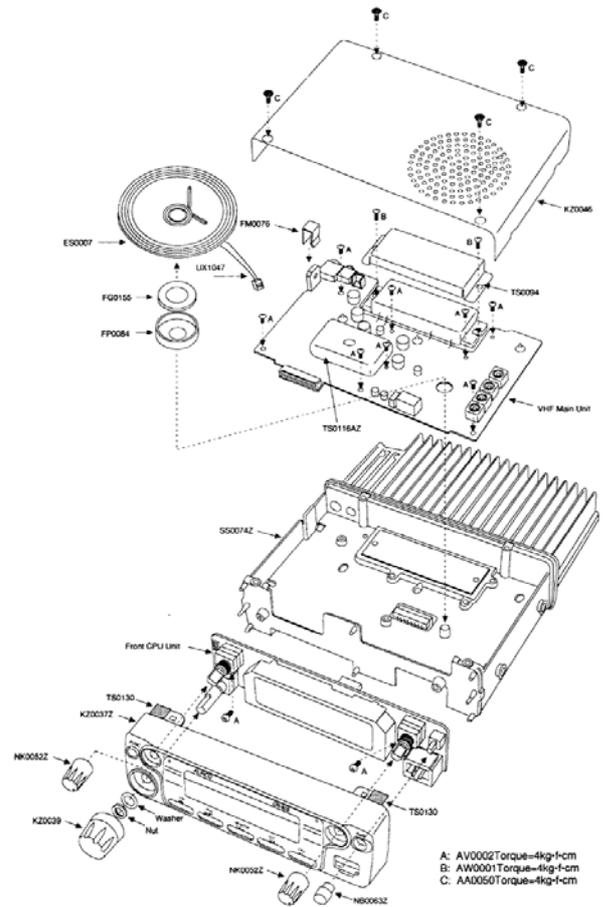


Основные конструкторские расчеты в РЭС



Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО «Гамбовский государственный технический университет»

О.А. БЕЛОУСОВ, Н.А. КОЛЬТЮКОВ, А.Н. ГРИБКОВ

***Основные
конструкторские
расчеты в РЭС***

Утверждено Ученым советом университета
в качестве учебного пособия



Гамбов
Издательство ТГТУ
2007

УДК 621.396.6.007.63(075)

ББК ←844я73-1

Б875

Рецензенты:

Доктор технических наук, доцент,
начальник 25 кафедры Тамбовского ВВАИУРЭ (ВИ)

И.И. Пасечников

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Переработка полимеров и
упаковочное производство»

П.С. Беляев

Белоусов, О.А.

Б875 Основные конструкторские расчеты в РЭС : учебное пособие / О.А. Белоусов, Н.А. Кольтюков, А.Н. Грибков. – Тамбов :
Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 84 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0664-6.

В учебном пособии приведены справочные материалы, расчетные формулы, а также примеры для выполнения расчетов на основе системного подхода и модульного принципа конструирования РЭС.

Глава 6 данного учебного пособия подготовлена доктором технических наук, профессором Ю.Л. Муромцевым.

Предназначено в помощь студентам дневного и заочного отделений, обучающихся по направлениям 210200 – Проектирование и технология электронных средств и 210300 – Радиотехника.

УДК 621.396.6.007.63(075)

ББК ←844я73-1

ISBN 978-5-8265-0664-6

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет» (ТГТУ), 2007

Учебное издание

**БЕЛОУСОВ Олег Андреевич,
КОЛЬТЮКОВ Николай Александрович,
ГРИБКОВ Алексей Николаевич**

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТОРСКИЕ РАСЧЕТЫ В РЭС

Учебное пособие

Редактор В.Н. Митрофанова
Компьютерное макетирование Е.В. Короблевой

Подписано в печать 18.12.10.07
Формат 60 × 84/16. 4,88 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 816

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

ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором, определяющим темпы научно-технического прогресса в современном обществе, являются радиоэлектронные средства (РЭС). Под РЭС понимают изделие и его составные части, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники.

Одним из важнейших этапов при проектировании РЭС, этап конструкторских расчетов, связанный с обеспечением прочности и жесткости радиоэлектронных средств, определением собственных резонансных частот блоков и резонансных частот отдельных элементов. Немаловажную роль для правильного функционирования РЭС играет оптимальный выбор тепловых режимов, в частности перегрев блока или его отдельных элементов, размеры и виды радиаторов мощных полупроводниковых приборов. Еще одной важной особенностью функционирования РЭС является наличие внешних и внутренних источников электромагнитных помех, поэтому для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) в конструкции РЭС необходимо тщательное проведение расчетов по экранированию и электромагнитным взаимодействиям в радиоэлектронных модулях. Перечисленные расчеты являются неотъемлемой частью при конструировании радиоэлектронных средств.

Данное учебное пособие состоит из пяти разделов, в которых представлены расчеты, связанные с обеспечением качества и надежности работы РЭС в реальных условиях эксплуатации.

1. РАСЧЕТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

1.1. Статический расчет амортизаторов

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

Расчет начинают с нахождения положения центра масс блока. Для каждого функционального узла и крупных деталей, входящих в блок, находят положение центра масс. Обычно считают, что для таких изделий положение центра масс функционального узла или детали совпадает с центром симметрии (рис. 1.1).

Используя моменты первого рода, находят координаты центра масс блока:

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

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

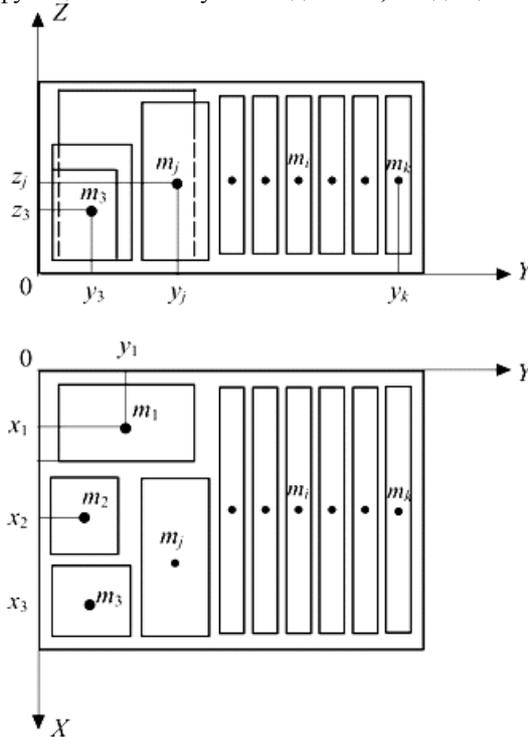


Рис. 1.1. К определению положения центра масс блока

2. Наиболее часто используют вариант симметричного расположения амортизаторов на блоке РЭС (рис. 1.2). Амортизаторы располагают на блоке таким образом, чтобы проекции амортизаторов на плоскость XY не выходили за контур проекции блока.

Определяют координаты центра жесткости (ЦЖ) 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_{ii} – координаты размещения амортизаторов; $\sum c_{xi}, \sum c_{yi}, \sum c_{zi}$ – суммарная статическая жесткость амортизаторов в направлении соответствующих координат; $\sum c_{xi}x_i, \sum c_{yi}y_i, \sum c_{zi}z_i$ – статические моменты жесткости амортизаторов относительно координатных плоскостей.

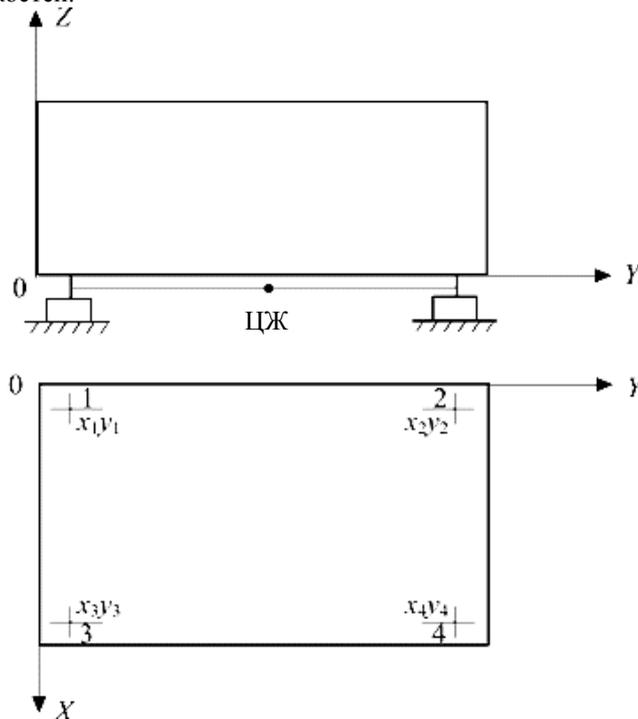


Рис. 1.2. Схема расположения амортизаторов на блоке РЭС

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:

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

4. Задаваясь координатами размещения амортизаторов, получают систему из 4 линейных уравнений

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

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 разной и, следовательно, осадка однотипных амортизаторов будет различна. Для устранения перекоса блока вводят выравнивающие прокладки между амортизатором и корпусом блока.

7. Осадка амортизаторов

$$\delta_{z_1} = p_1 c_{z_1}; \quad \delta_{z_2} = p_2 c_{z_2}; \quad \delta_{z_3} = p_3 c_{z_3}; \quad \delta_{z_4} = p_4 c_{z_4}.$$

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

$$\Delta_{np} = \delta_{z_i} - \delta_{z_{i \min}},$$

где Δ_{np} – толщина выравнивающей прокладки под соответствующий амортизатор.

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

1.2. Резонансные частоты блока на амортизаторах

Расчет резонансных частот блока может быть произведен только после определения и выбора типоразмеров амортизаторов, т.е. после проведения статического расчета амортизации. Из проведенного расчета определяется положение (координаты) центров тяжести и жесткости блока, при этом могут встретиться три варианта:

- центр масс и центр жесткости разнесены;
- центр масс и центр жесткости лежат на одной вертикали;
- центр масс и центр жесткости совпадают.

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

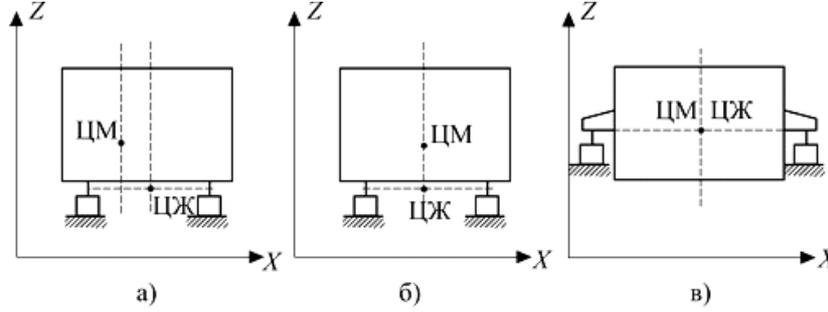


Рис. 1.3. Взаимное расположение центров масс и жесткости:
a – ЦМ и ЦЖ разнесены; *б* – ЦМ и ЦЖ лежат на оси *Z*; *в* – ЦМ и ЦЖ совпадают

1. Расчет начинают с определения координат расположения центра масс (нахождение координат центра масс в разделе 1.1). Исходя из условий эксплуатации и с учетом 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 расчетной модели (рис. 1.3, *a*) приводит к необходимости решения системы из 6 линейных дифференциальных уравнений, из которой находят 6 резонансных частот, при этом частоты оказываются взаимосвязанными.

Система исходных расчетных выражений 1-й модели:

$$m\ddot{x} + \sum c_x x + \sum c_x \varphi_y - \sum c_x y \varphi_z = 0; \quad (1)$$

$$m\ddot{y} + \sum c_y y + \sum c_y z \varphi_x - \sum c_y x \varphi_z = 0; \quad (2)$$

$$m\ddot{z} + \sum c_z z + \sum c_z y \varphi_x - \sum c_z x \varphi_y = 0; \quad (3)$$

$$J_x \ddot{\varphi}_x - J_{xy} \ddot{\varphi}_y - J_{xz} \ddot{\varphi}_z - \sum c_y zy + \sum c_z yz + \sum (c_z y^2 + c_y z^2) \varphi_x - \sum c_z xy \varphi_y - \sum c_y xz \varphi_z = 0; \quad (4)$$

$$-J_{xy} \ddot{\varphi}_x + J_y \ddot{\varphi}_y - J_{yz} \ddot{\varphi}_z + \sum c_x zx - \sum c_z xz + \sum (c_z z^2) \varphi_y - \sum c_z xy \varphi_x - \sum c_x yz \varphi_z = 0; \quad (5)$$

$$-J_{xz} \ddot{\varphi}_x + J_{yz} \ddot{\varphi}_y + J_z \ddot{\varphi}_z - \sum c_x yx - \sum c_y xy + \sum (c_z y^2 + c_y x^2) \varphi_z - \sum c_y xz \varphi_x - \sum c_x yz \varphi_y = 0, \quad (6)$$

где c_x, c_y, c_z – упругая жесткость 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 6 частот собственных колебаний: 3 линейных и 3 вращательных. Данная система допускает решения, отличные от нуля, если ее определитель равен нулю.

Решение системы находят в виде:

$$\delta_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi); \delta_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi); \delta_3 = A_3 \cos(\omega t + \varphi);$$

$$\delta_4 = A_4 \cos(\omega t + \varphi); \delta_5 = A_5 \cos(\omega t + \varphi); \delta_6 = A_6 \cos(\omega t + \varphi).$$

Подставляя эти выражения в исходные уравнения (1) – (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 жесткости лежат на одной вертикали, кроме того, использованы амортизаторы одного типоразмера, у которых упругая жесткость по X и Y одинакова, то при выполнении этих условий расчетная модель соответствует варианту 2.

Система дифференциальных уравнений распадается на 2 уравнения независимых и 4 попарно связанных:

$$m\ddot{z} + \sum c_z z = 0; \quad (7)$$

$$J_z \ddot{\varphi}_z + \sum (c_x y^2 + c_y x^2) \varphi_z = 0; \quad (8)$$

$$m\ddot{x} + \sum c_x x + \sum c_x z \varphi_y = 0; \quad (9)$$

$$J_y \ddot{\varphi}_y + \sum c_x z x + \sum (c_x z^2 + c_z x^2) \varphi_y = 0; \quad (10)$$

$$m\ddot{y} + \sum c_y y - \sum c_y z \varphi_x = 0; \quad (11)$$

$$J_x \ddot{\varphi}_x - \sum c_y z y + \sum (c_y y^2 + c_y z^2) \varphi_x = 0. \quad (12)$$

Из уравнений (7) и (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 (9) и (10) находят еще две частоты ω_3 и ω_4 , решая биквадратное уравнение:

$$\omega_{3,4}^4 - a_1 \omega_{3,4}^2 + b_1 = 0,$$

где
$$a_1 = \frac{\sum (c_x z^2 + c_z x^2)}{J_y} + \frac{\sum c_x}{m};$$

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

Из уравнений (11) и (12) находят частоты ω_5 и ω_6 , решая биквадратное уравнение:

$$\omega_{5,6}^4 - a_2 \omega_{5,6}^2 + b_2 = 0,$$

где
$$a_2 = \frac{\sum (c_z y^2 + c_y z^2)}{J_x} + \frac{\sum c_y}{m};$$

$$b_2 = \frac{(\sum c_y) \sum (c_z y^2 + c_y z^2) + (\sum c_y z)^2}{m J_x}.$$

Если расчетная схема удовлетворяет требованиям 3-го варианта, т.е. к перечисленным условиям добавить, что амортизаторы расположены симметрично и центр жесткости совпадает с центром масс, то система уравнений распадается на 6 независимых частот собственных колебаний:

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

$$\omega_4 = \sqrt{\frac{\sum (c_z y^2 + c_y z^2)}{J_x}};$$

$$\omega_5 = \sqrt{\frac{\sum (c_x z^2 + c_z x^2)}{J_y}};$$

$$\omega_6 = \sqrt{\frac{\sum (c_x y^2 + c_y x^2)}{J_z}}.$$

Используя полученные выражения, находят собственные частоты колебаний блоков.

Абсолютно совместить центр жесткости 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 жесткости совпадают, если разнос между ними не превышает 10 мм, но при меньших размерах блоков эту величину пропорционально уменьшают.

1.3. Упаковочная тара для транспортирования

Упаковочная тара должна гарантировать сохранность РЭС при ее перевозке любыми транспортными средствами. Контейнер для транспортировки изготавливают из недорогих материалов (металл, слоистое стекловолокно и дерево). Между жесткой оболочкой тары и поверхностью РЭС прокладывают упругие амортизационные прокладки, гасящие вибрационные и ударные нагрузки при транспортировке (рис. 1.4).

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

$$P = f(z).$$

Амортизирующие прокладки могут быть упругие (табл. 1.1) и неупругие. Первые полностью восстанавливают свою толщину после снятия приложенной нагрузки. В неупругих прокладках наблюдается остаточная деформация, поэтому они являются прокладками разового использования.

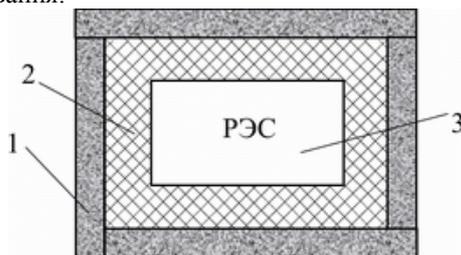


Рис. 1.4. Схема упаковочной тары:

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

Таблица 1.1

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	20	0,3...0,4
	1,87	30	0,3...0,4
	2,68	140	0,3...0,4

Исходные данные

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

Последовательность расчета

1. Восстанавливающая сила после удара, которая вызовет в прокладке механическое напряжение, Н/см²

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

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

$$U = mg(H + z).$$

3. Потенциальная энергия, полностью переходящая в энергию деформации прокладки

$$U = VT_v = ShT_v,$$

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

4. Расчетная толщина прокладки

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

Обозначая $\sigma/T_v = \Theta$ и с учетом (1), получаем толщину прокладки

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

5. Для приближенных расчетов удобно пользоваться выражением

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

Отсюда 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. 1.5).

