)

Пример расчёта упаковочной тары для транспортирования

Определяется материал прокладки. Для этого рассчитывается восстанавливающая сила после удара, которая вызовет в прокладке механическое напряжение:

$$\gamma = \frac{mg}{S} (1 + K),$$

где m – масса блока, кг; S – опорная поверхность блока, м²; K – наибольшая перегрузка, допустимая на РЭС.

Для транспортируемого блока: $m = 6,5$ кг, $S = 0,045$ м², $K = 15$.

Получаем $\sigma = 2,26$ Н/см². Данному значению восстанавливающей силы соответствует материал – резина.

Рассчитывается толщина амортизационной прокладки

$$h = \Theta \frac{H + Z}{1 + K},$$

где H – высота, на которой работает блок РЭС, м;

$$\Theta = \sigma / T_v,$$

где T_v – энергия, накопленная в единице объёма прокладки при минимальной упругой деформации, Дж.

Величина Θ определяется из графика на рис. 2.9 для выбранного материала (резина) и соответствующего значения восстанавливающей силы $\sigma = 2,26$ Н/см², рабочая высота для блока $H = 1,5$ м.

Рассчитывается толщина прокладки. Для приближённых расчётов удобно пользоваться выражением

$$h = \Theta \frac{H}{K},$$

$$h = (5,5 \cdot 1,5) / 15 = 0,55 \text{ м.}$$

Таким образом, рассчитанная упаковочная тара, состоящая из жёсткой деревянной внешней оболочки и резиновой амортизационной прокладки толщиной 0,55 м полностью гарантирует сохранность блока РЭС при его перевозке любым транспортным средством.

2.3.3. Расчёт на действие вибрации печатного узла

Собственная частота печатной платы f_0 , Гц, с распределённой нагрузкой для различных вариантов закрепления определяется выражением

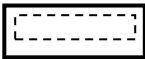
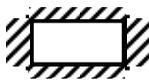
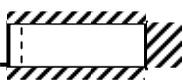
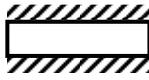
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{K_\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{Dab}{M}}, \quad (2.14)$$

где a – длина большей стороны печатной платы, м; b – длина меньшей стороны печатной платы, м; $M = (m_{\text{п}} + m_{\text{э}})$, кг – общая масса печатной платы $m_{\text{п}}$ и элементов $m_{\text{э}}$; D – цилиндрическая жёсткость печатной платы, Н·м; K_{α} – коэффициент, зависящий от способа закрепления печатного узла, определяется выражением

$$K_{\alpha} = k \sqrt{\alpha + \beta \frac{a^2}{b^2} + \gamma \frac{a^4}{b^4}}. \quad (2.15)$$

Коэффициенты k , α , β , γ приведены в табл. 2.4. Закрепление сторон печатного узла в блоке может быть жёстким, опертым и свободным (рис. 2.10).

2.4. Основные способы закрепления печатных узлов

Номер	Схема закрепления	Коэффициенты			
		k	α	β	γ
1		9,87	1	2	11
2		22,37	1	0,48	0,19
3		22,37	1	0,61	1
4		22,37	1	0	0
5		15,42	1	1,19	2,1
6		9,87	1	2,57	5,14
7		22,37	0	0	1

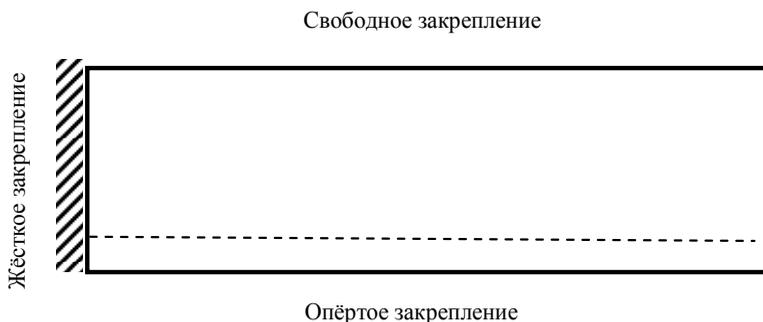


Рис. 2.10. Виды закрепления сторон печатного узла

При жёстком закреплении нет угловых и линейных перемещений стороны печатного узла (разъёмное соединение, прижатие или закрепление винтами). При опёртом закреплении нет линейного перемещения, но возможен поворот по опёртой стороне (сторона устанавливается в пазы). Свободная сторона печатного узла допускает линейные и угловые перемещения.

