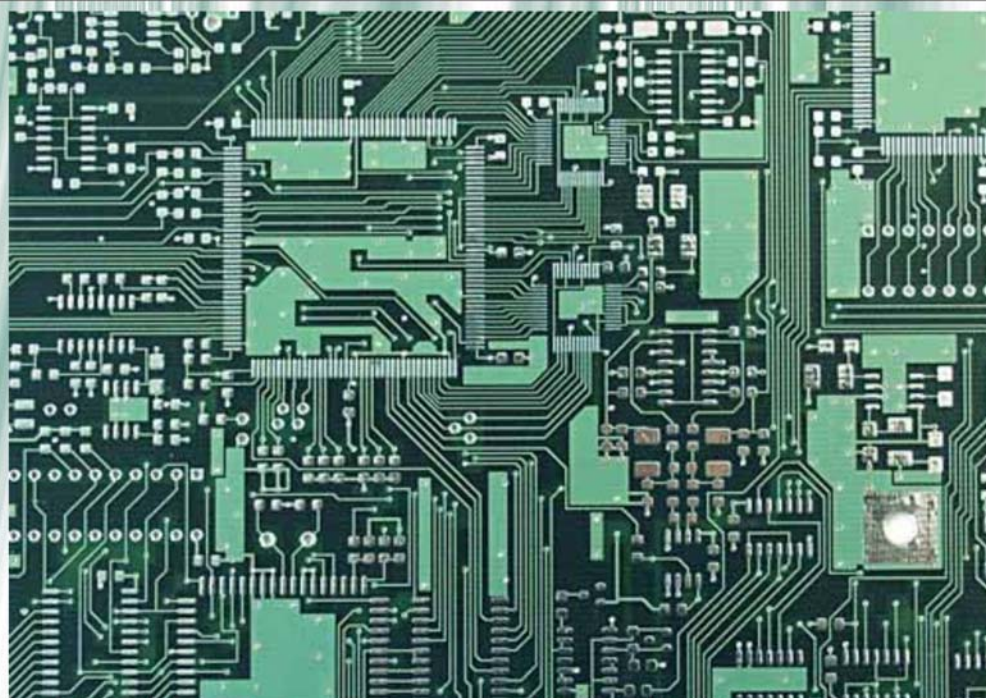


**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**



**В.Ф.АЛЕКСЕЕВ
Н.С.ОБРАЗЦОВ
А.А.ХМЫЛЬ**

**СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ И
ТЕХНОЛОГИИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
СРЕДСТВ**

В.Ф.АЛЕКСЕЕВ, Н.С.ОБРАЗЦОВ, А.А.ХМЫЛЬ

**СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ
И ТЕХНОЛОГИИ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Под редакцией В.Ф.Алексеева и Н.С.Образцова

*Учебное пособие
для студентов специальности
«Конструирование и технология радиоэлектронных средств»*

Минск 1997

**В.Ф.Алексеев, Н.С.Образцов, А.А.Хмыль,
С.М.Боровиков, В.А.Валуев, В.Л.Ланин,
В.В.Шаталов, Н.С.Собчук**

Рецензенты: кафедра конструирования и технологии радиоэлектронных средств Полоцкого государственного университета (заведующий кафедрой канд.техн.наук, доцент Юрцевич М.М.); канд.техн.наук, доц. Цырельчук Н.А.

Алексеев В.Ф., Образцов Н.С., Хмыль А.А. и др.

А13 Сборник задач по конструированию и технологии радиоэлектронных средств: Учеб. пособие / Под. ред. В.Ф.Алексеева и Н.С.Образцова. - Мн.: БГУИР, 1997. - с.: ил.

В учебном пособии рассматриваются наиболее часто встречающиеся вопросы, связанные с проектированием и технологией радиоэлектронных средств. На примере конкретных задач показано решение вопросов, связанных с оптимизацией конструкций РЭС.

Задачи для удобства сформированы по разделам. В каждом из них приводятся примеры решения наиболее типичных случаев, а также даны задачи для самостоятельного решения.

Учебное пособие может быть использовано студентами и преподавателями вузов при проведении практических занятий, выполнении курсового и дипломного проектирования, а также при подготовке к государственному экзамену по специальности.