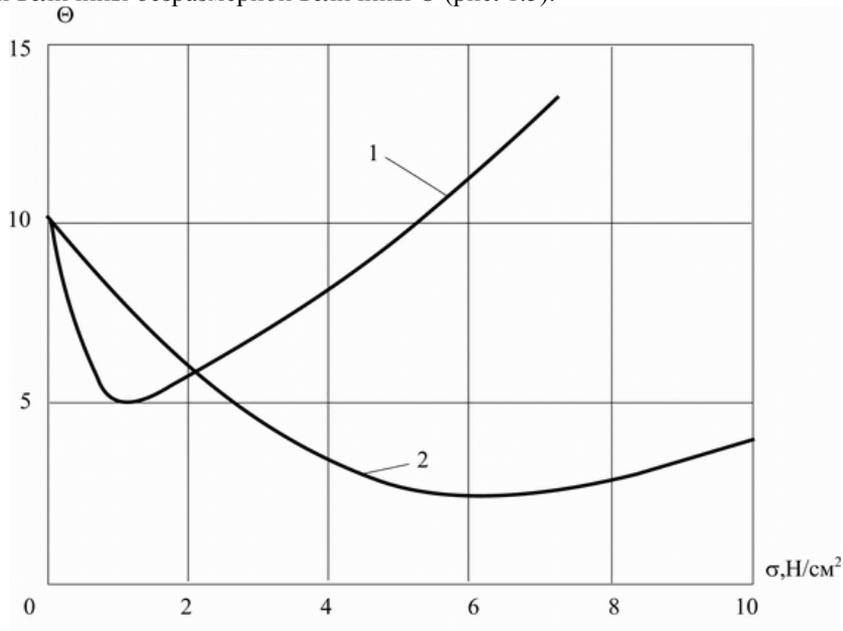


Рис. 1.5. Зависимость $\Theta = f(\sigma)$ для поролона и губчатой резины:

1 – поролон ($\rho = 0,033 \text{ г/см}^3$); 2 – губчатая резина ($\rho = 0,127 \text{ г/см}^3$)

1.4. Ударная прочность элементов

Большинство элементов конструкций РЭС могут быть представлены пластинами или балками. К пластинам можно отнести стенки кожухов или корпусов блоков, шасси, печатные платы, т.е. такие элементы, у которых размеры длины и ширины одного порядка, а толщины значительно меньше. К балкам можно отнести элементы каркаса стоек, блоков, рамки кассет и др., т.е. такие элементы конструкций у которых 2 размера поперечного сечения много меньше протяженности этого элемента.

Исходные данные

a, b, h – геометрические размеры платы; a – большая сторона, м;

m_n – масса платы, кг;

E – модуль упругости материала платы, Н/м²;

ρ – плотность материала платы, кг/м³;

$n_{уд}$ – перегрузка при ударе;

τ – длительность ударного импульса, с.

Последовательность расчета

1. Амплитуда ускорения при ударе

$$a_{\max} = n_{уд}g,$$

где g – ускорение силы тяжести.

2. Величина скорости в начальный момент удара

$$v_0 = a_{\max}\tau$$

или эквивалентная высота падения

$$H = v_0^2 / 2g.$$

3. Частота свободных колебаний f_{01} (первой гармоники), Гц,

$$f_{01} = \frac{Ch}{a^2} K_M K_3 \cdot 10^5,$$

где $K_M = \sqrt{E_c \rho_c / E_n \rho_n}$, E_n, E_c – модули упругости материала платы и стали; $K_3 = \sqrt{1/(1+m_3/m_n)}$, m_3, m_n – массы элементов и масса платы.

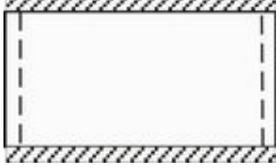
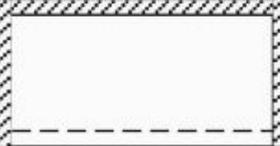
При свободном опирании по контуру и отношении, ($a/b \approx 1$) частотная постоянная

$$C = \frac{\alpha_1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m_n + m_3}},$$

где $D = \frac{Eh^3}{12 \cdot (1-\varepsilon^2)}$ цилиндрическая жесткость; ε – коэффициент Пуассона (для большинства материалов $\varepsilon = 0,3$); α_1 – коэффициент, зависящий от краевых условий закрепления пластины.

Некоторые схемы закрепления плат и формулы для расчета α_1 приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

№	Схема закрепления	Формула для расчета α_1
1		$\alpha_1 = 9,87(1 + \beta^2)$, где $\beta = a/b$
2		$\alpha_1 = 22,37\sqrt{1 + 0,48\beta^2 + 0,19\beta^4}$
3		$\alpha_1 = 9,87\sqrt{1 + 0,57\beta^2 + 5,14\beta^4}$
4		$\alpha_1 = 22,372\sqrt{1 + 0,549\beta^2 + 0,475\beta^4}$
5		$\alpha_1 = 15,42\sqrt{1 + 1,19\beta^2 + 2,1\beta^4}$
6		$\alpha_1 = 22,37\sqrt{1 + 0,61\beta^2 + \beta^4}$

4. Жесткость платы

$$K = (2\pi f_{01})^2 m_n.$$

5. Статический прогиб платы

$$Z_{ст} = (m_n + m_3) g / K.$$

6. Максимальный прогиб платы при ударе

$$Z_{max} = \sqrt{Z_{ст}^2 + (V_0 / 2\pi f_{01})^2}.$$

7. Полная динамическая деформация платы

$$Z_d = Z_{ст} + Z_{max}.$$

8. Эквивалентная сила удара

$$P_{уд} = K Z_d.$$

9. Расчетный коэффициент запаса

$$n = n_1 n_2 n_3,$$

где n_1 – запас прочности; n_2 – степень ответственности детали; n_3 – однородность механических свойств материала.

Рекомендуется коэффициенты выбирать в пределах: $n_1 = 1,25 \dots 1,5$; $n_2 = 1,0 \dots 1,5$; $n_3 = 1,2 \dots 3,0$. (при большем коэффициенте запаса выбирают большие значения коэффициентов).

10. Допустимое напряжение в материале платы

$$\sigma_{доп} = \sigma_n / n,$$

где σ_n – предельное допустимое напряжение в материале.

11. Изгибающий момент, действующий на плату

$$M_n = P_{уд} a / 4.$$

12. Момент инерции сечения платы

$$J = b h^3 / 12.$$

13. Момент сопротивления изгибу пластины

$$W = J / (0,5 h).$$

14. Напряжение, возникающее в материале платы

$$\sigma_n = M_n / W.$$

15. Сравнивают расчетное значение σ_n в материале платы с допустимым значением $\sigma_{доп}$ для данного материала (с учетом коэффициента запаса). Если выполняется условие $\sigma_n \leq \sigma_{доп}$, конструкция способна выдержать действующую ударную нагрузку. В случае $\sigma_n > \sigma_{доп}$ необходимо принять меры по увеличению жесткости платы (увеличить толщину, ввести ребра жесткости, изменить материал платы и пр.).

Расчет балочных конструкций проводится по той же схеме, только при определении частоты собственных колебаний балки следует воспользоваться выражением

$$f = \frac{\lambda_i^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho F}},$$

где λ_i – корень частотного уравнения, характеризующий форму колебаний и способ крепления концов балки: $\lambda_i = i\pi$ (для балки с шарнирным креплением концов), $\lambda_i = (2i - 1)\pi/2$ (консольное крепление балки), $\lambda_i = (2i + 1)\pi/2$ (жесткое крепление концов балки); i – номер тона колебаний.

Если на балке имеются сосредоточенные массы m_i , то расчетная масса m

$$m = m_0 + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n x_i m_i,$$

где l – длина балки; x_i – расстояние от начала координаты (точка крепления балки) до соответствующей массы m_i .

1.5. Вибропрочность 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 счет возникновения инерционных сил, действующих на установленный элемент, приподнятый над поверхностью платы на высоту h (рис. 1.6).

2. За счет деформации печатной платы в условиях возникновения механического резонанса (рис. 1.7).

Расчет времени до разрушения вывода за счет резонансных явлений ЭРЭ

Установка ЭРЭ над поверхностью печатной платы сводится к расчетной модели (рис. 1.8).

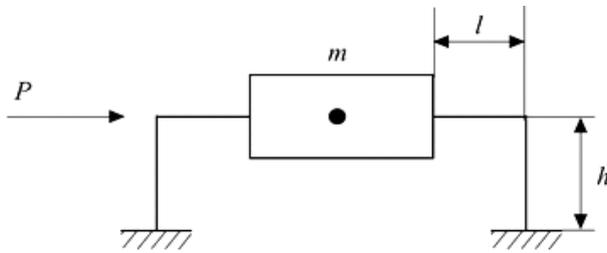


Рис. 1.6. Элемент над поверхностью печатной платы

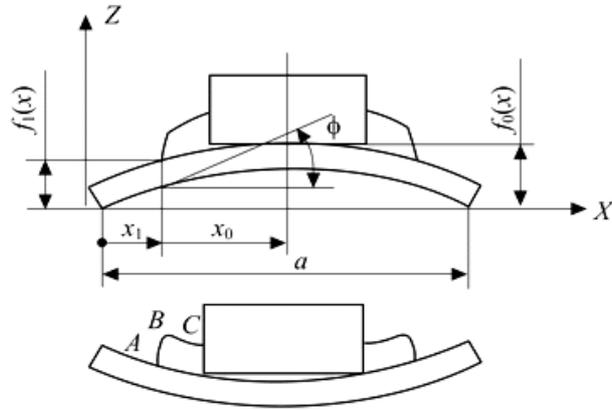


Рис. 1.7. Элемент прижат к плате (изгиб выводов ЭРЭ при деформации платы)

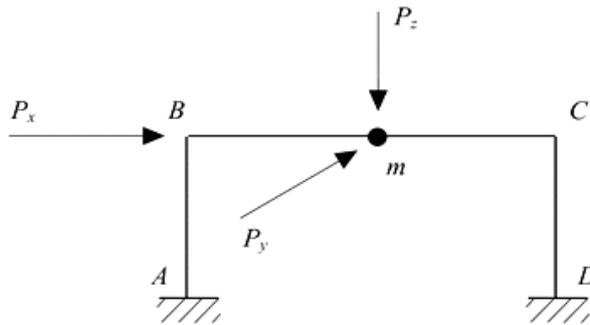


Рис. 1.8. Расчетная модель для элемента, установленного над поверхностью печатной платы

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 расчета

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

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

- 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

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

упрощенно декремент затухания можно найти через коэффициент β_0 (для механических систем величина $\beta_0 = 0,02 \dots 0,025$), 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 ее необходимо разложить на составляющие P_x , P_y и P_z и провести расчет по всем этим силам.

5. Изгибающие моменты в точках изгиба выводов (рис. 1.8):

в направлении X

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

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

в направлении Y

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

в направлении Z

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

6. Напряжения в точках A и B :

$$\sigma_A = \sigma_D = \frac{M_A d}{2J}; \quad \sigma_B = \sigma_C = \frac{M_B d}{2J}.$$

7. Число циклов до разрушения (рис. 1.9).

8. Время работы вывода в условиях резонанса до разрушения.

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

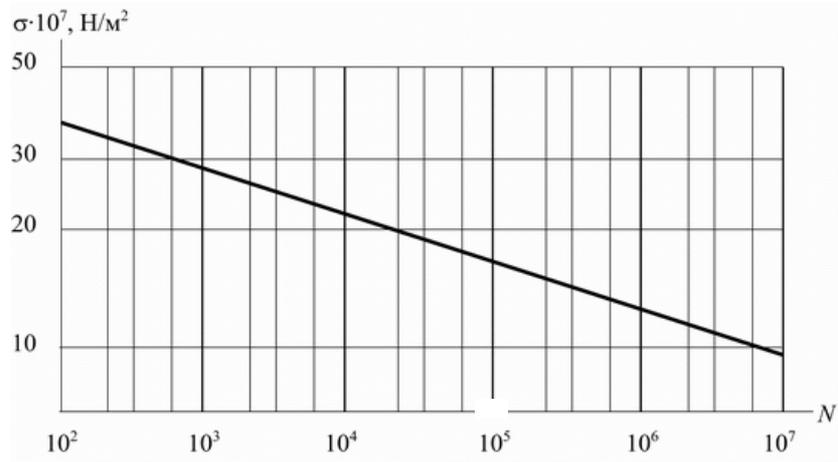


Рис. 1.9. Кривая усталости холоднокатаной медной проволоки

Расчет 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_n – модуль упругости материала платы, Н/м²;
 μ – коэффициент Пуассона;
 z_0 – амплитуда возбуждающих колебаний, м.

Последовательность расчета

Будем считать, что ЭРЭ расположен в центре печатной платы (рис. 1.10) и его ось направлена по координате X .

1. Собственная частота колебаний

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

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.

2. Коэффициент механических потерь

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

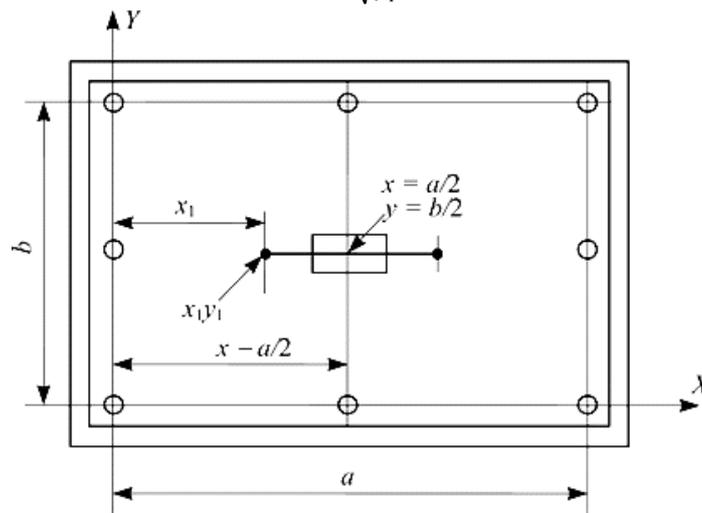


Рис. 1.10. Схема расположения ЭРЭ на плате

3. Прогиб в центре платы при резонансе (рис. 1.11) (при $x = a/2$ и $y = b/2$):

$$W(x) = \frac{K_1(\zeta_x, \zeta_y)}{\gamma} Z_0,$$

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

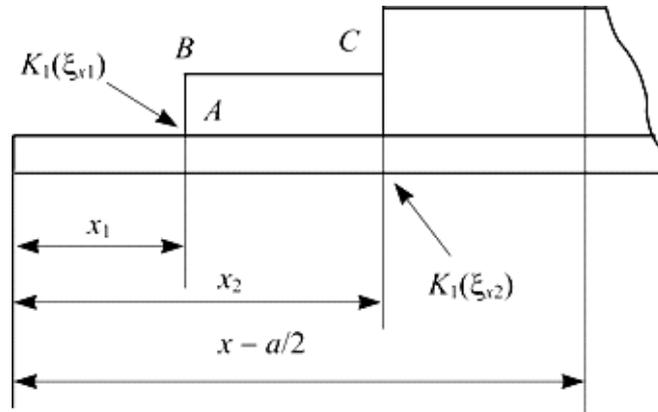


Рис. 1.11. К определению параметров K_1 и K_2

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

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

5. Деформация выводов за счет 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

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

6. Изгибающие моменты в точках A , B и C (рис. 1.12) складываются из изгибающего момента за счет линейного перемещения точки A при деформации платы и момента возникающего за счет поворота точки крепления элемента на угол φ :

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

$$M_B = M_{Bf} + M_{B\varphi} = \frac{3EJ_f}{(1+k)hl} + \frac{2EJ_\varphi}{(1+k)l};$$

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

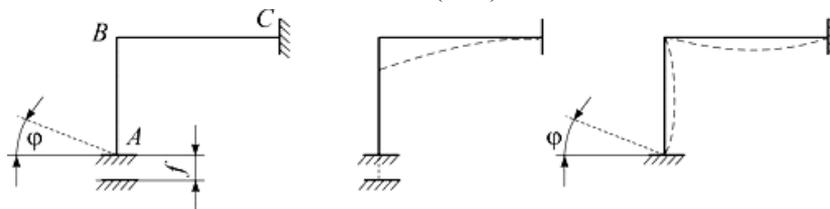


Рис. 1.12. Изгибающие моменты в выводе ЭРЭ за счет деформации платы и угла поворота φ

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. 1.9).
Время работы элемента в условиях вибрации печатной платы

$$t_p = N_p / f_1.$$

2. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ

2.1. Температура нагретой зоны одиночного блока

Приведенный расчет справедлив для одиночных блоков в РЭС, имеющих геометрические размеры в пределах 600 мм по трем 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 нем 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 расчет будет справедлив 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, Вт;

L_1, L_2, L_3 – (D, H) – геометрические размеры блока прямоугольной формы (в виде цилиндра), м;

l_1, l_2, l_3 – размеры нагретой зоны, м;

t_c – температура окружающей среды, °С.

Последовательность расчета

1. Размеры нагретой зоны. Для кассет или ячеек, объединенных в единый блок, размеры нагретой зоны определяются максимальными размерами этого блока. Если в качестве несущего элемента используется шасси с расположенными на нем крупногабаритными элементами, то размеры нагретой зоны будут: два измерения совпадают с размерами шасси, а третье определяется суммой высот шасси (h) и высотой средних размеров элементов, расположенных с одной и другой сторон шасси (h_1 и h_2).

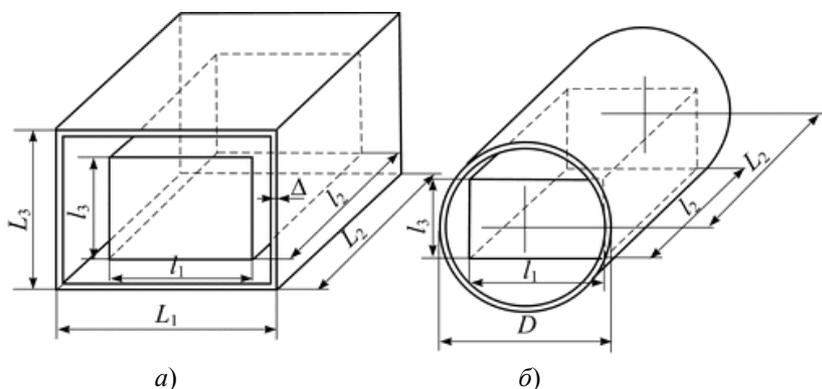


Рис. 2.1. Модели блоков:

a – прямоугольной; b – цилиндрической формы

Средняя высота элементов

$$h_{1,2} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{l_1 l_2},$$

где K_i – высота i -го элемента на поверхности шасси; l_1, l_2 – размеры шасси; n – количество элементов с одной стороны шасси.

Высота нагретой зоны

$$l_3 = h + h_1 + h_2.$$

2. Площади боковой (S_6), верхней ($S_в$) и нижней ($S_н$) стенок блока

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

Область 1 расположена над нагретой зоной, область 2 под нагретой зоной, а область 4 между боковой поверхностью нагретой зоны и кожухом.

3. Площади нагретой зоны, обращенные в области 1, 2 и 4

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

4. Приведенная степень черноты нагретой зоны в областях 1 и 2

$$\varepsilon_{п1} = \left[\frac{1}{\varepsilon_3} + \left(\frac{1}{\varepsilon_k} - 1 \right) \frac{S_3}{S_k} \right]^{-1},$$

где $\varepsilon_3, \varepsilon_k$ – степени черноты зоны и кожуха.