Общая масса печатного узла M , кг (печатной платы $m_{\text{п}}$ и элементов $m_{\text{э}}$), определяется выражением

$$M = m_{\text{п}} + m_{\text{э}} = \rho abh + \sum_{i=1}^N m_i n_i, \quad (2.16)$$

где ρ – плотность печатной платы, кг/м^3 ; h – толщина печатной платы, м; m_i – масса i -го элемента, кг; n_i – количество элементов i -го типа; N – количество типов элементов РЭС.

Цилиндрическая жёсткость печатной платы D , Н·м, определяется формулой

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (2.17)$$

где E – модуль упругости, Н/м^2 ; μ – коэффициент Пуассона.

Значения коэффициентов E , μ , ρ приведены в табл. 2.5.

После нахождения собственной частоты печатной платы f_0 осуществляется проверка выполнения условия заданным техническим требованиям:

$$f_0 > 2f_{\text{в}}, \quad (2.18)$$

где $f_{\text{в}}$ – частота вибрации внешнего источника, Гц.

2.5. Значения коэффициентов E, μ , ρ

Материал	Модуль упругости $E \cdot 10^{10}$, Н/м ²	Коэффициент Пуассона μ	Плотность $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³
Сталь	20,6	0,3	7,8
Алюминий	7,1	0,3	2,7
Дюралюминий	7,3	0,32	2,8
Магниевый сплав	4,12	0,3	1,8
Стеклотекстолит типа СФ, СТЭФ печатной схемы	3	0,22	2

2.3.4. Расчёт максимального смещения блока при воздействии на него вибрации

Максимальное смещение блока $\epsilon_{\text{бл}}^{\text{max}}$, мм, вычисляется по формуле

$$\epsilon_{\text{бл}}^{\text{max}} = \frac{a_{\text{в}}}{0,1(2\pi)^2 f_{\text{в}}^2} = \frac{0,25a_{\text{в}}}{f_{\text{в}}^2}, \quad (2.19)$$

где $a_{\text{в}}$, м/с² – ускорение внешнего источника вибрации; $f_{\text{в}}$, Гц – частота вибрации внешнего источника.

После вычисления максимального смещения блока $\epsilon_{\text{бл}}^{\text{max}}$ осуществляется проверка выполнения условия заданным техническим требованиям:

$$\epsilon_{\text{бл}}^{\text{max}} < \epsilon_{\text{бл}}^{\text{доп}}, \quad (2.20)$$

где $\epsilon_{\text{бл}}^{\text{доп}}$ – допустимое смещение блока.

2.3.5. Расчёт на действие удара печатного узла

Для расчёта на действие удара необходимо иметь исходные данные: ускорение удара $a_{\text{у}}$, м/с²; длительность импульса удара $t_{\text{иу}}$, с; форма удара (рис. 2.11); размеры платы a и b ; форму удара.

Максимальное смещение печатного узла для прямоугольного импульса $S_{\text{у}}$, м, определяется выражением

$$S_{\text{у}} = \frac{a_{\text{у}}}{\omega_0^2} K_{\text{у}} = \frac{a_{\text{у}}}{2\pi f_0^2} K_{\text{у}}, \quad (2.21)$$

где f_0 – частота собственных колебаний печатного узла; $K_{\text{у}}$ – коэффициент передачи удара.

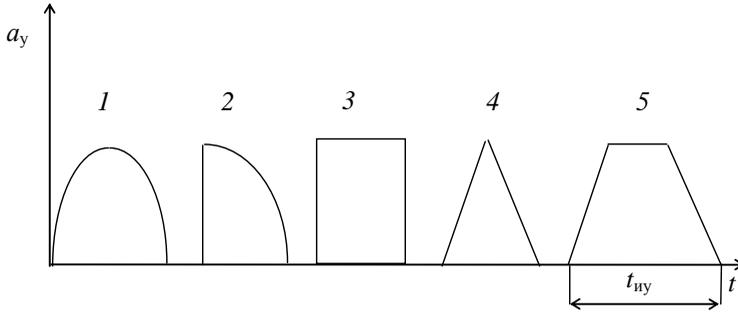


Рис. 2.11. Форма ударного импульса:

1 – полусинусоидальный удар; 2 – четвертьсинусоидальный удар;
3 – прямоугольный удар; 4 – треугольный удар; 5 – трапециевидный удар