$A = \frac{2302020201-026}{M304(03)-97}$ 13-97

ББК 32.844

© В.Ф.Алексеев и др., 1997

ВВЕДЕНИЕ

Конструирование и технология являются составными частями процесса проектирования радиоэлектронных средств, при выполнении которых необходимо учесть целый ряд требований - это схемотехническая проработка конструкции, компоновка изделия, расчеты электрических, тепловых, надежности, технологических и других параметров. Важным также является использование практического опыта разработчиков аппаратуры и технологов.

Специалисты в области проектирования радиоэлектронных средств прекрасно знают, что выполнение конструкторской и технологической проработки, выполнение различных расчетов, анализ и синтез конструкции столь же необходимы как и расчеты, связанные с их функциональным назначением.

При подготовке учебного пособия авторы исходили прежде всего из того, что на сегодняшний день нет ни одного учебника, объединяющего столь широкий круг вопросов по расчету конструкторских и технологических параметров конструкций РЭС. Именно поэтому при разработке задач были учтены пожелания специалистов, занятых проектированием и выпуском аппаратуры, а также большой опыт работы большинства авторов в высшей школе.

Учебное пособие построено так, что задачи объединены по различным темам. Причем в каждом из разделов рассматривается решение типовых (наиболее часто встречающихся на практике) задач, а затем читателям предлагаются задачи для самостоятельного решения. Как правило, для того, чтобы решить ту или иную задачу потребуются дополнительное время на изучение литературы и стандартов. Основной перечень литературы указан в конце книги.

В учебном пособии имеются приложения, которые позволят получить необходимые справочные данные, а также рассчитать некоторые коэффициенты и параметры по графическим зависимостям.

Книга окажется полезной не только при подготовке к практическим и лабораторным занятиям, но и при выполнении курсового и дипломного проектирования, а также при подготовке к государственному экзамену по специальности. Много ценного могут найти в ней и специалисты, заня-

тые разработкой радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры.

Авторы выражают огромную благодарность рецензентам за те ценные замечания и пожелания, которые были учтены и исправлены.

Авторы надеются, что те кому удастся познакомиться с данным учебным пособием, останутся довольны.

Свои замечания и пожелания Вы всегда сможете направить в наш адрес: 220600, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, БГУИР.

1. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

Задача 1.1

Найти длительность дорегуляторной стадии и время установления стационарного режима для радиоэлектронного аппарата кассетного типа в герметичном корпусе.

Размеры корпуса $94 \times 170 \times 150$ мм, корпус изготовлен из стали [$C_{уд} = 445$ Дж/(кг·град)], его вес $P = 155$ г. Между корпусом и нагретой зоной существует зазор, равный 5 мм, заполненный воздухом. Общая теплоемкость нагретой зоны $C_z = 460$ Дж/град. Теплообмен с окружающей средой происходит в условиях естественной конвекции, коэффициент теплообмена корпуса со средой $\alpha_0 = 10$ Вт/(м²·град), а тепловая проводимость зазора $\sigma = 0,36$ Вт/град. Начальное поле температур в системе равномерное.

Решение

Решение данной задачи можно рассматривать как нестационарное поле системы для тел *ядро-зазор-оболочка*.

Определим теплоемкость оболочки

$$C_0 = C_{уд} \cdot P = 445 \cdot 0,155 = 69 \text{ Дж/град} \quad (1)$$

и ее поверхность

$$\begin{aligned} S_0 &= 2[l_1 + l_2 + (l_1 + l_2)l_3] = \\ &= 2[0,094 \cdot 0,17 + (0,094 + 0,17) \cdot 0,15] = 0,11 \text{ м}^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Допустим, что безразмерный параметр ψ_n , характеризующий степень неравномерности температурного поля нагретой зоны (ядра), равен $\psi_n = 1$. Найдем коэффициенты:

$$\beta = \frac{C_z}{\psi_n C_0} = \frac{460}{1 \cdot 69} = 6,67; \quad (3)$$

$$k = \frac{\alpha S_0}{\sigma} = \frac{10 \cdot 0,11}{0,36} = 3; \quad (4)$$

$$m_x = \frac{\sigma \cdot \psi_x}{C_x} = \frac{0,36 \cdot 1}{460} \approx 0,8 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c} \quad (5)$$

По графикам определяем N_i - безразмерный критерий, характеризующий длительность дорегуляторной стадии процесса, причем

$$N_i = N_i \left(k, \beta, \frac{\vartheta_{o,n}}{\vartheta_{x,n}}, \psi_x, \varepsilon \right), \quad (6)$$

где $\vartheta_{o,n}$ - перегрев корпуса (оболочки) в начальный момент времени $\tau=0$;

$\vartheta_{x,n}$ - перегрев нагретой зоны (ядра) в начальный момент времени $\tau=0$; $\varepsilon=0,01$.