Приведенная степень черноты нагретой зоны в области 4

$$\varepsilon_{п4} = \varepsilon_3 \varepsilon_k,$$

так поступают в силу того, что размеры нагретой зоны, обращенной 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 ϵ_n .

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

$$t_{\text{вых}}^I = 2t_2^I - t_{\text{вн}}^I,$$

где L_4 – толщина корпуса блока (если блок имеет тонкостенный кожух, то толщину L_4 можно не учитывать).

6. Задаются температурой перегрева кожуха (Δt_k). Для блоков, имеющих мощность тепловыделения 100...200 Вт при размерах 300...400 мм, температура перегрева кожуха лежит в пределах 10...15 °С. Температура кожуха $t_k = t_c + \Delta t_k$.

Определяющая температура $t_m = (t_k + t_c)/2$.

7. Для большинства одиночных блоков РЭС, имеющих небольшую мощность тепловыделения, конвективный теплообмен подчиняется закону 1/4 степени, исходя из этого предположения находят коэффициент теплоотдачи α_k для всех наружных поверхностей кожуха

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

где β – коэффициент объемного расширения, K^{-1} ; g – ускорение силы тяжести, m/c^2 ; $P_r = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля; ν – кинематическая вязкость, m^2/c ; a – коэффициент температуропроводности, m^2/c ; λ – теплопроводность, $Вт/(м \cdot К)$; t_i – температура i -й грани кожуха; L – определяющий размер, м: для вертикально ориентированной поверхности – высота, для горизонтально ориентированной поверхности – меньшая сторона; N – коэффициент ориентации нагретой поверхности: для вертикальной стенки $N = 1$, для нагретой поверхности, обращенной вниз, $N = 0,7$ и вверх $N = 1,3$.

Для воздуха

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

где значения A_1 находят из следующих данных для воздуха (см. таблицу)

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

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

8. Коэффициент лучеиспускания

$$\alpha_n = \epsilon_n \varphi_{12} f(t_1 t_2);$$

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

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

9. Полные коэффициенты теплоотдачи с поверхности кожуха

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

10. Тепловая проводимость кожуха в окружающую среду

$$\sigma_k = \alpha_{\text{в}} s_{\text{в}} + \alpha_{\text{н}} s_{\text{н}} + \alpha_{\text{б}} s_{\text{б}}.$$

11. Температура нагретой зоны в первом приближении

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

12. Расчетная мощность нагретой зоны в предположении, что кожух имеет перегрев Δt_k (выбранный)

$$P^I = \sigma_k (t_k - t_c),$$

на этом расчет в первом приближении заканчивается.

Расчет во втором приближении предполагает определение тепловой проводимости от нагретой зоны к кожуху более точно.

13. Поскольку область 1, замкнутая, используют конвективно-кондуктивный коэффициент

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

где k_i – конвективно-кондуктивные коэффициенты верхней и боковой воздушной прослойки между нагретой зоной и внутренней поверхностью кожуха; h_i – толщина воздушной прослойки между нагретой зоной и кожухом в соответствующей области; $l = \sqrt{l_1 l_2}$ – для верхней области; $l = \sqrt{l_3 l_2}$ и $l = \sqrt{l_3 l_1}$ – для боковых областей нагретой зоны и кожуха.

Если расстояние между нагретой зоной и кожухом меньше 3 мм, то конвекция отсутствует и в этой области передача тепла будет

$$k = \lambda_b/h.$$

В области, расположенной под нагретой зоной и кожухом, конвекция всегда отсутствует, и теплопередача определяется теплопроводностью воздуха (среды). Значения A_2 для воздуха находят их следующих данных.

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

Величину $f(h_i/l)$ находят из графика (рис. 2.2).

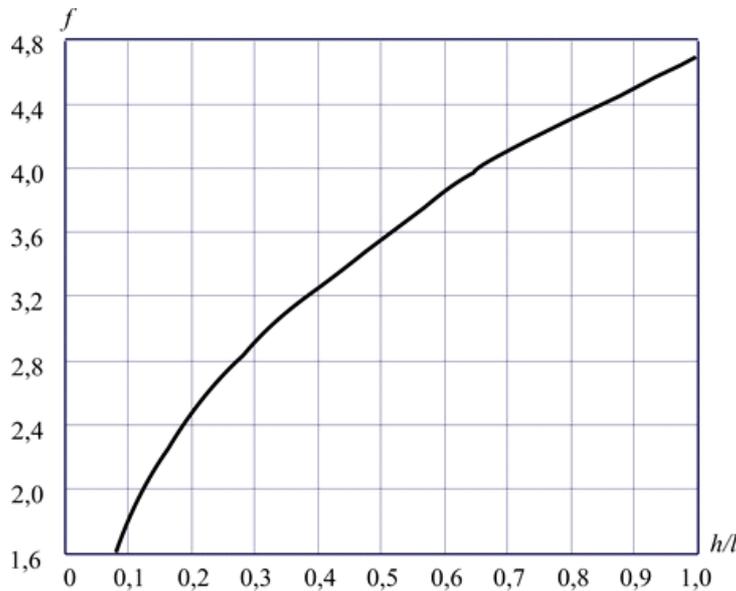


Рис. 2.2. К расчету конвективно-кондуктивного коэффициента

14. Определяют лучистую составляющую коэффициента теплопередачи областей 1, 2 и 4 для воздушного зазора между боковой поверхностью нагретой зоны и кожухом, при этом величина приведенной степени черноты полученная при расчете в первом приближении сохраняется, а коэффициент взаимной облученности принимается равным единице, температура нагретой зоны берется равной температуре, полученной при расчете в первом приближении.

Получают величины $\alpha_{л1}$; $\alpha_{л2}$; $\alpha_{л4}$.

15. Полные коэффициенты теплопередачи всех областей для нагретой зоны, расположенной горизонтально

$$K_1 = k_1 + \alpha_{л1}; K_4 = k_4 + \alpha_{л4}; K_2 = \lambda_2/h_{н} + \alpha_{л2}.$$

Для нагретой зоны, ориентированной вертикально, коэффициенты теплопередачи

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

16. Температура 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 расчете в первом приближении; σ_3 – тепловая проводимость от нагретой зоны к кожуху, рассчитанная во втором приближении; σ_k – тепловая проводимость от кожуха в окружающую среду полученная при расчете в первом приближении.

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

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

Получают одну точку тепловой характеристики блока $\Delta t_3 = f(P)$ и $\Delta t_k = f(P)$ (рис. 2.3). Второй точкой будет начало координат. Для получения третьей точки задаются другим значением температуры перегрева кожуха и проводят расчет заново. По трем полученным точкам строят характеристики $\Delta t_3 = f(P)$ и $\Delta t_k = f(P)$. Искомые температуры кожуха и зоны находят по этим характеристикам при мощности фактически рассеиваемой в блоке (P_n).

Если температура оказывается выше допустимой для элементов блока, то решают вопрос о применении другого вида охлаждения блока, например, введение жалюзи или перфорации.

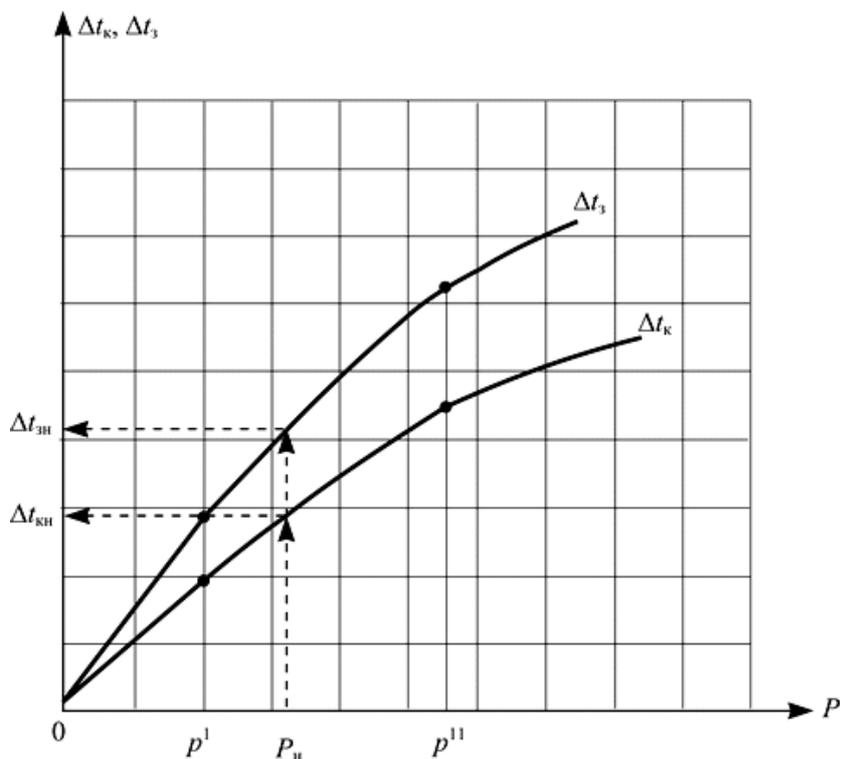


Рис. 2.3. Тепловые характеристики

2.2. Температура перегрева перфорированного блока

Для увеличения интенсивности теплоотвода кожух блока перфорируют либо в нем делают жалюзи. При равной площади перфорационных отверстий и жалюзи, последние пропускают несколько меньший поток воздуха. Необходимо иметь в виду, что при перфорированном кожухе внутренний объем 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 нем крупногабаритными теплоизлучающими элементами. Предполагается, что шасси имеет отверстия для прохода воздуха.

Блок состоит из ряда кассет или ячеек расположенных горизонтально или вертикально.

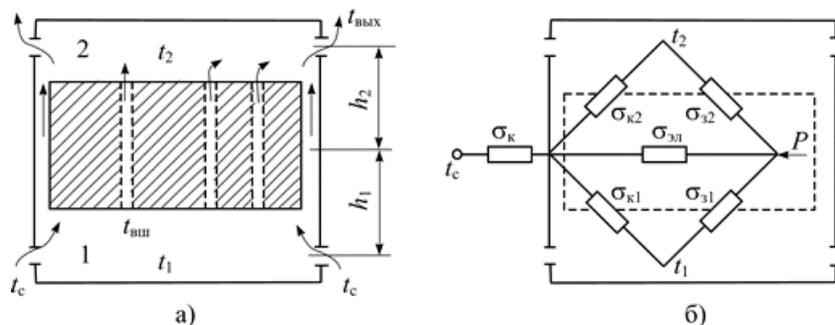


Рис. 2.4. Тепловые модели блока:

а – расчетная модель блока;

б – эквивалентная схема тепловых проводимостей

Для шасси с крупногабаритными элементами и кассет, расположенных вертикально или горизонтально, размеры нагретой зоны определяются как и в случае «герметичного» блока.

Исходные данные

P – суммарная мощность тепловыделения в блоке, Вт;
 L_1, L_2, L_3 – геометрические размеры блока, м;
 $s_1, s_2, s_{ш}$ – площади отверстий кожуха в областях 1, 2 и шасси; м²;
 t_c – температура окружающей среды.

Последовательность расчета

1. Расчет начинают с предположения, что кожух не имеет вентиляционных отверстий, т.е. блок «герметичный». Строят тепловые характеристики по методике расчета температуры нагретой зоны одиночного блока (рис. 2.5).

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

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

и по графику рис. 2.5 находят мощность P_k , соответствующую этому перегреву.

3. Задаются коэффициентом $\alpha_{3к}^I$ от зоны к кожуху (рекомендуется величину $\alpha_{3к}^I$ в первом приближении выбирать равной (5 ± 1) , Вт/м² · К).

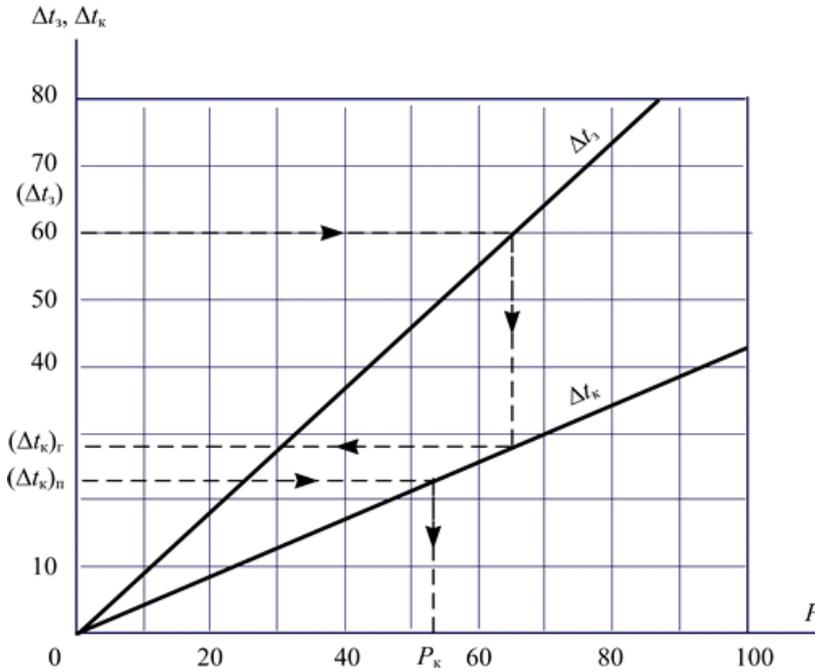


Рис. 2.5. К определению температуры перегрева

4. Мощность теплоотвода от зоны к кожуху за счет лучеиспускания

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

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

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

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

где $a = 2 \cdot (S_{31} + S_{к1}) - \frac{S_{к1}}{S_{к2}} (S_{32} + S_{к2} - S_{31} - S_{к1})$; $S_{31}, S_{32}, S_{к1}, S_{к2}$ – поверхности нагретой зоны и кожуха в соответствующих областях;

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

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

$$D = S_{к} \frac{t_k}{S_{к2}} - \frac{P_{3л} - P_k}{\alpha_{3к}^I S_{к2}};$$

$$c = DA_1 + [A - (S_{32} + S_{K2}) D] t_c .$$

Из двух значений температур выбирают наименьшее, чтобы выполнялось условие, $t_1^I \leq t_2^I$, т.е. температура воздуха в первой области (нижней) всегда ниже, чем во второй (верхней).

6. Температура воздуха во второй области в первом приближении

$$t_2^I = D - \frac{S_{K1} t_1^I}{S_{K2}} .$$

7. Температура воздуха вблизи отверстий шасси или каналов между вертикальными кассетами

$$t_{\text{вш}}^I = 2t_1^I - t_c .$$

8. Температура воздуха на выходе из кожуха (из области 2)

$$t_{\text{вых}}^I = 2t_2^I - t_{\text{вш}}^I .$$

9. Количество протекающего воздуха через блок

$$G^I = s_1 \mu_1 T_c \rho_c \sqrt{2g} \sqrt{\frac{\frac{h_1 + h_2}{T_c} - \frac{h_1}{T_1} - \frac{h_2}{T_2}}{T_c + \left(\frac{s_1 \mu_1}{s_2 \mu_2}\right)^2 T_2 + \left(\frac{s_1 \mu_1}{s_{\text{ш}} \mu_{\text{ш}}}\right)^2 T_1}} ,$$

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; $\mu_1, \mu_2, \mu_{\text{ш}}$ – 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. 2.1); T_1, T_2, T_c – абсолютные температуры соответствующих областей.

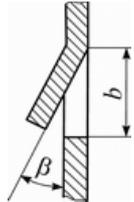
10. По графику (рис. 2.6) уточняют коэффициент теплоотдачи α^{II} .

Масса воздуха, заполняющего блок, при температуре 20 °С

$$G_0 = V_{\text{бл}} K_3 \rho_v ,$$

где $V_{\text{бл}}$ – внутренний объем блока; K_3 – коэффициент заполнения блока ($K_3 = V_{\text{дет}}/V_{\text{бл}}$); ρ_v – плотность воздуха при температуре 20 °С.

Таблица 2.1

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	

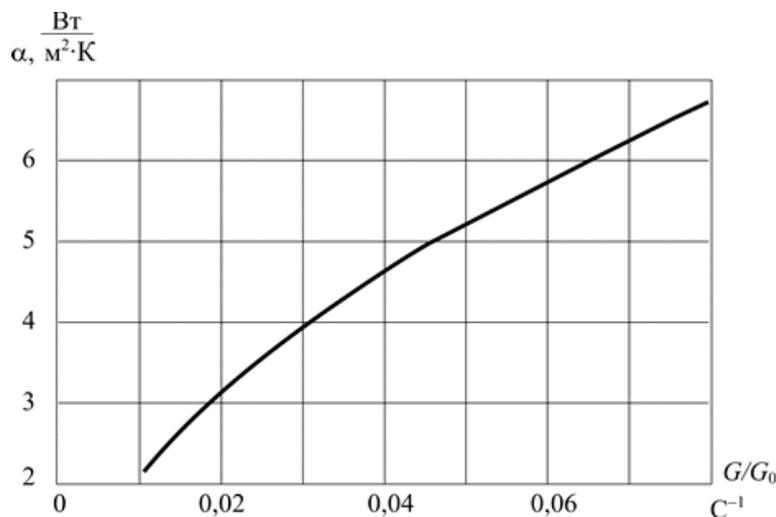


Рис. 2.6. Коэффициент теплопередачи

11. По уточненному значению α^{II} повторяют расчет во втором приближении, при этом принимают температуру зоны (t_3), температуру кожуха (t_k), мощность $P_{\text{зл}}$ (получена по п. 4) и P_k (получена из графика рис. 2.5 при перегреве кожуха на Δt_k) оставляют неизменными.

12. В результате расчета во втором приближении находят температуры t_1^{II} , t_2^{II} , $t_{\text{вых}}^{\text{II}}$ и G^{II} . Находят величину отношения G^{II}/G_0 и по графику (рис. 2.6) уточняют значение α^{III} .

13. Мощность, рассеиваемая блоком, во втором приближении

$$P^{\text{II}} = P_k + 2G^{\text{II}}C_p (t_2^{\text{II}} - t_1^{\text{II}}).$$

14. Температура $t_k^{\text{II}*}$ во втором приближении

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

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

$$t_k^{\text{III}} = t_k^{\text{II}} - 0,1 \cdot (t_k - t_k^{\text{II}})$$

По найденной температуре t_k^{III} по графику (рис. 2.5) находят мощность, рассеиваемую кожухом блока, в третьем приближении P_k^{III} .