Коэффициент передачи удара определяется формулой

$$K_y = 2 \sin \frac{\pi \Delta \omega}{2}, \quad (2.22)$$

где $\Delta \omega$ – коэффициент расстройки, вычисляется по формуле

$$\Delta \omega = \omega_0 / \omega = 2\pi f_0 / \omega, \quad (2.23)$$

где ω – условная частота удара, Гц:

$$\omega = \pi / t_{ny}. \quad (2.24)$$

После подстановки (2.23) и (2.24) в (2.22) получено выражение

$$K_y = 2 \sin \frac{\pi}{2} \frac{\omega_0}{\pi / t_{ny}} = 2 \sin \frac{\omega_0 t_{ny}}{2} = 2 \sin \pi f_0 t_{ny}. \quad (2.25)$$

После подстановки (2.25) в (2.21) получено выражение

$$S_y = \frac{2a_y \sin \pi f_0 t_{ny}}{(2\pi f_0)^2}. \quad (2.26)$$

Проверка условия ударопрочности по максимальному смещению печатного узла определяется выражением

$$S_y < 0,003b(a), \quad (2.17)$$

где b или a – размер стороны печатного узла, параллельно которой установлены электрорадиоэлементы (ЭРЭ).

Для полусинусоидального импульса коэффициент передачи удара определяется формулой

$$K_y = \frac{\Delta\omega}{1 - \Delta\omega^2} \cos \frac{\pi\Delta\omega}{2}. \quad (2.28)$$

Максимальное смещение печатного узла для полусинусоидального импульса можно получить на основании выражения (2.21):

$$S_y = \frac{a_y}{\omega^2} \left(\frac{\Delta\omega}{1 - \Delta\omega^2} \cos \frac{\pi\Delta\omega}{2} \right). \quad (2.29)$$

2.3.6. Определение вибропрочности выводов элементов

При вибрационных нагрузках, действующих на РЭС, возможны разрушения выводов навесных элементов вследствие усталостных явлений. Установка навесных элементов на печатных платах зависит от их конструктивных особенностей. При двухстороннем печатном монтаже ЭРЭ приподнимают над поверхностью платы, а при одностороннем монтаже корпус элемента прижимают к поверхности платы и закрепляют с помощью клеявого соединения. Механические напряжения в выводах элемента могут возникать по двум причинам.

1. За счёт возникновения инерционных сил, действующих на установленный элемент, приподнятый над поверхностью платы на высоту h (рис. 1.6).

2. За счёт деформации печатной платы в условиях возникновения механического резонанса (рис. 2.12).

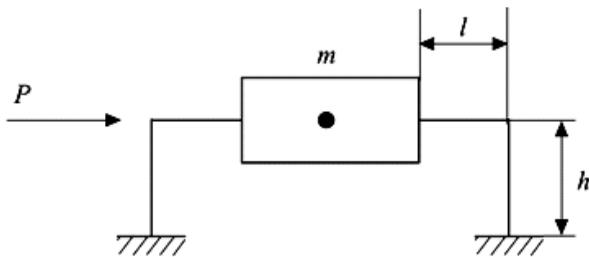


Рис. 2.12. Элемент над поверхностью печатной платы

Расчёт времени до разрушения вывода за счёт резонансных явлений ЭРЭ

Установка ЭРЭ над поверхностью печатной платы сводится к расчётной модели (рис. 2.13).

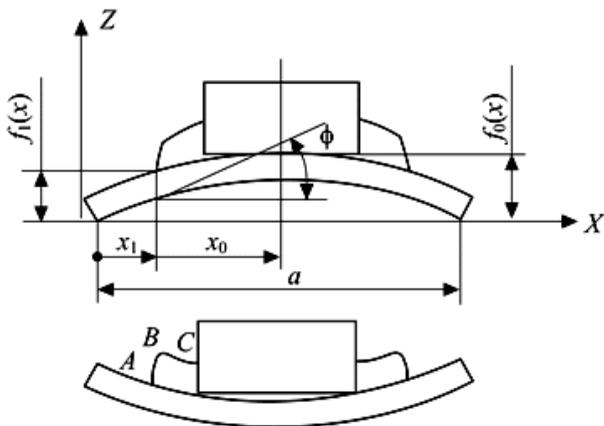


Рис. 2.13. Элемент прижат к плате
(изгиб выводов ЭРЭ при деформации платы)

Исходные данные

- m – масса элемента, кг;
- L – длина корпуса резистора, м;
- l – расстояние от корпуса элемента до изгиба вывода, м;
- h – высота установки ЭРЭ над поверхностью платы, м;
- d – диаметр вывода элемента, м;
- E – модуль упругости материала вывода элемента, Н/м²;
- G – модуль сдвига материала вывода элемента, Н/м²;
- n_v – перегрузка при вибрационных воздействиях.