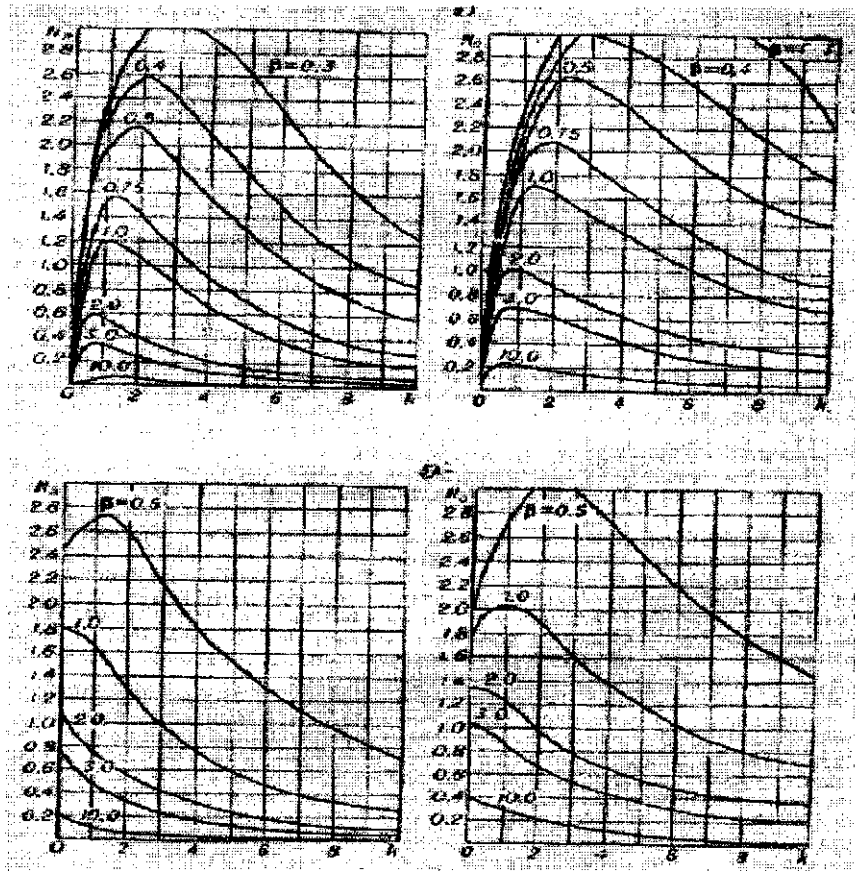


Рис. 1. Зависимости $N_x = N_x(k, \beta)$ и $N_o = N_o(k, \beta)$:

а - при $\varepsilon=0,01$, $\psi_x=1$, $\frac{\vartheta_{o,n}}{\vartheta_{x,n}}=1$;

б - при $\varepsilon=0,01$, $\psi_x=0,5$, $\frac{\vartheta_{o,n}}{\vartheta_{x,n}}=1$

из графиков получим: $N_x=0,06$; $N_o=0,15$ и по формуле (7) найдем значение τ_i^* :

$$N_i = \tau_i^* m_x \geq \frac{1}{\sqrt{n^2 - 4k\beta}} \ln \frac{|B_i|}{\varepsilon}, \quad (i=x, o), \quad (7)$$