16. Находят значение функции температур $f(t_3, t_k^{\text{III}})$ и определяют $P_{\text{зл}}^{\text{III}}$. Уточняют величину D^{III} с учетом $(P_{\text{зл}}^{\text{II}} - P_k^{\text{III}})$. P_k^{III} получена из графика при температуре t_k^{III} . Рассчитывают t_1^{III} , t_2^{III} , $t_{\text{вых}}^{\text{III}}$ и находят G^{III} .

17. По полученным данным из графика (рис. 2.6) находят α^{III} . Мощность, рассеиваемая блоком, в третьем приближении

$$P^{\text{III}} = P_k^{\text{III}} + 2G^{\text{III}}C_p (t_2^{\text{III}} - t_1^{\text{III}}).$$

18. Температура кожуха в третьем приближении

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

19. Окончательное значение температуры кожуха t_k и рассеиваемой мощности (P) в блоке:

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

Полученные в результате расчета мощность P и соответствующая ей температура t_k наносятся на график рис. 2.4. 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.

2.3. Температура элементов блока с принудительным охлаждением

В блоках аппаратуры, построенных по кассетному принципу, удельная мощность тепловыделения оказывается весьма большой, что заставляет разработчиков использовать воздушное принудительное охлаждение (рис. 2.7). Воздух под напором вентилятора нагнетается в блок через входное отверстие, омывает тепловыделяющие элементы и через выходное отверстие выбрасывается наружу.

Предполагают, что тепловыделение всех микросхем одинаково. Микросхемы располагаются на печатных платах, входящих в кассеты. Кассеты расположены вдоль воздушного потока и расстояние между ними не менее 3 мм. Для обеспечения равенства сечений воздушных каналов в блоке имеются выравнивающие заслонки.

Исходные данные

- P_3 – мощность, выделяемая всеми элементами блока, Вт;
- N_n – число печатных плат в блоке;
- n – число микросхем в блоке;
- L_y и L_z – внутренние размеры кожуха по координатам Y и Z ;
- h_n – толщина печатной платы;
- l_y – ширина печатной платы;
- l_{y_1} и l_{z_1} – размеры элемента (микросхемы).

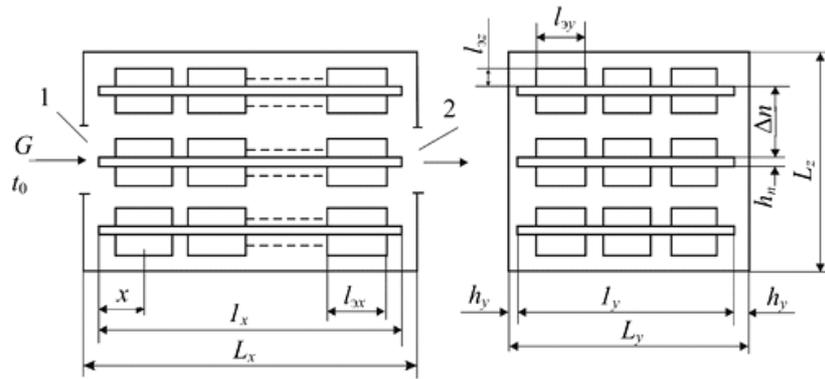


Рис. 2.7. Схема блока кассетной конструкции с принудительным воздушным охлаждением:
1 – входное; 2 – выходное отверстие

Последовательность расчета

1. Задаются объемным расходом воздуха G .
2. Площадь среднего поперечного сечения воздушного канала на расстоянии x от входного отверстия

$$S_x = L_y L_z - h_n l_n N_n - \sum_{i=1}^{2N_n} l_{zyi} l_{zxi} n_{yi} .$$

3. Число Рейнольдса

$$Re_3 = \frac{Gl'}{\nu S_x} .$$

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

4. Коэффициент теплоотдачи i -й микросхемы

$$\alpha_3 = 0,8 \frac{\lambda_b}{l'} \sqrt{Re_3} .$$

5. Перегрев воздуха, протекающего вблизи микросхемы, расположенной на расстоянии x от начала платы

$$\vartheta_{вз} = \frac{\sum_{i=1}^m P_{3i}}{1000G\rho} ,$$

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

6. Перегрев воздуха за счет тепловыделения одного дискретного элемента

$$\vartheta_3 = \vartheta_{вз} + \frac{P_3}{\alpha_3 S_3} ,$$

где S_3 – площадь поверхности элемента, омываемая воздушным потоком.

Температура поверхности корпуса элемента

$$t_3 = t_0 + \vartheta_3 ,$$

где t_0 – температура воздушного потока на входе блока.

7. Средний перегрев воздуха на выходе блока

$$t_{в} = \frac{\sum P_3}{1000G\rho} .$$

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

2.4. Расчет радиатора полупроводникового прибора

Исходные данные

$t_{п.макс}$ – максимальная температура перехода;

$R_{\text{вн}}$ – внутреннее тепловое сопротивление прибора;

$P_{\text{рас}}$ – мощность рассеиваемая прибором;

t_c – температура окружающей среды;

$R_{\text{кт}}$ – контактное сопротивление прибор – теплосток (величина $R_{\text{кт}}$ лежит в пределах 0,1...1,0 град/Вт).

Последовательность расчета

1. Мощность рассеяния прибора при заданных условиях

$$t_{\text{вых}}^I = 2t_2^I - t_{\text{вн}}^I,$$

где $R_{\text{тс}}$ – тепловое сопротивление теплосток (радиатор) – среда. Необходимо выполнить условие $P_{\text{max}} \leq P_{\text{рас}}$.

2. Тепловое сопротивление теплосток – среда

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

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

3. Среднеповерхностная температура перегрева радиатора (рис. 2.8)

$$t - t_c = P_{\text{рас}}R_{\text{тс}}.$$

4. По Δt (рис. 2.9) находят минимальную высоту радиатора L_{min} .

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

6. Расстояние между ребрами

$$b = \frac{L_{\text{min}} - \delta n}{n - 1},$$

где n и δ – число и толщина ребра.

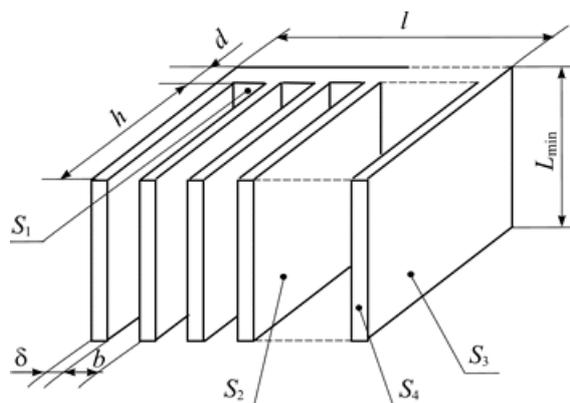


Рис. 2.8. Односторонний ребристый радиатор

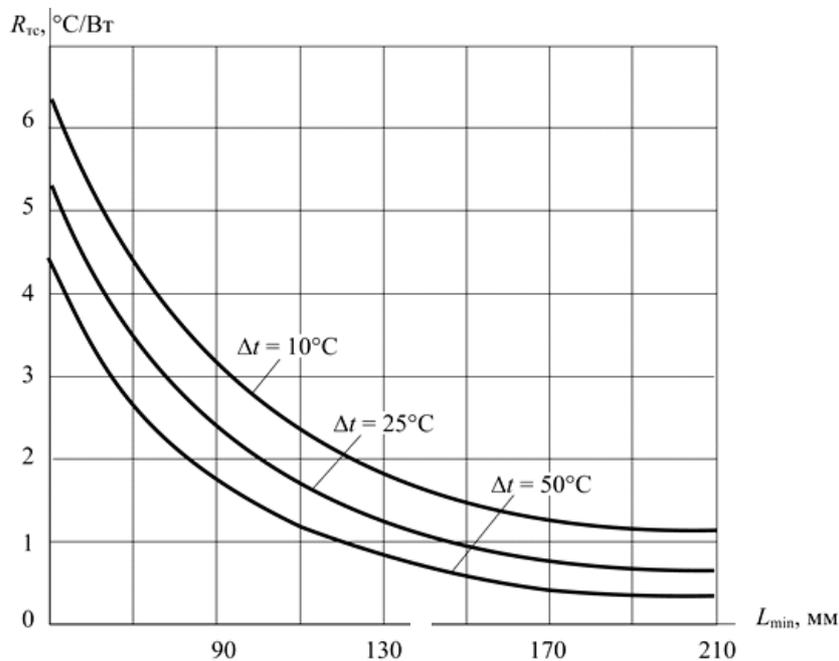


Рис. 2.9. Изменение сопротивления $R_{тс}$ от размера ребра радиатора и $\Delta t_c = 50^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 0,9$; $\delta = 0,2$ см; $h = 30$ мм

Расстояние между ребрами 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

$$\frac{\delta}{h^2} > \frac{\alpha}{\lambda},$$

где h – высота ребра; α – суммарный коэффициент теплоотвода; λ – теплопроводность материала радиатора. Ширину радиатора l определяют из конструктивных соображений, считая $l \approx 0,9L_{min}$:

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

Материалы для радиаторов

Материалы	γ , кг/м ³	λ , Вт/(м·°C)
Медь	8960	370
Сплавы алюминия	2660	160
Сплавы магния	1760	170
Сталь	7840	55
Нержавеющая сталь	7840	14

Степень черноты поверхностей некоторых материалов

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

7. Целесообразность оребрения радиатора определяется по критерию Био

$$B_i = 0,5\alpha\delta/\lambda,$$

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

8. Вся поверхность радиатора разбивают на части:

S_1 – поверхность между ребрами;

S_2 – поверхность ребер, обращенная друг к другу;

S_3 – поверхность крайних ребер;

S_4 – поверхность торцов ребер;

S_5 – неоребренная поверхность.

Неоребренная поверхность $S_5 = lL$.

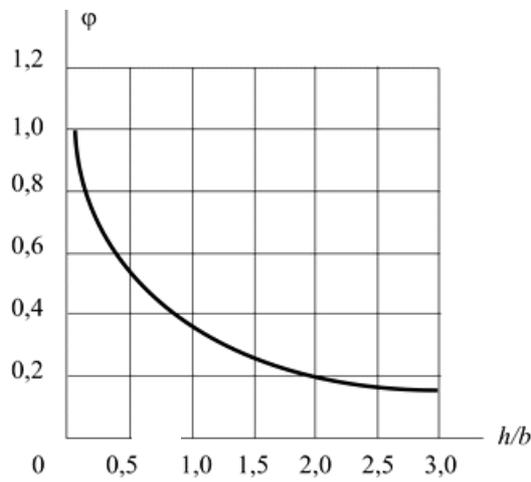


Рис. 2.10. Коэффициент взаимной облученности

Оребренная поверхность

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

9. Полные коэффициенты теплоотдачи оребренной и неоребренной поверхностей

$$\alpha_{\text{гл}} = \alpha_{\text{л,гл}} + \alpha_{\text{к,гл}}; \alpha_{\text{ореб}} = \alpha_{\text{л,ореб}} + \alpha_{\text{к,ореб}}; \alpha_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{п}} \varphi_{ij} f(t_{\text{T}}, t_{\text{c}}).$$

Для поверхностей S_1 и S_2 коэффициенты взаимной облученности определяются из графика (рис. 2.10) или рассчитываются

$$f(t_{\text{T}}, t_{\text{c}}) = 5,67 \cdot [(t_{\text{T}} + 273)^4 - (t_{\text{c}} + 273)^4] \cdot 10^{-8} \cdot (t_{\text{T}} - t_{\text{c}})^{-1}.$$

Конвективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(см² · °С)

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

$$B = \left(\frac{t_{\text{T}} - t_{\text{c}}}{L_{\min}} \right)^{1/4},$$

где

$$t_{\text{м}} = 0,5 \cdot (t_{\text{T}} + t_{\text{c}}).$$

Величина $A(t_{\text{м}})$ учитывает свойства среды и находится по графику (рис. 2.11).

Влияние атмосферного давления на величину $A(t_{\text{м}})$ находят из графика рис. 2.12.

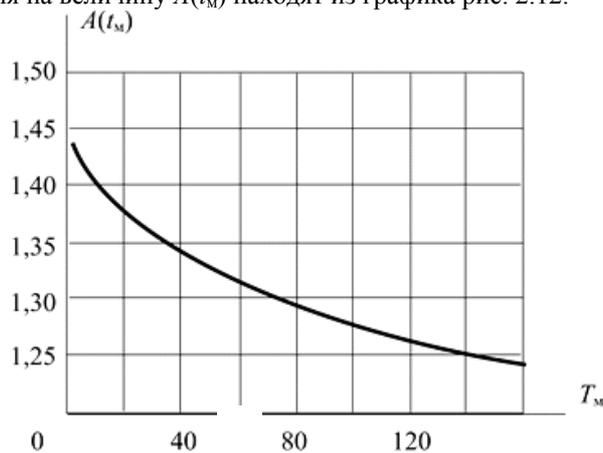


Рис. 2.11. Зависимость $A = f(T_{\text{м}})$

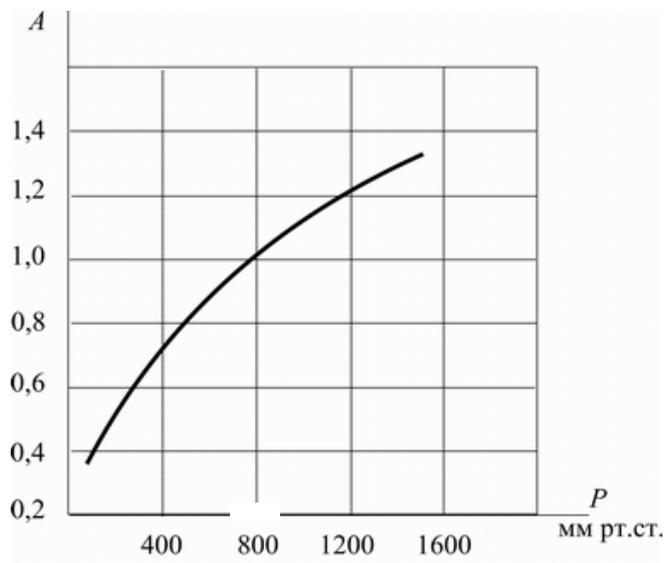


Рис. 2.12. Зависимость A от атмосферного давления

10. Мощность, рассеиваемая гладкой поверхностью радиатора, Вт,

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

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

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

12. Мощность, рассеиваемая оребренной поверхностью

$$P_0 = \sum P_i = \sum S_i [\alpha_{\text{ик}} (t_{\text{иТ}} - t_{\text{иС}}) + \alpha_{\text{ин}} (t_{\text{иГ}} - t_{\text{с}})],$$

где P_i – мощность, рассеиваемая i -й поверхностью; $t_{\text{иС}}$ – температура среды между ребрами.

Температура воздуха вблизи поверхностей S_3 ; S_4 и S_5 равна $t_{\text{с}}$.

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

$$t_{\text{иС}} = t_{\text{г}} - (t_{\text{г}} - t_{\text{с}}) H,$$

где H – относительный температурный напор; $t_{\text{г}}$ – среднеповерхностная температура теплостока.

Если ребра располагаются вертикально, то

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

где $\eta = A_4(t_{\text{м}})bC$, $t_{\text{м}} = 0,5 \cdot (t_{\text{г}} + t_{\text{с}})$, $C = (t_{\text{г}} - t_{\text{с}})^{1/4}/(L)^{1/4}$ (рис. 2.13 и 2.14). $t_{\text{сi}} = t_{\text{с}}$ для S_3 , S_4 , S_5 . $t_{\text{сi}} = t_{\text{иС}}$ для S_1 и S_2 (конвективный коэффициент торцевых поверхностей ребер принимается равным крайним ребрам).

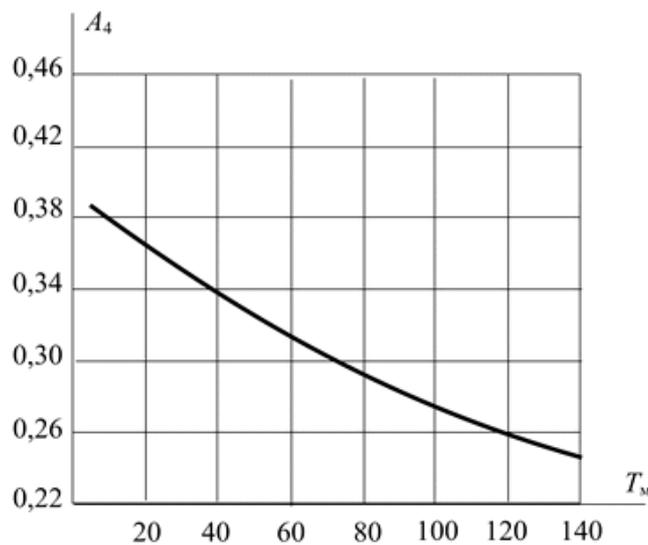


Рис. 2.13. Зависимость $A_4 = f(T_{\text{м}})$ от средней температуры

Тепловое сопротивление оребренной поверхности, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$

$$R_{\text{тс}}^I = \frac{t_{\text{т}} - t_{\text{с}}}{P_{\text{ореб}}}$$

Общее тепловое сопротивление

$$R_{\text{тс}}^{\text{расч}} = \frac{R_{\text{тс}}^I R_{\text{тс}}^{\text{II}}}{R_{\text{тс}}^I + R_{\text{тс}}^{\text{II}}}$$

Мощность, рассеиваемая радиатором, Вт

$$P_{\text{общ,расч}} = P_{\text{гл}} + P_{\text{ореб}}$$

Необходимо выполнить условие $P_{\text{общ,расч}} \geq P_{\text{исх,расч}}$

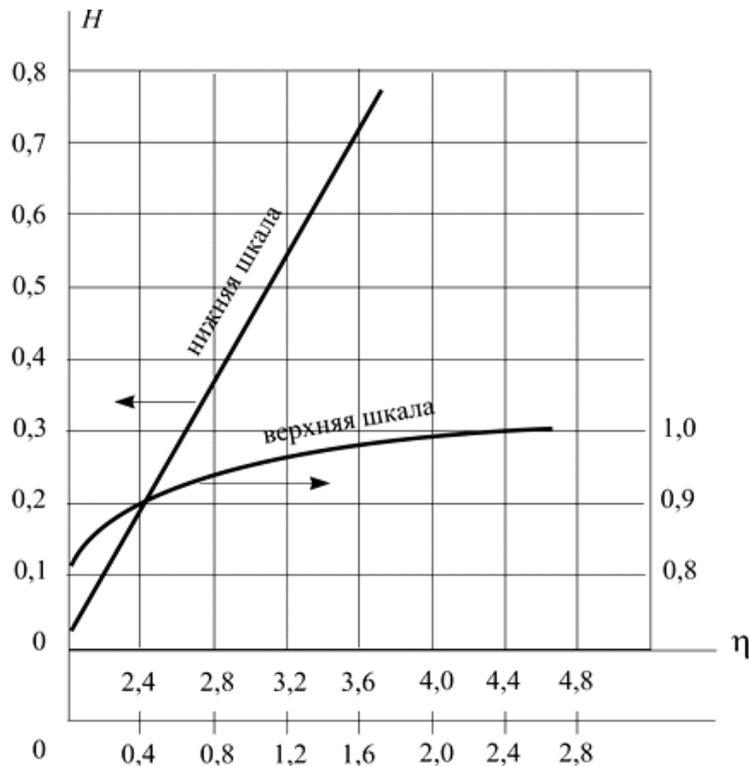


Рис. 2.14. Зависимость $H = f(\eta)$

Радиатор с двухсторонним оребрением

Расчет двухстороннего оребренного радиатора производится по тем же формулам, что и расчет односторонне оребренного радиатора. При этом неоребренную поверхность основания радиатора S_3 замещают соответствующими поверхностями ребер. Для установки полупроводникового прибора на радиаторе, часть ребер должны быть удалены. Это учитывается соответствующим уменьшением площади оребренной поверхности.