Последовательность расчёта

1. Основная частота колебаний для сил, действующих по координатам X , Y и Z :

– по координате X

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{48EJ}{m(l)^3 \left[1 - \frac{9}{8(k+2)} \right]} \right\}^{0,5};$$

– по координате Y

$$f_y = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{2}{m} \left[\frac{(2l)^3}{24EJ} + \frac{h^3}{3EJ} - \frac{(2l)^4 GJ}{32EJ(2hEJ + 2lGJ)} \right] \right\}^{0,6};$$

– по координате Z

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{24EJ}{mh^3 \left[1 + \frac{3}{6k+1} \right]} \right\}^{0,5},$$

где $J = \pi d^4/64$ – момент инерции сечения вывода элемента; G – модуль сдвига материала вывода, $k = h/2l$.

2. Логарифмический декремент затухания

$$\Lambda = \frac{\pi}{\sqrt{f_i}},$$

упрощённо декремент затухания можно найти через коэффициент β_0 (для механических систем величина $\beta_0 = 0,02 - 0,025$), тогда $\Lambda \approx 2\pi\beta_0$.

3. Коэффициент передачи при резонансе

$$\eta = \frac{\pi}{\Lambda}.$$

4. Инерционная сила

$$P = \eta m g n_b.$$

Если направление силы P_n не совпадает с какой-либо осью координат, то её необходимо разложить на составляющие P_x , P_y и P_z и провести расчёт по всем этим силам.

5. Изгибающие моменты в точках изгиба выводов (рис. 2.14):

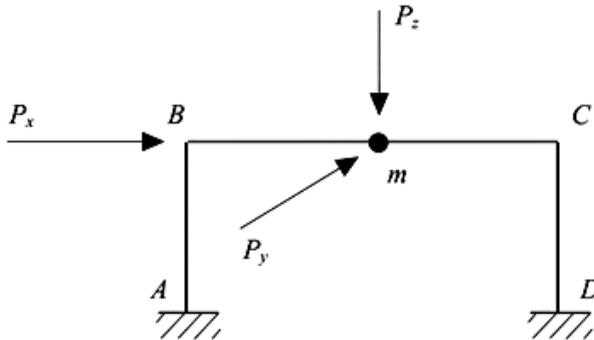


Рис. 2.14. Расчётная модель для элемента, установленного над поверхностью печатной платы

– в направлении X

$$M_A = M_D = (1 + 3k) \frac{hP_x}{2(1 + 6k)},$$

$$M_B = M_C = 1,5kh \frac{P}{1 + 6k};$$

– в направлении Y

$$M_A = M_D = \frac{Ph}{2};$$

– в направлении Z

$$M_B = M_C = \frac{Pl}{2(2 + k)}.$$

6. Напряжения в точках A и B :

$$\sigma_A = \sigma_D = \frac{M_A d}{2J};$$

$$\sigma_B = \sigma_C = \frac{M_B d}{2J}.$$

7. Число циклов до разрушения (рис. 2.15).

8. Время работы вывода в условиях резонанса до разрушения

$$t_P = \frac{N}{f_i}.$$

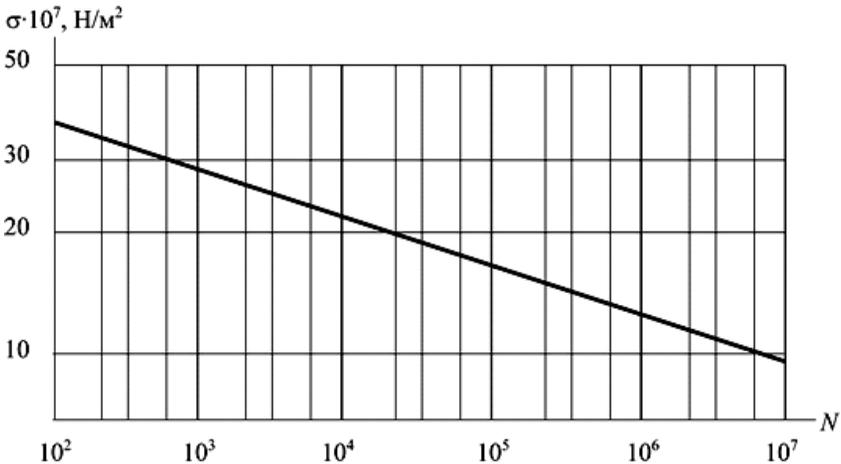


Рис. 2.15. Кривая усталости холоднойкатанной медной проволоки

Расчёт времени до разрушения вывода ЭРЭ при резонансе печатной платы

Исходные данные

Корпус элемента приклеен к поверхности платы;
 a, b, h – геометрические размеры платы, м;
 E_p – модуль упругости материала платы, Н/м²;
 μ – коэффициент Пуассона;
 z_0 – амплитуда возбуждающих колебаний, м.