где

$$B_x = \frac{g_1}{g_2}, \quad B_o = B_x \frac{\left(1 - \frac{m_2}{m_x}\right)}{\left(1 - \frac{m_1}{m_x}\right)} \quad (8)$$

$$g_1 = \frac{\vartheta_{o,n}}{\vartheta_{x,n}} - \psi_x \left(1 - \frac{m_1}{m_x}\right); \quad (9)$$

$$g_2 = \frac{\vartheta_{o,n}}{\vartheta_{x,n}} - \psi_x \left(1 - \frac{m_2}{m_x}\right); \quad (10)$$

$$\frac{m_1}{m_x} = \frac{1}{2} \left(n - \sqrt{n^2 - 4k\beta} \right); \quad (11)$$

$$\frac{m_2}{m_x} = \frac{1}{2} \left(n + \sqrt{n^2 - 4k\beta} \right); \quad (12)$$

$$\tau_x^* \geq 75 \text{ сек} = 1,2 \text{ мин}; \quad \tau_o^* \geq 3,1 \text{ мин}.$$

Следовательно, через 3 мин температурное поле всей системы войдет в стадию регулярного теплового режима, хотя при расчетах температурного поля (нагретой зоны) ядра уже через 1,2 мин можно считать регулярный режим наступившим.

Оценим время ($\tau_{ст}$) наступления стационарного режима в ядре и оболочке. Для этого воспользуемся выражением

$$(\tau_{от})_i = \frac{1}{m_i} \ln \frac{|K_i|}{\delta}, \quad (i = я, о); \quad (13)$$

где

$$K_я = \frac{g_2}{\psi_я \cdot \sqrt{n^2 - 4k\beta}}; \quad (14)$$

$$K_о = \frac{g_{я.н} \cdot g_2}{g_{о.н}} \cdot \frac{1 - \frac{1}{2} \cdot (n - \sqrt{n^2 - 4k\beta})}{\sqrt{n^2 - 4k\beta}}. \quad (15)$$

Подставив необходимые значения, получим $(\tau_{от})_я \approx 10^4 = 2,8$ ч.

Задача 1.2

Вычислить среднеповерхностные температуры нагретой зоны и корпуса радиоэлектронного аппарата с перфорированным корпусом и горизонтальным перфорированным шасси.

Геометрические параметры и режимы работы аппарата известны: среднее расстояние между отверстиями для подвода и отвода воздуха $h=0,206$ м; суммарные площади отверстий в корпусе и шасси аппарата: $F_{вх}=F_{вых}=1,6 \cdot 10^{-2}$ м², $F_{ш}=1,75 \cdot 10^{-2}$ м²; площади поверхностей корпуса, нагретой зоны и излучающей ее поверхности: $S_к=0,695$ м²; $S_{з.в}=0,247$ м²; $S_{з.л}=0,231$ м²; площадь поперечного сечения порожнего корпуса аппарата: $F_{ан}=0,122$ м². Коэффициент заполнения аппарата: $k_3=0,1$. Мощность источников тепла, действующих в аппарате, $P=95$ Вт. Теплообмен осуществляется в неограниченной воздушной среде. Температура среды $t_c=20^\circ$ С, давление нормальное, теплообмен внешней поверхности корпуса со средой происходит в условиях естественной конвекции.

Решение

Определим величину W - тепловую проводимость. Для этого вычислим параметры, входящие в формулу

$$\left. \begin{aligned} 1,85h &= RG^2; \\ R &= \frac{1}{F_{вх}^2} + \frac{0,054(S_{з.в} + S_к) + 0,27\bar{F}}{F^3} + \frac{1}{F_{ш}^2} + \frac{1,7}{F_{вых}^2} \quad \text{м}^{-4} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Известно, что

$$G_r = 1,36 \sqrt{\frac{h}{R}} \quad \text{кг/с} \quad (2)$$

Если $c_p = 1000$ Дж/(кг·град), то

$$W = C_p G_r = 1,36 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{h}{R}} \quad \text{Вт/град} \quad (3)$$

Тогда подставляя необходимые значения, получим

$$F_{вх}^2 = (1,6 \cdot 10^{-2})^2 = 2,56 \cdot 10^{-4} \quad \text{м}^2;$$

$$F_{ш}^2 = (1,75 \cdot 10^{-2})^2 = 3,06 \cdot 10^{-4} \quad \text{м}^2.$$

Площадь поперечного сечения порожнего корпуса

$$\bar{F} = F_{ан}(1 - k_3) = 0,122(1 - 0,1) = 0,11 \quad \text{м}^2,$$

откуда

$$\bar{F}^3 = 0,11^3 = 1,32 \cdot 10^{-3} \quad \text{м}^2;$$

тогда

$$R = \frac{1}{2,56 \cdot 10^{-4}} + \frac{0,054(0,247 + 0,695) + 0,27 \cdot 0,11}{1,32 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{3,06 \cdot 10^{-4}} + \frac{1,7}{2,56 \cdot 10^{-4}} = 1,39 \cdot 10^4 \quad \text{м}^{-4}$$