Радиатор типа пластины

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

3. РАСЧЕТЫ ЭКРАНИРОВАНИЯ

3.1. Эффективность экранирования

Расчет эффективности экранирования некоторой области внутри структурного образования РЭС зависит от характера электромагнитного поля. Известно, что вблизи источника излучения (при расстояниях менее 5λ) поле не сформировано и может преобладать либо магнитная, либо электрическая составляющие поля. В этом случае расчет экранирования сводится к определению ослабления электрической либо магнитной составляющей поля. В дальней зоне (при расстояниях более 5λ) поле сформировано, и задача экранирования решается относительно электромагнитного поля.

В общем случае ослабление поля, вносимое металлическим экраном, дБ:

$$A_3 = 8,6 \ln [ch(K_M t)] + \ln \left[1 + 0,5 \cdot \left(\frac{Z_{\text{II}}}{Z_{\text{M}}} + \frac{Z_{\text{M}}}{Z_{\text{II}}} \right) \text{th}(K_M t) \right],$$

где K_M – коэффициент вихревых токов, $K_M = \sqrt{j\omega\mu_a\sigma}$; Z_{II} – волновое сопротивление среды:

$$Z_{II}^E = \frac{1}{j\omega\epsilon_a r_3}, \text{ (электрическое поле), } Z_{II}^H = j\omega\mu_a r_3, \text{ (магнитное поле);}$$

$$Z_M = \frac{j\omega\mu_a}{K_M} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_a}{\sigma}} - \text{ волновое сопротивление материала экрана;}$$

ω – частота поля (рад/с);

$\mu_a = \mu\mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость среды или материала экрана;

μ – относительная магнитная проницаемость;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная свободного пространства;

σ – электрическая проводимость экрана (1/Ом);

$\epsilon_a = \epsilon\epsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды или материала, $\epsilon_0 = 10^7/(4c^2)$;

c – скорость света в вакууме ($c = 2,997925$ м/с), $\epsilon_0 = 8,85416$ (пФ/м);

r_3, t – радиус и толщина экрана, м.

Ослабление в области низких частот (до 10^4 Гц) в ближней зоне, дБ:

электрического поля

$$A_3^E = 8,6 \ln \left| 1 + \frac{1}{2} Z_{II}^E \sigma t \right|;$$

магнитного поля

$$A_3^H = 8,6 \ln \left| 1 + \frac{Z_M}{2Z_{II}^H} K_M t \right| = 8,6 \ln \left| 1 + \frac{\mu t}{2r_3} \right|;$$

Ослабление в области низких частот в дальней зоне (при $l > 5\lambda$) плоской волны магнитным экраном, дБ:

$$A_3^{EH} = 8,6 \ln \left| 1 + \frac{1}{2} Z_0 \sigma t \right|.$$

Для расчета ослабления полей в области частот более 10^4 Гц необходимо воспользоваться общим выражением ослабления полей (A_3).

Ослабление экраном постоянного магнитного поля

$$S = \frac{H_{63}}{H_3} = 0,22\mu_0 \left[1 - \left(1 - \frac{t}{r_0} \right)^3 \right],$$

где H_{63} – напряженность поля без экрана; H_3 – напряженность поля с экраном; μ_0 – относительная магнитная проницаемость экрана; t – толщина экрана; r_0 – радиус эквивалентной сферы, объем которой равен объему экрана.

4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗАИМОЗАМЕЯМОСТИ

4.1. Определение полей допусков размерной цепи методом максимума-минимума

Расчет размерной цепи методом максимума-минимума применяется при индивидуальном и мелкосерийном производстве, проектировании единичных приспособлений. При использовании этого метода исходят из того, что все детали, входящие в сборочную единицу, имеют предельные максимальные или минимальные отклонения от номиналов и сборку производят при самом неблагоприятном сочетании размеров деталей.

Поверочный расчет (задача анализа) линейной размерной цепи методом максимума-минимума состоит в определении номинального и среднего значений размеров замыкающего звена, предельных отклонений и предельной погрешности или допуска размера замыкающего звена.

Номинальное значение размера замыкающего звена

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \bar{N}_i - \sum_{j=1}^n \bar{N}_j. \quad (4.1)$$

Среднее значение замыкающего звена

$$N_{\Sigma cc} = \sum_{i=1}^m \left(\bar{N}_i \right)_{cp} - \sum_{j=1}^n \left(\bar{N}_j \right)_{cp}. \quad (4.2)$$

Максимальное (минимальное) значение размера замыкающего звена линейной размерной цепи можно получить, подставив в (4.2) вместо номинальных размеров составляющих звеньев максимальные (минимальные) размеры всех увеличивающих звеньев и минимальные (максимальные) уменьшающих:

$$N_{\Sigma \max} = \sum_{i=1}^m (\overline{N}_i)_{\max} - \sum_{j=1}^n (\overline{N}_j)_{\min}; \quad (4.3)$$

$$N_{\Sigma \min} = \sum_{i=1}^m (\overline{N}_i)_{\min} - \sum_{j=1}^n (\overline{N}_j)_{\max}. \quad (4.4)$$

Предельные верхнее $(\Delta_B)_\Sigma$ и нижнее $(\Delta_H)_\Sigma$ отклонения размера замыкающего звена от номинального, выраженные через верхние и нижние отклонения размеров составляющих звеньев, определяются как разность предельных размеров замыкающего звена и номинального размера:

$$(\Delta_B)_\Sigma = N_{\Sigma \max} - N_\Sigma = \sum_{i=1}^m (\overline{\Delta}_B)_i - \sum_{j=1}^n (\overline{\Delta}_H)_j; \quad (4.5)$$

$$(\Delta_H)_\Sigma = N_{\Sigma \min} - N_\Sigma = \sum_{i=1}^m (\overline{\Delta}_H)_i - \sum_{j=1}^n (\overline{\Delta}_B)_j. \quad (4.6)$$

Предельная величина погрешности размера замыкающего звена равна разности между его максимальным и минимальным значениями:

$$\begin{aligned} \Delta N_\Sigma = N_{\Sigma \max} - N_{\Sigma \min} &= \left[\sum_{i=1}^m (\overline{N}_i)_{\max} - \sum_{i=1}^m (\overline{N}_i)_{\min} \right] + \\ &+ \left[\sum_{j=1}^n (\overline{N}_j)_{\max} - \sum_{j=1}^n (\overline{N}_j)_{\min} \right] = \sum_{i=1}^{m+n} \Delta N_i, \end{aligned}$$

где ΔN_i – погрешности размеров составляющих звеньев.

Заменив в (4.7) погрешности размеров составляющих звеньев допусками на них, можно перейти к уравнению допуска замыкающего звена.

При расчете размерной цепи методом максимума-минимума значение допуска замыкающего звена равно сумме абсолютных значений допусков составляющих звеньев

$$\Delta_\Sigma = \sum_i^{m+n} \Delta_i. \quad (4.8)$$

При расчете размерных цепей, как правило, оперируют с половинами полей допусков δ и средними значениями отклонений Δ_{cp} , которые определяются из соотношений:

$$\delta = \frac{\Delta}{2} = \frac{\Delta_B - \Delta_H}{2}; \quad (4.9)$$

$$\Delta_{\text{cp}} = \frac{\Delta_B + \Delta_H}{2}. \quad (4.10)$$

Выражения (4.9) и (4.10) позволяют решить задачу поверочного расчета размерной цепи, когда известными являются не предельные размеры составляющих звеньев, а их предельные отклонения.

В этом случае расчет размерной цепи ведется в следующем порядке.

1. По формулам (4.9) и (4.10) определяются половины полей допусков составляющих звеньев δ_i и средние значения отклонений размеров составляющих звеньев $\Delta_{i \text{cp}}$ от номинального.

2. Половина поля допуска размера замыкающего звена из (4.8)

$$\delta_\Sigma = \sum_{i=1}^{m+n} \delta_i. \quad (4.11)$$

3. Среднее значение отклонения размера замыкающего звена от номинального из (4.5) и (4.6) с учетом (4.10)

$$\Delta_{\Sigma \text{cc}} = \frac{(\Delta_B)_\Sigma + (\Delta_H)_\Sigma}{2} = \sum_{i=1}^m \overline{\Delta}_{i \text{cp}} - \sum_{j=1}^n \overline{\Delta}_{j \text{cp}}. \quad (4.12)$$

4. Допуск размера замыкающего звена

$$\Delta_\Sigma = 2\delta_\Sigma.$$

5. Предельные отклонения размера замыкающего звена:

$$(\overline{\Delta}_B)_{\Sigma \text{cp}} = \Delta_{\Sigma \text{cp}} + \delta_\Sigma, (\overline{\Delta}_H)_{\Sigma} = \Delta_{\Sigma \text{cc}} - \delta_\Sigma.$$

6. Размеры замыкающего звена

$$N_{\Sigma \max} = N_\Sigma + (\Delta_B)_\Sigma, N_{\Sigma \min} = N_\Sigma + (\Delta_H)_\Sigma.$$

Проектный расчет размерных цепей заключается в том, что по заданному номинальному значению замыкающего звена и допуску на него определяют номинальные размеры и рациональные допуски на составляющие звенья.

Решение задачи проектного расчета (синтеза допусков) идет в следующей последовательности.

7. Задаются номинальный N_{Σ} и предельные $N_{\Sigma_{\max}}$ и $N_{\Sigma_{\min}}$ размеры замыкающего звена, по которым согласно (4.7) определяют заданную величину поля допуска размера замыкающего звена Δ_{Σ} и его половину δ_{Σ} .

8. Заданные значения предельных отклонений из (4.5), (4.6): $(\Delta_B)_{\Sigma}$ и $(\Delta_H)_{\Sigma}$.

9. Заданное значение среднего отклонения размера замыкающего звена $\Delta_{\Sigma_{\text{cp}}}$ из (4.12).

Заданный допуск замыкающего звена распределяется между составляющими звеньями цепи в соответствии с равенством (4.8).

10. Исходя из полученных допусков на размеры составляющих звеньев и технологии изготовления деталей назначают предельные отклонения размеров составляющих звеньев $(\Delta_B)_i$ и $(\Delta_H)_i$.

11. Средние значения отклонений находят из (4.9) и (4.10).

12. По полученным значениям Δ_i с помощью (4.12) определяют расчетную величину среднего отклонения размера замыкающего звена $\Delta_{\Sigma_{\text{cp}}}$, которая сравнивается с заданной $\Delta_{\Sigma_{\text{cp}}}$. При несовпадении сравниваемых величин в значение Δ_i вносятся необходимые изменения и производится повторный расчет $\Delta_{\Sigma_{\text{cp}}}$. Вычисления продолжают до равенства расчетной и заданной $\Delta_{\Sigma_{\text{cp}}}$.

Достоинством метода максимума-минимума является его сравнительная простота. Однако, если учесть, что в большинстве случаев рассеивание размеров деталей в пределах поля допуска соответствует нормальному закону распределений, то предельные размеры имеют лишь незначительное количество деталей, и при большом количестве деталей в сборочном соединении вероятность неблагоприятного сочетания размеров весьма мала. Следовательно, применение метода максимума-минимума в известной мере ограничено, так как в большинстве случаев он экономически не оправдан.

4.2. Определение полей допусков размерной цепи вероятностным методом

Использование вероятностного метода нахождения допусков составляющих звеньев размерной цепи наибольший эффект имеет при серийном производстве и при числе звеньев цепи более 5. Этот метод позволяет расширить поля допусков составляющих звеньев не расширяя допуск замыкающего звена.

При массовом производстве отклонения размеров изготавливаемых деталей подчиняется закону нормального распределения. Если отклонения размеров от нормальной величины лежат в пределах $\pm 3\sigma$ (σ – среднее квадратическое отклонение), то 99,7 % деталей всей партии будут иметь отклонения в этих пределах и только 0,3 % деталей выйдут за пределы $\pm 3\sigma$. Вероятность того, что все детали в процессе сборки будут иметь отклонения одного знака за пределами $\pm 3\sigma$, ничтожно мала и не приведет к появлению брака. Если отклонения от нормальной величины лежат в пределах $\pm 2\sigma$, то 95,6 % изготовленных деталей будут находиться в этом интервале.

Для вычисления среднее квадратического отклонения удобно пользоваться следующим выражением

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}},$$

где \bar{x} – математическое ожидание случайной величины \bar{x}_i ; n – количество деталей одного типоразмера в партии.

На практике встречаются две задачи: первая, когда известна размерная цепь и отклонения составляющих звеньев, требуется рассчитать отклонение замыкающего размера, и вторая, когда по известному отклонению замыкающего размера необходимо определить отклонения составляющих звеньев.

Прямая задача

Известны размерная цепь и отклонения составляющих ее звеньев. Найти допуск замыкающего звена.

1. Решают вопрос о допустимом проценте выхода годных изделий из партии (3σ , 2σ или σ). Эти отклонения независимы и подчиняются нормальному закону распределения.

2. Положим, что отклонения составляющих звеньев лежат в пределах 3σ , тогда $\Delta X_1 = 3\sigma_1$, $\Delta X_2 = 3\sigma_2$, ..., $\Delta X_n = 3\sigma_n$.

3. Среднее квадратическое отклонение замыкающего звена

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\Delta x_1}{3}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_2}{3}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta x_n}{3}\right)^2}.$$

4. Отклонение замыкающего звена $\Delta x = 3\sigma$.

Обратная задача

Часто приходится решать задачу, когда задан допуск замыкающего звена и необходимо найти допуски деталей, составляющих размерную цепь.

1. Составляют размерную цепь из известных составляющих звеньев

$$X_{\text{зам}} = X_1 + X_2 + \dots + X_n.$$

2. Решают вопрос о вероятности выхода годных составляющих звеньев.
3. Нормированный параметр

$$a = \frac{K_i \Delta X}{K \sqrt[3]{\sqrt{X_1^2} + \sqrt{X_2^2} + \dots \sqrt{X_n^2}}},$$

где $K_i = 1; 2$ или 3 .

Если для замыкающего звена и составляющих его звеньев величины отклонений приняты одинаковыми (3σ , 2σ или σ), то

$$a = \frac{\Delta X}{\sqrt[3]{\sqrt{X_1^2} + \sqrt{X_2^2} + \dots \sqrt{X_n^2}}}.$$

4. Допуски составляющих звеньев

$$\Delta X_1 = a \sqrt[3]{X_1^2}, \dots, \Delta X_n = a \sqrt[3]{X_n^2}.$$

Использование вероятностного метода назначения допусков целесообразно при крупносерийном производстве и тогда, когда число составляющих звеньев размерной цепи больше 4.

5. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА

5.1. Классификация показателей качества

Оценить качество конструкции – значит определить его уровень в сравнении с другим, лучшим образцом среди иных. Уровень качества всегда относителен. Качеством конструкции называется не одно, а совокупность свойств конструкции, обуславливающих ее способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением.

При оценке качества конструкции будем пользоваться показателями качества – количественными характеристиками одного или нескольких свойств, составляющих качество конструкции, причем каждая характеристика рассматривается применительно к определенным условиям производства и эксплуатации конструкции.

Итак, уровень качества конструкции – относительная характеристика, основанная на сравнении показателей качества оцениваемой конструкции с их базовыми значениями (выбранными для сравнения).

Показатели качества конструкции в зависимости от характера решаемых задач по оценке уровня качества классифицируются по различным признакам (табл. 5.1).

5.1. Классификация показателей качества конструкции

Признак	Группа показателей
Характеризуемые свойства	Показатели: назначения (классификационные, эксплуатационные, конструктивные) надежности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость) безопасности, эргономические, эстетические технологичности (трудоемкость, материалоемкость, себестоимость); унификации; патентно-правовые
Способ выражения	Показатели, выраженные в: натуральных единицах, кг, м и т.п. стоимостных единицах, р. относительных единицах
Число характеризуемых свойств	Показатели: единичные комплексные (групповые, обобщенные, интегральные)
Применение оценки качества	Показатели: базовые относительные

5.2. Комплексная оценка качества конструкции РЭС

Качество готового изделия характеризуется качеством конструкции (или, что то же, техническим уровнем изделия) и качеством изготовления. Если изделие не имеет дефектов производства, то его уровень качества совпадает с качеством конструкции. Здесь будем рассматривать именно этот интересующий нас случай.

Уровень качества конструкции (УКК) оценивается в три этапа: 1) выбор номенклатуры показателей качества конструкции для конкретного случая; 2) подбор аналогов и выбор базового изделия; 3) заполнение карты технического уровня и качества продукции и расчет УКК.

Выбор номенклатуры показателей качества конструкции основан на выполнении двух условий: число показателей должно быть минимальным, обеспечивающим необходимую точность при малой трудоемкости расчетов; показатели качества и приданные им весовые коэффициенты должны быть выбраны применительно к конкретному случаю. Предпочтительно

выбирать показатели, характеризующие простые свойства, потому что комплексные показатели сложных свойств накапливают при оценке элементы субъективизма, вносимые через весовые коэффициенты.

Как ранее неоднократно отмечалось, оценить что-либо – значит сравнить с аналогом. Аналогом называют реально существующую конструкцию отечественной или зарубежной разработки того класса, обладающую сходностью назначения (ГОСТ 2.116–71). Могут быть аналоги по конструкции в целом и по составным частям. Особую важность имеет корректность выбора аналога, основанная на сходности назначения аналога и оцениваемого изделия.

Базовым изделием называют лучшее изделие из числа аналогов, показатели которого оптимальны на данный период, а их техническая реализуемость подтверждена реальным существованием базового изделия. Совокупность показателей базового изделия называют базовыми показателями. При разработке принципиально нового класса изделий бывают случаи, когда нет удовлетворительных аналогов. Тогда за базовые показатели принимают заданные и технически реализуемые перспективные параметры.