Последовательность расчёта

Будем считать, что ЭРЭ расположен в центре печатной платы (рис. 2.16) и его ось направлена по координате X .

1. Собственная частота колебаний

$$f_1 = \frac{\alpha}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12(1-\mu^2)\rho}}$$

где α – коэффициент, зависящий от способа крепления платы; a – размер между винтами крепления по большей стороне платы; b – размер между винтами крепления по меньшей стороне платы; ρ – плотность материала платы; μ – коэффициент Пуассона.

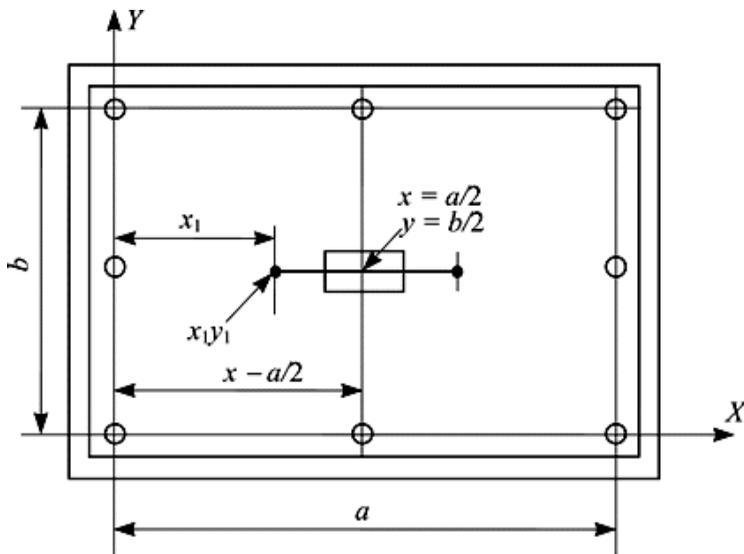


Рис. 2.16. Схема расположения ЭРЭ на плате

2. Коэффициент механических потерь

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{f_1}}$$

3. Прогиб в центре платы при резонансе (рис. 2.17) (при $x = a/2$ и $y = b/2$)

$$W(x) = \frac{K_1(\xi_x, \xi_y)}{\gamma} Z_0.$$

где $K_1(\zeta_x, \zeta_y) = K_1(\zeta_x) \cdot K_1(\zeta_y)$ – параметр формы колебаний (индекс 1 означает, что в направлениях X и Y наблюдается одна полуволна); ζ_x, ζ_y – относительные координаты в рассматриваемой точке.

Если ЭРЭ расположен в центре платы, то $\zeta_x = \zeta_y = 0,5$.

Коэффициенты формы колебаний при одной полуволне.

$\zeta = x/l$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$K_1(\zeta_x)$	0,394	0,749	1,03	1,211	1,273	1,211

4. Угол изгиба платы в точке крепления вывода

$$\varphi = W_0 \frac{\pi}{a} \cos \frac{\pi x}{a}.$$

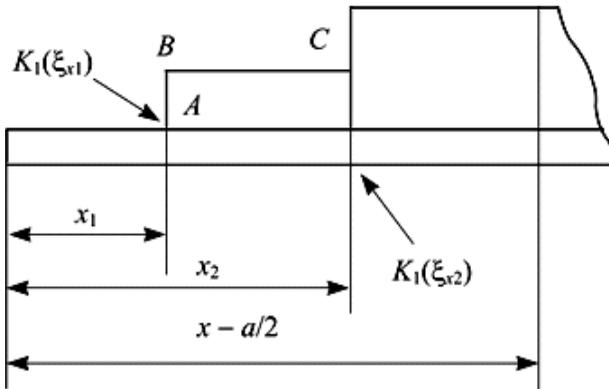


Рис. 2.17. К определению параметров K_1 и K_2

5. Деформация выводов за счёт прогиба платы

$$f = \omega_1(x) - \omega_2(x) = \frac{z}{y} [K_1(\xi_{x1}, \xi_{y1}) - K_1(\xi_{x2}, \xi_{y1})],$$