Подставляя в (3) данные получим

$$W = 1,36 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{0,206}{1,39 \cdot 10^4}} = 5,24 \quad \text{Вт/град}$$

По формулам (4) найдем тепловые коэффициенты:

$$F_{3.c} = \frac{\left(1 + \frac{3S_{3.в}}{W}\right)\left(\frac{5}{2} + \frac{S_{3.л}}{S_k}\right) + \frac{3S_k}{W}\left(\frac{3}{2} + \frac{S_{3.л}}{S_k}\right)}{6S_{3.в}\left[\frac{S_{3.л}}{S_k}\left(1 + \frac{9}{2}\frac{S_k}{W}\right) + \frac{5}{2}\left(1 + \frac{S_{3.л}}{S_{3.в}}\right)\left(1 + \frac{9}{2}\frac{S_k}{W}\right)\right]}$$

$$F_{к.с} = \frac{\frac{S_{3.л}}{S_k}\left(1 + \frac{3S_k}{W}\right) + \frac{3S_{3.в}}{W}\left(1 + \frac{S_{3.л}}{S_k}\right)}{6S_{3.в}\left[\frac{S_{3.л}}{S_k}\left(1 + \frac{9}{2}\frac{S_k}{W}\right) + \frac{5}{2}\left(1 + \frac{S_{3.л}}{S_{3.в}}\right)\left(1 + \frac{9}{2}\frac{S_k}{W}\right)\right]} \quad (4)$$

Подставив данные, получим $F_{3.c}=0,32$ град/Вт, $F_{к.с}=0,053$ град/Вт.
Вычислим средние поверхностные перегревы нагретой зоны $\vartheta_3 = F_{3.c} \cdot P$ и корпуса аппарата $\vartheta_k = F_{к.с} \cdot P$:

$$\vartheta_3 = 0,32 \cdot 95 = 30,4 \text{ град};$$

$$\vartheta_k = 0,053 \cdot 95 = 5,0 \text{ град}.$$

Определим средние поверхностные температуры нагретой зоны и корпуса

$$t_3 = t_c + \vartheta_3 = 20 + 30,4 = 50,4 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_k = t_c + \vartheta_k = 20 + 5,0 = 25,0 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Задача 1.3

Определить температуру корпуса радиоэлектронного аппарата, имеющего следующие размеры: длина $L_1=0,176$ м, ширина $L_2=0,095$ м, и высота $h=0,072$ м. Корпус окрашен эмалевой краской (степень черноты $\epsilon=0,9$). Давление H среды, окружающей аппарат, нормальное; температура среды $t_c=20^\circ\text{C}$. Мощность источника тепла, действующих в аппарате $P=16$ Вт.

Решение

Площадь наружной поверхности корпуса:

$$S_k = 2[l_1 \cdot l_2 + (l_1 + l_2)l_3] = 2[0,176 \cdot 0,095 + 0,072 \cdot (0,176 + 0,095)] = 0,0724 \text{ м}^2.$$

Удельный тепловой поток с наружной поверхности корпуса:

$$q_{уд.к} = P/S_k = 16,0/0,0724 = 221 \text{ Вт/м}^2.$$

Так как давление среды $H=760$ мм рт. ст. больше 300 мм рт. ст., то при определении перегрева $\vartheta_{рк}$ и коэффициентов k_s , k_t , k_ϵ , и k_H необходимо воспользоваться графиками (см.рис.) и формулой