Заполнение карты технического уровня и качества продукции и расчет УКК производятся одновременно. Расчет УКК основан на сравнении показателей свойств оцениваемой конструкции с базовыми показателями для установления частного уровня качества конструкции по данному свойству (частный УКК). Для расчета частного УКК в тех случаях, когда повышение качества конструкции характеризуется уменьшением показателя (показатели массы, габаритов, трудоемкости, энергопотребления и др.), применяют формулу

$$\text{УКК}_i = \frac{B_i}{P_j}; \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, n_1,$$

где УКК_i – частный уровень качества конструкции, оцениваемой по i -му свойству; B_i – базовый показатель i -го свойства; P_j – показатель j -го свойства оцениваемой конструкции.

Если повышение качества характеризуется увеличением показателя (показатели прочности, дальности действия и т.д.), применяют величину, обратную получаемой по предыдущей формуле.

Для оценки уровня качества конструкции в целом (обобщенный УКК) применяют отношение средневзвешенных значений показателей свойств

$$\text{УКК} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i B_i}{\sum_{j=1}^{n_1} m_j P_j},$$

где УКК – обобщенный уровень качества конструкции в целом, оцениваемой по основным параметрам.

Значимость каждого показателя в общей оценке уровня качества различна и зависит от конкретных требований, поэтому в формулу входят коэффициенты весомости. При выборе их необходимо следовать четырем правилам: 1) коэффициенты весомости сравниваемых свойств данной и базовой конструкции должны быть одинаковы; 2) коэффициент весомости наиболее важного показателя имеет наибольшее значение; 3) показатели одинаковой важности имеют одинаковые коэффициенты весомости;

4) коэффициенты весомости всех рассматриваемых свойств отвечают условию

$$\sum_{i=1}^n m_i; \quad \sum_{j=1}^{n_1} m_j = 1.$$

Коэффициенты весомости, как и показатели свойств, которые нельзя оценить какой-либо физической величиной, оцениваются в баллах и определяются экспертным методом.

Расчет показателей качества конструкции РЭС выполняют при заполнении карты технического уровня и качества (ГОСТ 2.116–71). Пример заполнения основных граф карты уровня (КУ) и расчет обобщенного показателя приведен в табл. 5.2 для усилителя мощности. Использована трехбалльная шкала. Новая конструкция на 19 % лучше базового варианта.

5.2. Пример заполнения карты уровня по трехбалльной шкале показателей качества (для усилителя мощности)

Наименование показателя	Численные значения показателя				
	Оцениваемая конструкция, D_i	Базовая конструкция, B_i	Норм. показатель качества, q_i	Весовой коэффициент, m_i	$q_i \cdot x \cdot m_i$
Выходная мощность, Вт	560	500	1,12	0,3	0,336
Потребляемый ток, А	55	50	0,91	0,2	0,182
Потребляе-	4500	4500	1	0,1	0,1

мая мощность, Вт					
Коэффициент усиления по мощности	12	10	1,2	0,1	1,2
Рабочее напряжение, В	27	27	1	0,1	0,1
Габариты, мм	370×190×245,5	400×175×275	1,15	0,2	0,23

Показатели назначения.

$$Q_1 = 2,148; M_1 = 0,3; Q_1M_1 = 2,148 \times 0,3 = 0,644.$$

Материалоемкость

Наименование показателя	Численные значения показателя				
	D_i	B_i	q_i	m_i	Q_i
Масса, кг	13	12	0,89	1	0,89

$$Q_2 = 0,89; M_2 = 0,1; Q_2M_2 = 0,89 \times 0,1 = 0,089.$$

Надежность

Наименование показателя	Численные значения показателя				
	D_i	B_i	q_i	m_i	Q_i
Вероятность безотказной работы	0,997	0,95	1,05	1	1,05

$$Q_3 = 1,05; M_3 = 0,1; Q_3M_3 = 1,05 \times 0,1 = 0,105.$$

Показатели эргономические

Наименование показателя	Численные значения показателя				
	D_i	B_i	q_i	m_i	Q_i
Антропометрические, балл	2	3	0,7	0,3	0,21
Психофизические, балл	2	3	0,7	0,3	0,21
Психологические, балл	3	3	1	0,4	0,4

$$Q_4 = 0,82; M_4 = 0,1; Q_4M_4 = 0,82 \times 0,1 = 0,082.$$

Показатели эстетические

Наименование показателя	Численные значения показателя				
	D_i	B_i	q_i	m_i	Q_i
Выразительность, балл	2	2	1	0,5	0,5
Рациональность формы, балл	4	3	1,3	0,2	0,26
Целостность композиции, балл	4	4	1	0,1	0,1
Совершенство производственного исполнения	3	3	1	0,2	0,2

$$Q_5 = 1,06; M_5 = 0,1; Q_5M_5 = 1,06 \times 0,1 = 0,106.$$

Показатели экономические

Наименование показателя	Численные значения показателя				
	D_i	B_i	q_i	m_i	Q_i
Лимитная цена, р.	1000	900	0,9	1	0,9

$$Q_6 = 0,9; M_6 = 0,1; Q_6M_6 = 0,9 \times 0,1 = 0,09.$$

Показатели технологичности

Наименование показателя	Численные значения показателя				
	D_i	B_i	q_i	m_i	Q_i
Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ЭРЭ к монтажу, $K_{мпэрэ}$	0,86	0,9	0,95	0,3	0,285
Коэффициент повторяемости ЭРЭ, $K_{повэрэ}$	0,75	0,8	0,94	0,4	0,376
Коэффициент применяемости ЭРЭ, $K_{прэрэ}$	0,35	0,8	0,44	0,3	0,135

$$Q_7 = 0,793; M_7 = 0,1; Q_7M_7 = 0,793 \times 0,1 = 0,0793.$$

Обобщенный показатель качества

$$Q_{\text{обобщ}} = 0,644 + 0,089 + 0,105 + 0,082 + 0,106 + 0,09 + 0,0793 = 1,19.$$

6. НАДЕЖНОСТЬ РЭС

6.1. Основные понятия надежности

Надежность есть комплексное свойство РЭС сохранять во времени значения параметров, характеризующих выполнение требуемых функций, в установленных пределах при соблюдении оговоренных условий эксплуатации. В зависимости от назначения РЭС и условий применения надежность может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

Безотказность – свойство РЭС непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Долговечность – свойство РЭС сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния (ремонт нецелесообразен) при установившейся системе технического обслуживания (ТО) и ремонта.

Ремонтпригодность – свойство РЭС, заключающееся в приспособлении к предупреждению, обнаружению причин возникновения отказов и повреждений, а также к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения ТО и ремонта.

Сохраняемость – свойство РЭС сохранять значения параметров, характеризующих выполнение требуемых функций в течение и после хранения или транспортирования.

РЭС находится в работоспособном состоянии, если оно способно выполнять все требуемые функции, сохраняя значения параметров в пределах, установленных нормативно-технической документации (НТД). Исправным считается состояние, когда РЭС соответствует всем без исключения требованиям НТД. Таким образом, работоспособное состояние отличается от исправного тем, что в работоспособном состоянии допускаются некоторые отклонения от требований нормативно-технической и конструкторской документации, которые не влияют на качество функционирования РЭС (например, наличие царапин или вмятин на корпусе и т.п.).

РЭС находится в неработоспособном состоянии, если значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнения заданных функций, не соответствует требованиям ТД. Неисправным называется состояние, когда РЭС не соответствует хотя бы одному требованию нормативно-технической и конструкторской документации.

Предельным считается состояние РЭС, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо невозможно восстановление его работоспособного состояния.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособности РЭС, называется отказом.

Повреждением называется событие, заключающееся в нарушении исправного состояния (корпус, кожух) при нарушении работоспособности.

При анализе надежности РЭС рассматривается как система (сложный объект), логическую связь компонентов которой, отображает структурная схема надежности. В первую очередь при анализе определяются:

- 1) состояния, которые являются отказами системы, факт возникновения отказа устанавливается критериями отказа согласно нормативно-технической документации;
- 2) характер процессов возникновения отказов компонентов исследуемой системы. Эти процессы описывают с помощью вероятностных законов и дифференциальных уравнений;
- 3) конфигурацию (структуру) системы, которая отражает характер соединения компонентов, правила работы, наличие резервирования, схему обслуживания и т.п.

Важную роль при рассмотрении надежности играет выделение класса системы по отношению к ремонту и восстановлению. Восстановление это процесс обнаружения и устранения отказа (повреждения) с целью восстановления его работоспособности. Система (объект) называется восстанавливаемой, если работоспособность ее в случае возникновения отказа подлежит восстановлению в рассматриваемых условиях, и невосстанавливаемой – если не подлежит. Один и тот же объект в зависимости от ситуации может быть восстанавливаемым или невосстанавливаемым. Например, аппаратура спутника на этапе хранения и подготовки к старту – восстанавливаемая, а во время полета – невосстанавливаемая.

Ремонт представляет собой комплекс операций по восстановлению исправности и работоспособности объекта, а также восстановлению ресурса объекта или его составных частей. Заметим, что ресурс (технический ресурс) – наработка

объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния. Под наработкой понимается продолжительность или объем работы объекта.

Ремонт объекта может выполняться заменой или восстановлением отдельных элементов и сборочных единиц. Объект называется ремонтируемым, если исправность его в случае возникновения отказа или повреждения подлежит восстановлению, проведение ремонта объекта предусматривается в НТД. Объект, исправность и работоспособность которого в случае возникновения отказа (повреждения) не подлежит восстановлению, – неремонтируемый. Таким образом, понятие ремонт предусматривает возможность замены отказавших частей и не увязывается с рассматриваемыми условиями (ситуацией). Классификация объектов по отношению к ремонту и восстановлению приведена на рис. 6.1.

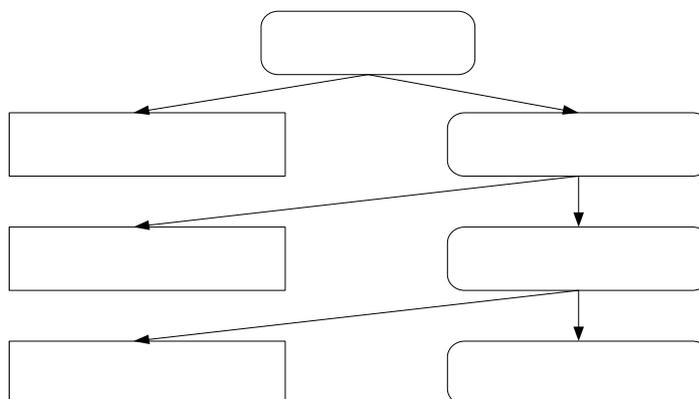


Рис. 6.1. Классификация объектов относительно ремонта и восстановления

Основным компонентом модели надежности объекта, т.е. технического изделия (элемента, системы) определенного целевого назначения, рассматриваемого в период проектирования, является закон распределения случайного времени T работы до отказа. Существует два основных пути определения распределения времени T . Первый состоит в утверждении некоторых исходных принципов, которые особенно полезны при недостаточности наших знаний о процессе отказа. При этом подходе нужно полагаться на физическое толкование для постулирования формы кривых интенсивностей отказов. Второй метод оперирует с эмпирическими данными, полученными в результате проведения и обработки результатов испытаний, а также при наблюдении за работой различных образцов оборудования в процессе эксплуатации систем, в которых применяются аналогичные элементы, работающие в подобных условиях. При таком подходе по полученным экспериментальным данным строят гистограмму для времени T и определяют соответствующую функцию распределения отказов. Наиболее предпочтительна комбинация указанных методов, когда для определения распределения времени T используются достаточные статистические данные и представление о механизме возникновения отказов на основе физико-химических и других соображений.

Знание законов распределения времени работы до отказа и времени ремонта необходимо при расчете показателей надежности (ПН) систем, т.е. технических характеристик, количественно определяющих одно или несколько свойств, составляющих надежность объекта – безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость.

6.2. Показатели надежности РЭС

Для количественной оценки надежности используют показатели надежности. Неремонтируемые объекты работают до первого отказа, основные показатели безотказности для них и формулы оценки показателей по результатам испытаний приведены в табл. 6.1.

Неремонтируемые
Невосстанавливаемые
Нелопустимы
перерывы в работе

Таблица 6.1

Показатели надежности (безотказности)	Формулы оценки
Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в пределах заданной наработки $[0; t]$ отказ не возникает	$\hat{P}(t) = N(t) / N$
Средняя наработка до отказа – математическое ожидание случайной наработки T до первого отказа	$\hat{m}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$
Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая для рассматриваемого момента t наработки при условии, что до этого момента отказ не возник	$\hat{\lambda}(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \Delta t}$

Здесь $N(t)$ – число объектов, работоспособных к моменту времени t ; N – число испытываемых объектов; T_i – наработка до отказа i -го объекта. Отдельные показатели надежности имеют размерность, например, если в качестве наработки рассматривается время, то средняя наработка до отказа m_t имеет размерность, ч, а интенсивность отказов $\lambda(t)$ и плотность распределения времени до отказа $f(t)$ – [1/ч]. Вероятность безотказной работы на временном интервале $[0; t]$ $P(t)$ и вероятность отказа $Q(t)$ (в зарубежной литературе иногда их называют соответственно функциями надежности и ненадежности) определяются непосредственно по функции распределения $F(t)$ случайного времени наработки до отказа T , т.е.

$$P(t) \stackrel{\Delta}{=} P[T > t] = 1 - F(t), \quad Q(t) \stackrel{\Delta}{=} P[T \leq t] = F(t),$$

здесь $P[A]$ – вероятность события A .

Функциональные связи между показателями $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ и m_t приведены в табл. 6.2. Вероятность безотказной работы в течение интервала $[t_1; t_2]$ определяется по формуле

$$P(t_1, t_2) = \frac{P(t_2)}{P(t_1)} = \exp \left[- \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right].$$

Конкретный вид функций $P(t)$, $\lambda(t)$ определяется законом распределения случайной наработки до отказа T . Во многих случаях на практике функция $\lambda(t)$ имеет вид, показанный на рис. 6.2.

Здесь можно выделить три участка: приработки (I), нормальной работы (II) и «старения» (III). Иногда в качестве показателей используют среднюю интенсивность отказов $\bar{\lambda}$ за время, соответствующее техническому ресурсу t_p , т.е.

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \lambda(t) dt,$$

а также суммарную наработку t_n до начала массовых параметрических отказов, которые характеризуются отклонением значения хотя бы одного рабочего параметра за пределы допуска.

Таблица 6.2

Определяемый ПН	Известный ПН			
	$P(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$P(t)$	$P(t)$	$1 - Q(t)$	$\int_t^{\infty} f(x) dx$	$\exp \left[- \int_0^t \lambda(x) dx \right]$
$Q(t)$	$1 - P(t)$	$Q(t)$	$\int_t^{\infty} f(x) dx$	$1 - \exp \left[- \int_0^t \lambda(x) dx \right]$
$f(t)$	$-\frac{d}{dt} P(t)$	$\frac{d}{dt} Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t) \exp \left[- \int_0^t \lambda(x) dx \right]$
$\lambda(t)$	$-\frac{d}{dt} P(t) / P(t)$	$\frac{d}{dt} Q(t) / (1 - Q(t))$	$f(t) / \int_t^{\infty} f(x) dx$	$\lambda(t)$
$m(t)$	$\int_0^{\infty} P(t) dt$	$\int_0^{\infty} (1 - Q(t)) dt$	$\int_0^{\infty} t f(t) dt$	$\int_0^{\infty} \exp \left[- \int_0^t \lambda(x) dx \right] dt$

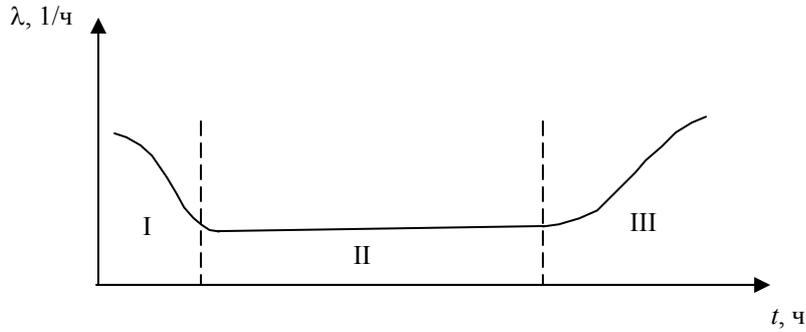


Рис. 6.2. Вид функции $\lambda(t)$

Показатели ремонтпригодности рассматриваемых объектов представляют собой характеристики случайной величины θ – длительности восстановления, она включает и поиск неисправности. Широко используются следующие показатели ремонтпригодности:

– вероятность восстановления за временной интервал $[0, t]$

$$P_B(t) = P[\theta \leq t] = F_B(t);$$

– среднее время восстановления

$$m_B = M[\theta] = \int_0^{\infty} t f_B(t) dt,$$

где $F_B(t)$, $f_B(t)$ – функция и плотность распределения времени θ .

На основе частных показателей безотказности и ремонтпригодности рассчитываются комплексные показатели надежности – коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности и др.

Нестационарный коэффициент или функция готовности $K_r(t)$ есть вероятность того, что в момент времени t система находится в состоянии работоспособности.

Коэффициент готовности K_r представляет собой предельное значение $K_r(t)$, т.е. K_r характеризует вероятность того, что система окажется работоспособной в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов простоя, и равен

$$K_r = \lim_{t \rightarrow \infty} K_r(t) = \frac{m_t}{m_t + m_B}. \quad (6.1)$$

Для ремонтируемых систем коэффициент готовности $K_r(t)$ в предположении, что ремонт отказавшего узла производится независимо от состояний работоспособности других узлов, это имеет место при неограниченном обслуживании системы

$$K_r(t) = \prod_{i=1}^n K_{r_i}(t),$$

где $K_{r_i}(t)$ – коэффициент готовности i -го узла.

С показателями $K_r(t)$ и K_r жестко связаны функция $K_n(t)$ и коэффициент K_n простоя (см. рис. 6.3, а): $K_n(t) = 1 - K_r(t)$, $K_n = 1 - K_r$.

Нестационарный коэффициент оперативной готовности $R(t, t + \tau)$ есть вероятность того, что объект окажется работоспособным в момент t и проработает безотказно в течение заданного времени τ , начиная с этого момента, или другими словами, вероятность того, что интервал времени целиком попадает внутрь одного из интервалов $t^{(i)}$, коэффициент $R(t, t + \tau)$ оценивается по формуле

$$\hat{R}(t, t + \tau) = N(t, t + \tau) / N,$$

где $N(t, t + \tau)$ – число объектов, работоспособных в момент времени t и проработавших безотказно до момента времени $t + \tau$.