где $K_1(\zeta_{x1}, \zeta_{y1})$ и $K_1(\zeta_{x2}, \zeta_{y1})$ – точки крепления вывода и крепления вывода к корпусу ЭРЭ с относительными координатами ζ_x и ζ_y или

$$f = \frac{z}{\gamma} [K_1(\xi_{x1})K_1(\xi_{y1}) - K_1(\xi_{x2})K_1(\xi_{y1})].$$

6. Изгибающие моменты в точках A , B и C (рис. 2.18) складываются из изгибающего момента за счёт линейного перемещения точки A при деформации платы и момента, возникающего за счёт поворота точки крепления элемента на угол φ :

$$M_A = M_{Af} + M_{A\varphi} = \frac{3EJ_f}{(1+k)hl} + \frac{(3+4k)EJ_\varphi}{(1+k)h};$$

$$M_B = M_{Bf} + M_{B\varphi} = \frac{6EJ_f}{(1+k)hl} + \frac{2EJ_\varphi}{(1+k)l};$$

$$M_C = M_{Cf} + M_{C\varphi} = \frac{3(1+2k)EJ_f}{(1+k)h^2} + \frac{EJ_\varphi}{(1+k)l}.$$

7. Для наибольшего момента (M_A , M_B или M_C) находят напряжение в точке

$$\sigma_i = \frac{M_i d}{2J}.$$

8. Количество циклов, которые выдержит вывод элемента до разрушения (рис. 2.15).

Время работы элемента в условиях вибрации печатной платы

$$t_p = N_p / f_1.$$

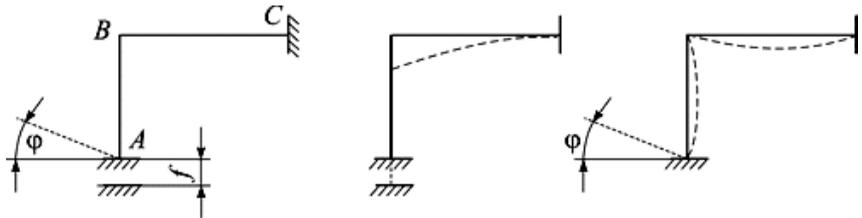


Рис. 2.18. Изгибающие моменты в выводе ЭРЭ за счёт деформации платы и угла поворота φ

Пример расчёта печатной платы на механические воздействия

Целью расчёта является определение действующих на элементы изделия перегрузок при действии вибрации и ударов [5, 2].

Расчёт на воздействие вибраций

1. Определяем частоту собственных колебаний для платы, закреплённой в четырёх точках:

$$f_0 = \frac{\pi}{2a^2} \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{M}} ab,$$

где a – длина платы, мм; ($a = 170 \text{ мм} = 0,17 \text{ м}$); b – ширина платы, мм; ($b = 110 \text{ мм} = 0,11 \text{ м}$); D – цилиндрическая жёсткость, Н·м; определяемая по формуле

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)},$$

где E – модуль упругости, Н/м² (для стеклотекстолита $E = 3,02 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$); h – толщина ПП, м; ($h = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$); ν – коэффициент Пуассона (для стеклотекстолита $\nu = 0,22$) [10, 12].

$$D = \frac{3,02 \cdot 10^{10} \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^3}{12(1-0,22^2)} = 21,16 \text{ Н·м},$$

где M – масса платы, г; $M = \rho V \cdot 5$, 5 – так как много навесных элементов.

Для фольгированного стеклотекстолита выбираем из [5]:

$$\rho = 2,05 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$M = 2,05 \cdot 10^3 \cdot 0,170 \cdot 0,11 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 = 0,29 \text{ кг}.$$

Тогда

$$f_0 = \frac{\pi}{2 \cdot 0,17^2} \left(1 + \frac{0,17^2}{0,11^2} \right) \sqrt{\frac{21,16}{0,2}} \cdot 0,17 \cdot 0,11 = 358,92 \text{ Гц}.$$

Проверяем условие вибропрочности по правилу октавы $f_0/f > 1$, где f – частота колебаний блока ($f = 70 \text{ Гц}$, см. ГОСТ 16019–01 для четвёртой группы),

$$258,92/70 = 3,7;$$

$$3,7 > 2.$$

Следовательно, проектируемое устройство отвечает необходимым требованиям по вибропрочности.

Расчёт на действие удара

Ударные воздействия характеризуются формой и параметрами ударного импульса. Следует иметь в виду, что максимальное воздействие на механическую систему оказывает импульс прямоугольной формы. Методика расчёта заключается в следующем.

1. Определяется условная частота ударного импульса

$$\omega = \pi / \tau,$$

где τ – длительность ударного импульса, мс; $\tau = 10 \text{ мс} = 0,01 \text{ с}$, (см. ГОСТ 16019–01)

$$\omega = \pi / 0,01 = 314 \text{ рад/с.}$$

2. Рассчитывается коэффициент передачи при ударе:

а) для прямоугольного импульса

$$K'_y = 2 \sin \frac{\pi}{2\nu};$$

б) для полусинусоидального импульса

$$K''_y = \frac{2\nu}{\nu^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\nu},$$

где ν – коэффициент расстройки:

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi f_0} = \frac{314}{2 \cdot 3,14 \cdot 258,92} \approx 0,19;$$

$$K'_y = 2 \sin \frac{3,14}{2 \cdot 0,19} = 0,23;$$

$$K''_y = \frac{2 \cdot 0,19}{0,19^2 - 1} \cos \frac{3,14}{2 \cdot 0,19} = 0,016.$$

3. Рассчитывается ударное ускорение

$$a_y = H_y K_y,$$

где H_y – амплитуда ускорения ударного импульса, м/с²; $H_y = 147 \text{ м/с}^2$ (исходя из четвёртой группы по механическим воздействиям).

$$a'_y = 147 \cdot 0,23 = 33,81 \text{ м/с}^2;$$

$$a''_y = 147 \cdot 0,016 = 2,5 \text{ м/с}^2.$$

4. Определяется максимальное относительное перемещение:

а) для прямоугольного импульса

$$Z'_{\max} = \frac{2H_y}{2\pi f_0} \sin \frac{\pi}{2\nu} = \frac{2 \cdot 98}{2 \cdot 3,14 \cdot 258,92} \sin \frac{3,14}{2 \cdot 0,19} = 0,11 \text{ мм};$$

б) для полусинусоидального импульса

$$Z''_{\max} = \frac{2H_y}{2\pi f_0} \frac{\nu}{\nu^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\nu} = \frac{2 \cdot 98}{2 \cdot 3,14 \cdot 258,92} \frac{0,19}{0,19^2 - 1} \cos \frac{3,14}{2 \cdot 0,19} = 0,0095 \text{ мм}.$$

5. Проверяется выполнение условия ударопрочности по следующим критериям:

а) для ПП с ЭРЭ $Z_{\max} < 0,003b$, где b – размер стороны ПП, параллельно которой установлены ЭРЭ, $b = 0,170$ м:

$$Z_{\max} < 0,003 \cdot 0,17 = 5,1 \cdot 10^{-4} \text{ м};$$

$$4,0 \cdot 10^{-5} \text{ м} < 5,1 \cdot 10^{-4} \text{ м (верно);}$$

$$0,8 \cdot 10^{-5} \text{ м} < 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ м (верно);}$$

б) для ЭРЭ ударное ускорение должно быть меньше допустимого, т.е. $a_y < a_{y, \text{доп}}$, где $a_{y, \text{доп}}$ – наименьшее ударное ускорение, которое имеет ЭРЭ на печатном узле. Исходя из элементной базы, наименьшее ударное ускорение будет иметь трансформатор ТОТ44 с $a_{y, \text{доп}} = 150 \text{ м/с}^2$,

$$2,5 \text{ м/с}^2 < 150 \text{ м/с}^2;$$

$$33,81 \text{ м/с}^2 < 150 \text{ м/с}^2.$$

Условие ударопрочности выполняется.

Расчёт ускорения при падении блока РЭС

Частным случаем ударного воздействия является удар при падении прибора. Действующая при этом перегрузка находится следующим образом:

а) определяется относительная скорость соударения

$$V_0 = V_y + V_{от},$$

где $V_y = \sqrt{2gH}$ – скорость прибора в момент соударения, м/с; H – высота падения прибора, м; $H = 0,75$ м; $V_{от} = V_y K_B$ – скорость отскока, м/с; K_B – коэффициент восстановления скорости, выбирается из [5], $K_B = 0,9$:

$$V_y = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,75} = 3,83 \text{ м/с};$$