Стационарный коэффициент оперативной готовности или просто коэффициент оперативной готовности $R(\tau)$ есть вероятность того, что объект проработает безотказно в течение заданного времени τ , начиная с произвольного «достаточно удаленного» момента времени

$$R(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} R(t, t + \tau) \text{ или } R(\tau) = K_r P(\tau), \quad (6.2)$$

если вероятность безотказной работы в течение времени τ не зависит от момента начала работы.

Функции $K_r(t)$, $K_n(t)$, $R(t)$ и коэффициенты K_r , K_n показаны на рис. 6.3.

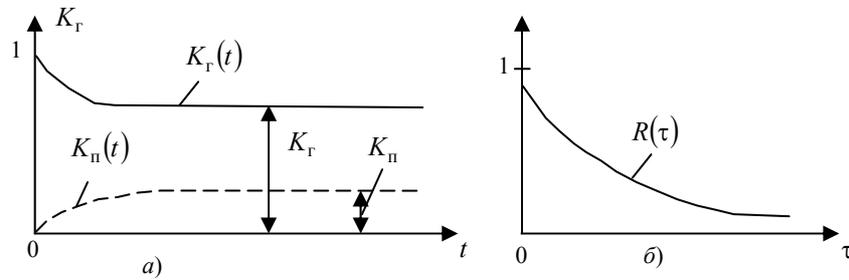


Рис. 6.3. Показатели надежности $K_r(t)$, K_r , $K_n(t)$, K_n (а) и $R(\tau)$ (б)

Для учета всех простоев объекта, в том числе и не связанных с отказами, используется коэффициент технического использования – отношение математического ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени пребывания объекта в работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и времени ремонтов за тот же период эксплуатации, т.е.

$$K_{\text{ти}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{обсл}}},$$

где $t_{\text{раб}}$ – суммарное время нахождения объекта в работоспособном состоянии; $t_{\text{рем}}$ – суммарное время ремонта; $t_{\text{обсл}}$ – суммарное время профилактического обслуживания.

6.3. Законы распределения времени работы до отказа

Наиболее часто при расчетах надежности РЭС в качестве распределений случайной наработки до отказа T , используются следующие законы: экспоненциальный (показательный), нормальный (Гаусса), Вейбулла-Гнеденко и др.

6.3.1. Экспоненциальный закон

При показательном законе с параметром λ показатели надежности объекта определяются по следующим формулам:

– плотность распределения

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0; \\ 0, & t < 0; \end{cases} \quad (6.3)$$

– вероятность безотказной работы и вероятность отказа

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = e^{-\lambda t}; \quad Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad (6.4)$$

– интенсивность отказов и параметр потока отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \lambda; \quad \omega(t) = \lambda; \quad (6.5)$$

– средняя наработка до отказа и между отказами

$$m_t = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{1}{\lambda}; \quad \tilde{m}_t = \frac{1}{\lambda}. \quad (6.6)$$

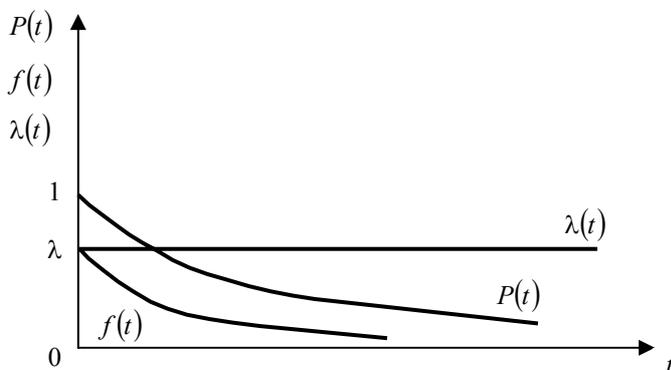


Рис. 6.4. Функции $P(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ при внезапных отказах

Если время восстановления распределено по показательному (экспоненциальному) закону с параметром μ , т.е.

$$f_B(t) = \begin{cases} \mu e^{-\mu t}, & t \geq 0; \\ 0, & t < 0, \end{cases} \quad (6.7)$$

то

$$P_B(t) = 1 - e^{-\mu t}, \quad m_B = 1/\mu. \quad (6.8)$$

Параметр μ в этом случае является интенсивностью восстановления, т.е. условной плотностью вероятности восстановления работоспособности объекта, определенной для рассматриваемого момента времени, при условии, что для этого момента восстановление не было завершено.

Следует заметить, что в формуле для расчета вероятности $P_B(t)$ в качестве времени t обычно используются некоторое допустимое время t_d , при котором задача, стоящая перед РЭС, будет выполнена.

При экспоненциальном законе надежности

$$K_r = \frac{\mu}{\mu + \lambda}.$$

6.3.2. Нормальный закон

Постепенные отказы РЭС (износ элементов в процессе эксплуатации) характеризуются интенсивностью отказов, которая зависит от времени $\lambda(t) \neq \text{const}$. В этом случае случайное время работы до отказа часто подчиняется нормальному (гауссовскому) закону с параметрами m_t (математическое ожидание) и σ_t (среднее квадратическое отклонение) (рис. 6.5).

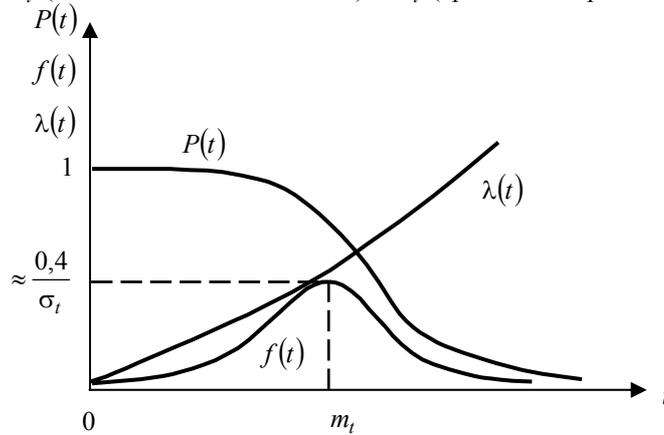


Рис. 6.5. Функции $P(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ при постепенных отказах

Плотность распределения в случае нормального закона имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(t - m_t)^2}{2\sigma_t^2} \right\},$$

где σ_t^2 — дисперсия времени наработки до отказа; m_t — среднее время наработки до отказа.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ системы находится по формуле

$$P(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(t - m_t)^2}{2\sigma_t^2} \right\} dt = 0,5 - \Phi \left(\frac{t - m_t}{\sigma_t} \right),$$

здесь $\Phi \left(\frac{t - m_t}{\sigma_t} \right)$ — нормированная функция Лапласа

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}; \quad \int_0^u \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) dx.$$

Функция $\Phi(u)$ табулирована, причем $\Phi(-u) = -\Phi(u)$.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ для нормального распределения определяется выражением

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\exp \left\{ -\frac{(t - m_t)^2}{2\sigma_t^2} \right\}}{\sigma_t \sqrt{2\pi} \left[0,5 - \Phi \left(\frac{t - m_t}{\sigma_t} \right) \right]}.$$

6.4. Способы повышения надежности РЭС

Основными причинами отказов РЭС являются следующие: нарушение работоспособности электрорадиоэлементов, отказы элементов конструкции, ошибки при проектировании, нарушения технологии и условий эксплуатации, ошибки в электронных схемах.

Для повышения надежности РЭС используется большое число способов, которые представлены на рис. 6.6. Наиболее действенным способом является введение резервирования (избыточности). Различают пять видов резервирования:

- 1) структурное или аппаратное, предусматривающее использование избыточных структурных элементов (печатный узел, блок и т.д.);
 - 2) временное (с применением резерва времени);
 - 3) нагрузочное (используется запас по нагрузке);
 - 4) функциональное (применяются компоненты с избыточными функциями, например, многокомпонентные ФАР, источники информации в системах радиоуправления и др.);
 - 5) информационные (применяется избыточность, информация о приеме, передаче и хранении).
- Классификация способов реализации структурного резервирования приведена в табл. 6.3.

6.5. Инженерные методы определения надежности РЭС

Применяемые на практике методы определения надежности делятся по видам и группам (рис. 6.7).

6.6. Испытания РЭС на надежность

Для оценки надежности РЭС при испытаниях РЭС возможно два метода:

1. Оценка факторов отказов РЭС. Испытуемые РЭС ставятся в условия, соответствующие условиям реальной эксплуатации, ведется наблюдение за выполнением ими заданных функций и фиксируются отказы. Затем по известным формулам математической статистики определяются показатели надежности (плотность распределения времени наработка, вероятность безотказной работы и др.)

Таблица 6.3

Признак классификации	Способ резервирования и резерва	Определение
Способ включения резерва	Постоянное резервирование Резервирование замещением	Резервные элементы участвуют в функционировании наравне с основным. Функции основного элемента передаются резервными элементами после его отказа
Схема включения резерва	Общее резервирование Раздельное резервирование	Резерв предусматривается на случай отказа объекта в целом. Резерв предусматривается на случай отказов отдельных элементов или их групп
Состояние резерва	Ненагруженный резерв Облегченный резерв Нагруженный резерв	Резервные элементы практически не несут нагрузок. Резервные элементы находятся в менее нагруженном режиме, чем основной. Резервные элементы работают в том же режиме, что и основной
Однородность резервирования	Однородное резервирование Смешанное резервирование	Резервирование имеет один вид по соответствующему признаку классификации. В объекте различные виды резервирования совмещаются
Кратность резервирования	Однократное резервирование Многократное резервирование	Кратность резервирования равна единице (дублирование). Кратность резервирования выражается числом более единицы

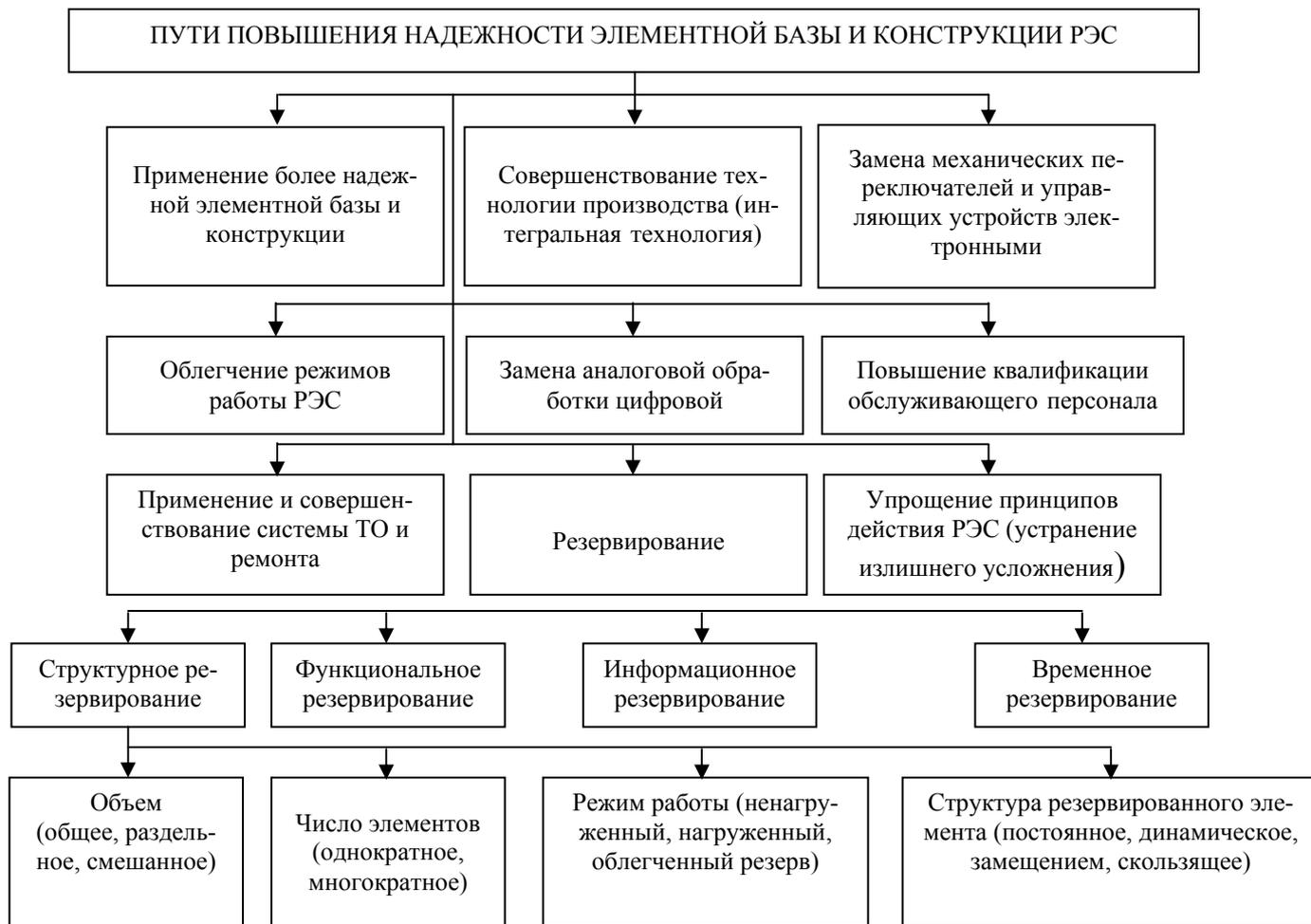


Рис. 6.6. Пути повышения надежности РЭС

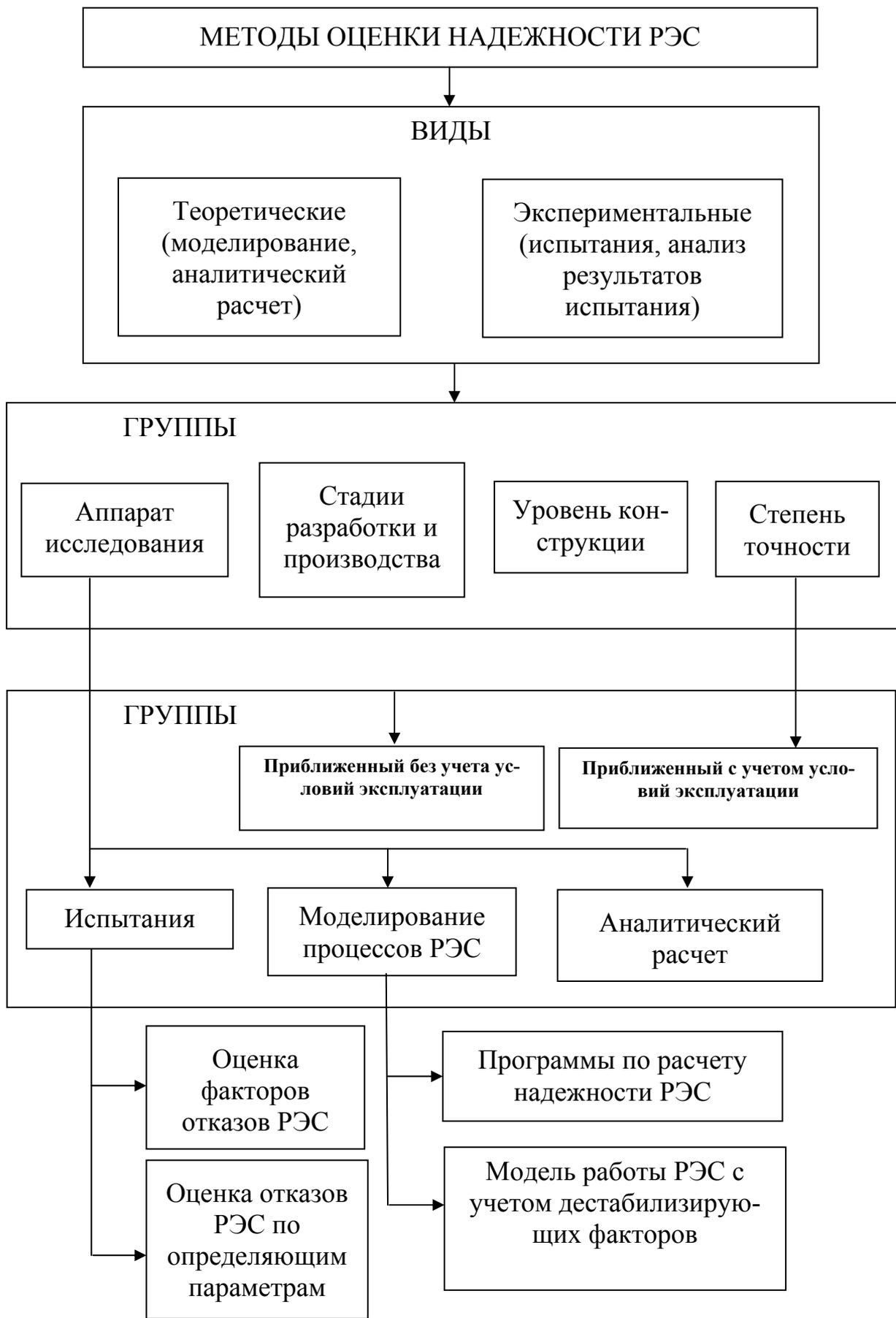


Рис. 6.7. Методы оценки надежности

Реализация такого плана проведения испытаний требует соблюдения следующих условий:

- число наблюдаемых изделий должно быть достаточно большим (для обеспечения достоверности результатов);
- группа изделий должна быть однородна по составу, технологический процесс производства изделий одинаков;
- необходимо точное воспроизведение условий эксплуатации и создание реальных воздействий на РЭС, требуется непрерывно следить за выполнением изделиями заданных функций.

• Недостатками данного метода являются, во-первых, то, что он не пригоден для сложных и дорогих изделий, во-вторых, здесь не вскрываются причины возникновения отказов сложного изделия.

2. Оценка отказов РЭС по определяющим параметрам. При данном методе приводится выбор определяющих параметров на основе изучения факторов, влияющих на изменение этих параметров. Например, для потенциометра работоспособность определяется такими параметрами, как напряжение источника питания, точность намотки сопротивления, точность перемещения подвижного контакта, изменение омического сопротивления провода, используемого для намотки, точность изготовления каркаса для потенциометра. Данный метод позволяет выявить основные причины возникновения отказов и сделать рекомендации по их устранению.

Недостатки метода: требуется предварительное изучение факторов, влияющих на надежность, определения степени их влияния; кроме того определяющие параметры обычно влияют друг на друга, что существенно затрудняет анализ причин отказов.

6.7. Моделирование процессов функционирования РЭС

Наиболее часто используют два подхода к моделированию функционирования РЭС.

1. Использование программ по расчету надежности РЭС. Разрабатывается программа расчета надежности для соответствующей структурной схемы изделия. Затем по исходным данным о надежности элементов определяются показатели надежности изделия.