$$V_{от} = 3,83 \cdot 0,9 = 3,45 \text{ м/с};$$

$$V_0 = 3,83 + 3,45 = 7,28 \text{ м/с};$$

б) вычисляется действующее на прибор ускорение

$$a_{п} = V_0^2 / 2H = 7,28^2 / 2 \cdot 0,75 = 31,1 \text{ м/с}^2 .$$

Условие прочности проверяется по неравенству $a_{п} < a_{п.доп}$. Для наиболее уязвимого элемента исследуемой схемы, например, трансформатора (ТОТ44) $a_{п. доп} = 150 \text{ м/с}^2$:

$$a_{п} = 31,1 < a_{п.доп} = 150 .$$

Вычисленное ускорение, действующее на блок при падении его с высоты 0,75 м, много меньше допустимого ускорения для самого уязвимого элемента. Следовательно, проектируемое устройство отвечает необходимым требованиям ударпрочности при падении РЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание учебного пособия и, особенно, параграфы, посвящённые обеспечению тепловых режимов и механических нагрузок радиоэлектронных модулей первого – третьего уровня, подтверждает необходимость всестороннего (системного) рассмотрения всей совокупности проблем, возникающих при разработке любой РЭС с учётом реальных условий эксплуатации. При этом разработчик должен чётко представлять назначение и условия эксплуатации проектируемого устройства. Кроме того, при разработке РЭС необходимо учитывать исторический опыт и перспективы развития РЭС не только рассматриваемого класса, но и конкурирующих с ними, о которых проектировщик должен иметь достаточно глубокое представление. Особенно важно это при создании современных многофункциональных комплексов, включающих разнородные системы.

Рациональный выбор принципа действия и структуры системы не может быть сделан без глубокого знания существующей элементной базы и перспектив её развития. Проектировщик РЭС должен внимательно следить за результатами фундаментальных исследований и учитывать их при решении конструкторских задач. Использование современных компьютерных технологий позволяет проектировщику РЭС существенно улучшить характеристики разрабатываемого устройства, но и также снизить время на разработку и верификацию всего устройства в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баканов, Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств : учеб. пособие / Г.Ф. Баканов. – М. : Академия, 2007. – 368 с.
2. Проектирование и технология радиоэлектронных средств : учеб. пособие / З.М. Селиванова, Д.Ю. Муромцев, Т.И. Чернышова, О.А. Белоусов, В.Н. Митрофанова. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 164 с.
3. Гелль, П.П. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры : учебник для вузов / П.П. Гелль, Н.К. Иванов-Есипович. – Л. : Энергоатомиздат Ленингр. отделение, 1984.
4. Белоусов, О.А. Основные конструкторские расчёты в РЭС : учеб. пособие / О.А. Белоусов, Н.А. Кольтюков, А.Н. Грибков. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 84 с.
5. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие для вузов / Е.М. Парфенов и др. – М. : Радио и связь, 1989. – 272 с.
6. Дульнев, Г.Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах / Г.Н. Дульнев, Э.М. Семяшкин. – Л. : Энергия, 1968.
7. Родкоп, Л.Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры / Л.Л. Родкоп, Ю.Е. Спокойный. – М. : Советское радио, 1976.
8. Конструирование радиоэлектронных средств / под ред. А.С. Назарова. – М. : МАИ, 1996.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ	4
1.1. Основные понятия теории теплообмена	4
1.2. Определение температуры нагретой зоны одиночного блока	7
1.3. Температура перфорированного блока	15
1.4. Температура элементов блока с принудительным охлаждением	20
1.5. Определение температуры поверхности элемента	26
1.6. Расчёт радиатора полупроводникового прибора	44
2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ РЭС ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ	51
2.1. Виды механических воздействий на РЭС	51
2.2. Механические и акустические воздействия, влияние их на работоспособность РЭС	54
2.2.1. Механические и акустические воздействия	54
2.2.2. Влияние механических воздействий на работоспособность РЭС	55
2.3. Объекты-носители и защита РЭС от механических воздействий	55
2.3.1. Объекты-носители	55
2.3.2. Расчёты механических нагрузок блока	57
2.3.3. Расчёт на действие вибрации печатного узла	69
2.3.4. Расчёт максимального смещения блока при воздействии на него вибрации	72
2.3.5. Расчёт на действие удара печатного узла	72
2.3.6. Определение вибропрочности выводов элементов	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	85
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	86

Учебное издание

МУРОМЦЕВ Дмитрий Юрьевич
БЕЛОУСОВ Олег Андреевич

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РАСЧЁТА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова
Инженер по компьютерному макетированию Т.Ю. Зотова

Подписано в печать 20.02.2012
Формат 60×84 /16. 5,11 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 66

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14