2. Моделирование работы с учетом дестабилизирующих факторов. Составляются модели функционирования элементов РЭС, а также внешних и внутренних дестабилизирующих факторов, разрабатывается программа для исследования функционирования РЭС в целом с учетом дестабилизирующих факторов. Внешние и внутренние дестабилизирующие факторы, а также изменения параметров элементов моделируются датчиками случайных чисел. Данный подход позволяет легко реализовать требуемое количество реализаций процесса функционирования РЭС.

Структура алгоритма расчета надежности представлена на рис. 6.8.

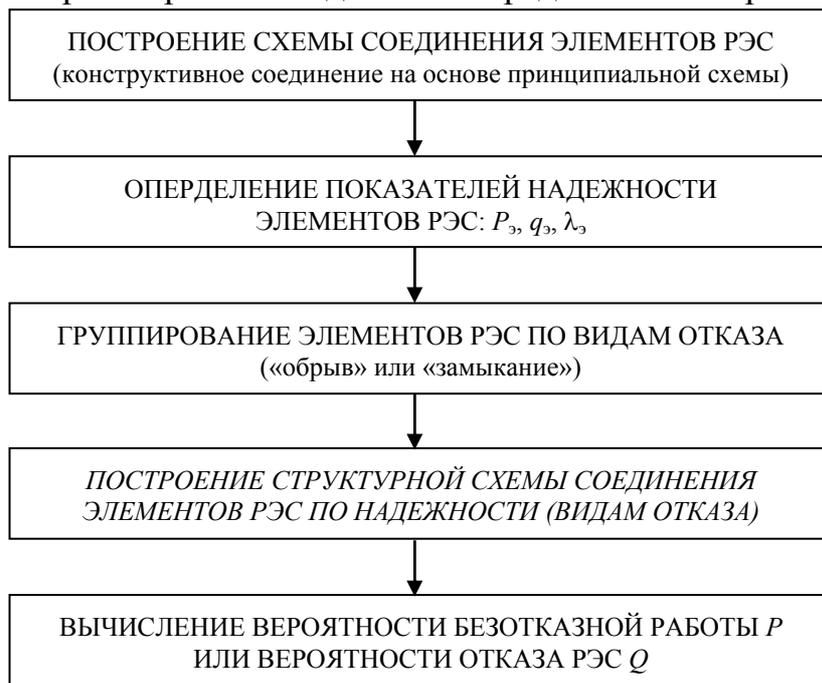


Рис. 6.8. Алгоритм расчета надежности

Выбор того или иного метода расчета надежности и их сочетаний зависит от постановлений задачи и возможностей реализовать эти методы на всех стадиях разработки, изготовления и эксплуатации РЭС. Наличие разнообразных методов оценки надежности и условий их применения позволяет сделать вывод о том, что задача исследования надежности принадлежит к числу весьма сложных задач. При планировании исследований надежности надо ориентироваться на создание системы методов, связанных и дополняющих друг друга (расчет и испытание, испытание и моделирование, анализ на стадии производства и результаты эксплуатации).

6.8. Расчет надежности РЭС с учетом различных видов отказов

Для расчета надежности системы составляется структурная схема надежности (ССН), отображающая логические связи элементов и показывающая пути сигнала, обеспечивающие работоспособность системы. Наиболее часто имеют место следующие ССН.

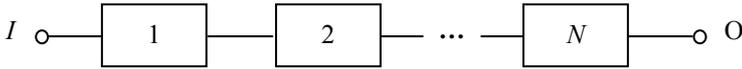


Рис. 6.9. Последовательное соединение ССН

1. Последовательные ССН. Данная схема используется в случае, если РЭС работоспособно только при работоспособном состоянии всех его элементов, т.е. имеет последовательное соединение элементов в смысле надежности (рис. 6.9).

Вероятность безотказной работы (ВБР) системы $P_s(t)$ для интервала времени $[0, t]$ применительно к последовательной ССН определяется по формуле

$$P_s(t) = \prod_{i=1}^N p_i(t), \quad (6.9)$$

где $p_i(t)$ – ВБР i -го элемента; N – число элементов.

Интенсивность отказов $\Lambda(t)$ системы равна сумме интенсивностей отказов $\lambda_i(t)$ элементов, т.е.

$$\Lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad (6.10)$$

Плотность вероятности $f(t)$ времени работы до отказа системы определяется по формуле

$$f(t) = P(t) \sum_{i=1}^n \frac{f_i(t)}{P_i(t)}, \quad (6.11)$$

где $f_i(t)$ – плотность вероятности отказов i -го элемента.

Среднее время m_t работы системы до отказа рассчитывается следующим образом

$$m_t = \left(\sum_{i=1}^n \bar{\lambda}_i \right)^{-1}, \quad \bar{\lambda}_i = \frac{1}{t_{\text{сл}}} \int_0^{t_{\text{сл}}} \lambda_i(t) dt, \quad (6.12)$$

здесь $t_{\text{сл}}$ – срок службы.

Если для элементов имеет место показательный закон распределения времени работы до отказа, т.е. выполняется условие экспоненциального закона надежности, то формулы (6.9) – (6.12) принимают следующий вид

$$\begin{aligned} P_s(t) &= e^{-\Lambda t}, \quad P(t_0, t_0 + \tau) = e^{-\Lambda \tau}; \\ \Lambda &= \sum_{i=1}^n \lambda_i; \\ f(t) &= \Lambda e^{-\Lambda t}, \quad m_t = \frac{1}{\Lambda}. \end{aligned} \quad (6.13)$$

2. Параллельные ССН. При параллельном соединении отказ системы наступает тогда, когда отказывают все его элементы. Различают несколько видов параллельных ССН. Параллельное (простое) соединение для случая нагруженного резерва показано на рис. 6.10. ВБР системы здесь определяется по формуле

$$P_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_i(t)), \quad (6.14)$$

а если все элементы одинаковы, т.е. $p_1(t) = \dots = p_N(t) = p(t)$, то

$$P_s(t) = 1 - (1 - p(t))^N.$$

В случае дублирования (отказ устройства наступает, когда отказывают два элемента, соединенных параллельно) может использоваться формула

$$P_s(t) = p_1(t) + p_2(t) - p_1(t)p_2(t).$$

При ненагруженном резерве (рис. 6.10, б) с одинаковыми элементами и $p(t) = e^{-\lambda t}$ (имеет место экспоненциальный закон надежности) ВБР системы с $N-1$ резервными блоками равна

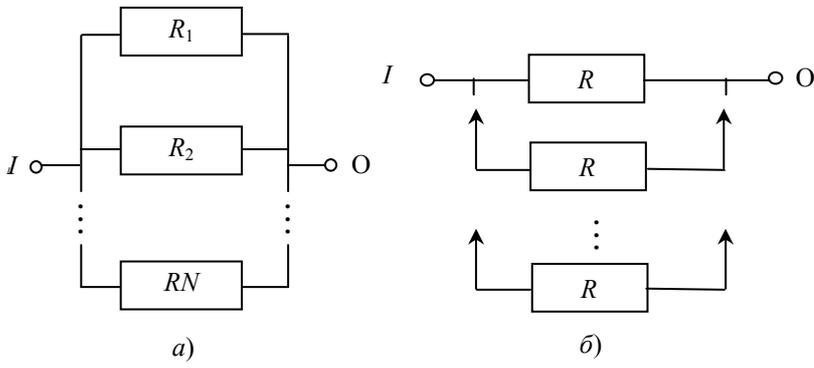


Рис. 6.10. Схемы резервирования

$$P_s(t) = \left(1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{N-1}}{(N-1)!} \right) e^{-\lambda t}. \quad (6.15)$$

Для систем, содержащих элементы с двумя видами отказов – «обрыв» и «короткое замыкание», рассматриваются не логические, а электрические схемы соединения элементов.

Для отказов элементов РЭС вида «обрыв» электрическая схема соединения элементов (конструктивное соединение) совпадает с ССН, например, рис. 6.11, а, б. Пользуясь выражениями для последовательного и параллельного соединений вероятность безотказной работы устройства для данного примера рассчитывается по формуле

$$P_s(t) = p_{R1}(t)p_{R2}(t) + p_{R3}(t) - p_{R1}(t)p_{R2}(t)p_{R3}(t).$$

Если элементы РЭС имеют отказы вида «короткое замыкание», то электрическая схема не совпадает со ССН. Это показано на рис. 6.12, а, б.

Для данного случая вероятность безотказной работы устройства равна

$$P_s(t) = (p_{C1}(t) + p_{C2}(t) - p_{C1}(t)p_{C2}(t))p_{C3}(t).$$

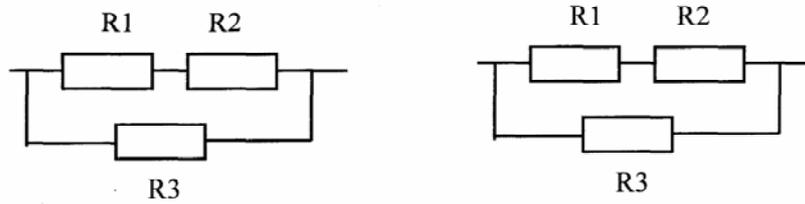


Рис. 6.11. Электрическая схема соединений вида «обрыв»

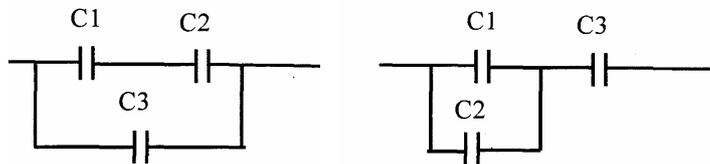


Рис. 6.12. Электрическая схема соединений «короткое замыкание»

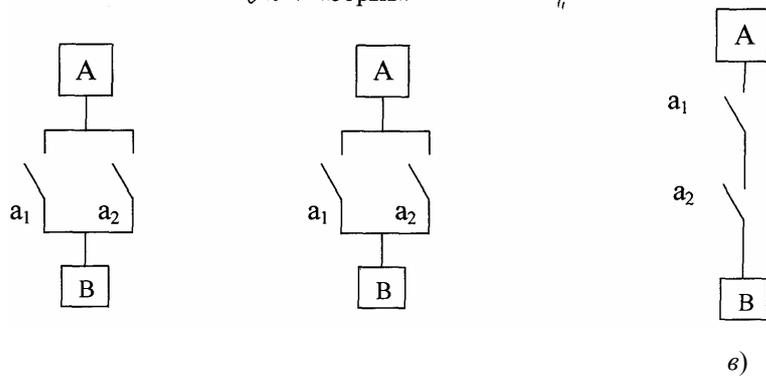


Рис. 6.13. Структурная схема надежности:
a – электрическая схема; *б* – ССН для отказов вида «обрыв»;
в – ССН для отказов вида «короткое замыкание»

Таким образом, при расчете надежности РЭС с учетом двух видов отказов «обрыв» и «короткое замыкание» сначала на основе электрической схемы соединения элементов составляются ССН. Затем по ССН для отказов вида «обрыв» и «короткое замыкание» записываются расчетные формулы для ВБР и определяются вероятность отсутствия обрыва $P(t)$ и вероятность отсутствия замыкания $P_3(t)$. Примерами элементов с отказами вида «обрыв» и «короткое замыкание» являются реле, переключатели и др. (рис. 6.13).

С учетом ССН рис. 6.13, вероятность отсутствия «обрыва» определяется по формуле

$$P_o(t) = (1 - p_{o1}(t))(1 - p_{o2}(t)) = p_{o1}(t) + p_{o2}(t) - p_{o1}(t)p_{o2}(t).$$

На основе ССН рис. 6.13, *в* вероятность отсутствия «короткого замыкания» равна $P_3(t) = p_{31}(t)p_{32}(t)$.

Так как отказы «обрыв» и «короткое замыкание» являются независимыми, то общая вероятность $P_3(t)$ отсутствия обрыва замыкания рассчитывается по формуле

$$P_S(t) = P_o(t)P_3(t) = (p_{o1}(t) + p_{o2}(t) - p_{o1}(t)p_{o2}(t))p_{31}(t)p_{32}(t).$$

В ряде случаев ССН имеет вид, который не позволяет рассчитать ВБР только на основе формул последовательного и параллельного соединения элементов. Пример такой схемы показан на рис. 6.14. Для расчета ВБР применительно к таким схемам могут быть использованы методы перебора возможных состояний и метод разложения.

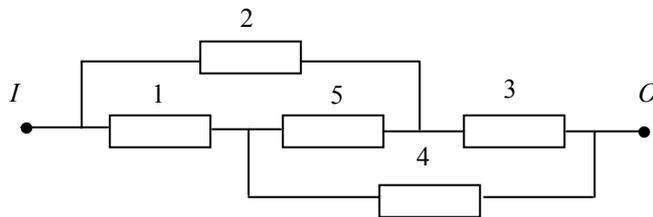


Рис. 6.14. ССН при последовательном и параллельном соединениях

Метод разложения основан на использовании формулы полной вероятности (или правила условной вероятности)

$$P(S) = \sum_{i=1}^N P(H_i)P(S/H_i), \quad (6.16)$$

где N – количество возможных состояний системы; $P(H_i)$ – вероятность состояния H_i системы; $P(S/H_i)$ – условная вероятность события S (передача сообщения от входа I к выходу O) при условии имеет место состояние H_i .

Для использования формулы полной вероятности при расчете надежности системы (рис. 6.14) необходимо выбрать один из элементов, например 5, и рассмотреть две гипотезы:

- гипотеза H_1 – элемент 5 работоспособен в течение заданного времени;
- гипотеза H_2 – элемент 5 неработоспособен в течение заданного времени.

Вероятность выполнения первой гипотезы H_1 обозначим $P(H_1) = P(5)$, а вероятность выполнения гипотезы H_2 как $P(H_2) = 1 - P(5)$. Тогда выражение для вероятности безотказной системы можно записать в виде

$$P(S) = P(5)P(S/H_1) + (1 - P(5))P(S/H_2).$$

Условной вероятности $P(S/H_1)$ соответствует ССН 1, представленная на рис. 6.15 (в схеме элемент 5 заменен на перемычку). Для данной схемы

$$P(S/H_1) = (P(1) + P(2) - P(1)P(2))(P(3) + P(4) - P(3)P(4)).$$

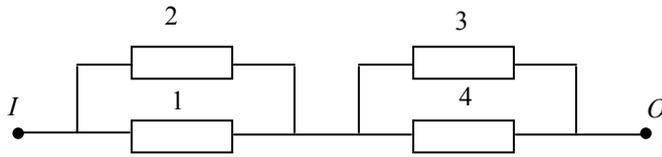


Рис. 6.15. ССН 1

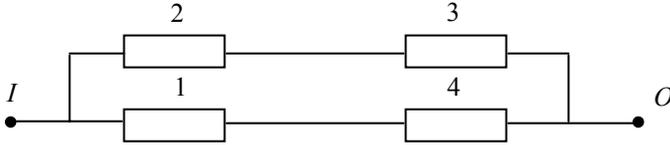


Рис. 6.16. ССН 2

Условная вероятность $P(S/H_2)$ рассчитывается по ССН 2, представленной на рис. 6.16 (элемент 5 находится в состоянии «обрыва»), и равна

$$P(S/H_2) = P(1)P(4) + P(2)P(3) - P(1)P(4)P(2)P(3).$$

Таким образом, ВБР для ССН (рис. 6.11) определяется по формуле

$$P(S) = P(S)(P(1) + P(2) - P(1)P(2))(P(3) + P(4) - P(3)P(4)) + (1 - P(S))(P(1)P(4) + P(2)P(3) - P(1)P(4)P(2)P(3)).$$

6.9. Методы создания высоконадежных РЭС

Для создания высоконадежных РЭС необходимо выполнять следующие условия:

- ЭРИ и материалов выбирать строго в соответствии с техническими условиями;
- исключать конструкционные отказы на основе рассмотрения альтернативных вариантов проектных решений;
- обеспечить полное соблюдение регламента технологического процесса;
- проводить постоянный анализ надежности с целью выявления «узких» мест и устранять их с использованием различных видов резервирования.

Основные конструкторские методы обеспечения требуемой надежности РЭС представлены на рис. 6.17.



Рис. 6.17. Методы создания высоконадежных РЭС

Следует учитывать, что методы повышения надежности РЭС неизбежно связаны с ростом их себестоимости. Поэтому важную роль играет применение новых методов оптимизации и использование новейших достижений в области электроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баканов, Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств / [Г.Ф. Баканов](#), С.С. Соколов, В.Ф. Суходольский. – *Academia*, 2007. – 368 с.
2. Гелль, П.П. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры : учебник для вузов / П.П. Гелль, Н.К. Иванов-Есипович. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1984.
3. Ильинский, В.С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий / В.С. Ильинский. – М. : Радио и связь, 1982.
4. Токарев, М.Ф. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие для вузов / М.Ф. Токарев, Е.Н. Талицкий, В.А. Фролов ; под ред. В.А. Фролова. – М. : Радио и связь, 1984.
5. Дульнев, Г.Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах / Г.Н. Дульнев, Э.М. Семяшкин. – Л. : Энергия, 1968.
6. Родкоп, Л.Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры / Л.Л. Родкоп, Ю.Е. Спокойный. – М. : Советское радио, 1976.
7. Гроднев, И.И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот / И.И. Гроднев. – М. : Связь, 1972.
8. Конструирование радиоэлектронных средств ; под ред. А.С. Назарова / МАИ. – М., 1996.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. РАСЧЕТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК	3
1.1. Статический расчет амортизаторов	3
1.2. Резонансные частоты блока на амортизаторах	6
1.3. Упаковочная тара для транспортирования	10
1.4. Ударная прочность элементов	13
1.5. Вибропрочность выводов элементов	16
2. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ	23
2.1. Температура нагретой зоны одиночного блока	23
2.2. Температура перегрева перфорированного блока	29
2.3. Температура элементов блока с принудительным охлаждением	35
2.4. Расчет радиатора полупроводникового прибора	37
3. РАСЧЕТЫ ЭКРАНИРОВАНИЯ	44
3.1. Эффективность экранирования	44
4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗАИМОЗАМЕЯМОСТИ	45
4.1. Определение полей допусков размерной цепи методом максимума-минимума	45
4.2. Определение полей допусков размерной цепи вероятностным методом	49
5. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИИ	51
5.1. Классификация показателей качества	51
5.2. Комплексная оценка качества конструкции РЭС	52
6. НАДЕЖНОСТЬ РЭС	56
6.1. Основные понятия надежности	56
6.2. Показатели надежности РЭС	59
6.3. Законы распределения времени работы до отказа	64
6.4. Способы повышения надежности РЭС	67
6.5. Инженерные методы определения надежности РЭС	67
6.6. Испытания РЭС на надежность	67
6.7. Моделирование процессов функционирования РЭС	71
6.8. Расчет надежности РЭС с учетом различных видов отказов	72
6.9. Методы создания высоконадежных РЭС	78
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	80