$$k_t = 1,09 - 0,45 \cdot 10^{-2} t_c$$

при этом

$$\vartheta_{рк} = \vartheta_{рк}(221) = 21,9 \text{ град};$$

$$k_s = k_s(0,0724) = 0,93;$$

$$k_t = k_t(20) = 1,0;$$

$$k_\epsilon = k_\epsilon(0,9) = 1,0;$$

$$k_H = k_H(760) = 1,0.$$

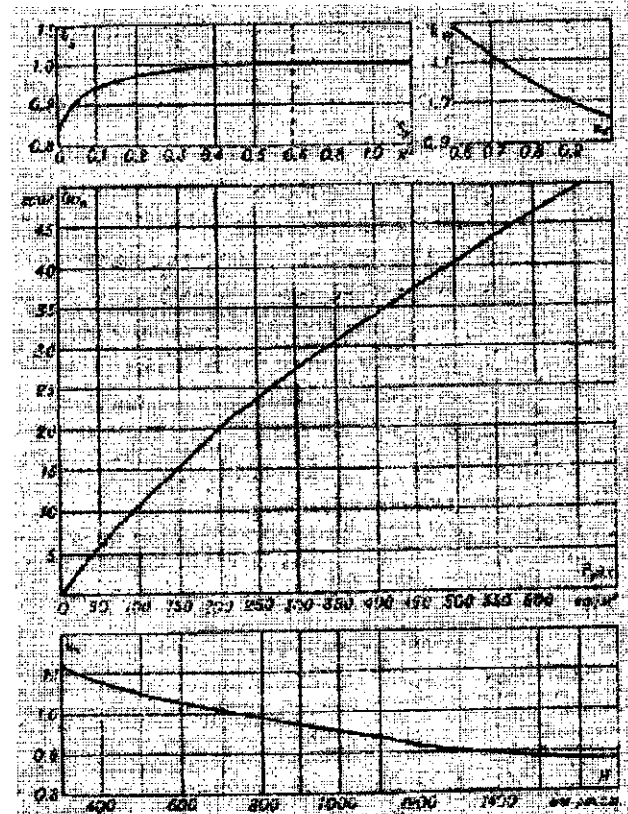


Рис. Графики для расчета среднего перегрева ϑ_k корпуса аппарата ($300 \leq H \leq 1500$ мм рт. ст.)

Определим перегрев корпуса аппарата:

$$\vartheta_k = \vartheta_{p,k} k_s k_r k_e k_n = 21,9 \cdot 0,93 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 20,4 \text{ град.}$$

Температура корпуса:

$$t_k = \vartheta_k + t_c = 20,4 + 20 = 40,4 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Задача 1.4

Определить средние поверхностные перегревы нагретой зоны, корпуса и среднеобъемный перегрев воздуха внутри радиоэлектронного аппарата.

Нагретая зона представляет собой блок модулей, которые установлены на текстолитовых платах (монтаж односторонний). Блок окружен пылезащищенным корпусом, размеры которого $L_1=0,126$ м, $L_2=0,226$ м, $h=0,292$ м. Корпус изготовлен из листовой стали и окрашен эмалевой краской ($\epsilon_k=0,9$). Теплообмен внешних поверхностей корпуса с окружающей средой происходит в условиях естественной конвекции. Температура окружающей среды $t_c=23,5$ °C. Размеры нагретой зоны $L_x=0,260$ м, $L_z=0,2$ м и $L_y=0,105$ м. Количество плат в аппарате $m=5$. Величина зазора между платами $b_p=20$ мм. На каждой плате расположено 20 модулей ($N=20$), размеры которых следующие: высота $h_m=8$ мм, длина и ширина $l_m=\Delta_m=40$ мм. Модули расположены по площади платы равномерно. Коэффициенты теплопроводности по осям модулей равны: $\lambda_{mx}=\lambda_{my}=24$ Вт/(м·град); $\lambda_{mz}=5,85$ Вт/(м·град). Толщина монтажной платы $\delta_n=4$ мм. Степень черноты поверхностей нагретой зоны $\epsilon_3=0,9$. Суммарная мощность источников тепла в аппарате $P=50$ Вт. Эффективные коэффициенты теплопроводности нагретой зоны в направлениях осей x и z равны: $\lambda_x=0,17$ Вт/(м·град); $\lambda_z=0,20$ Вт/(м·град).

Решение

Объем всех модулей, смонтированных на плате:

$$V_m = N l_m \Delta_m h_m \quad (1)$$

$$V_m = 20 \cdot 0,04 \cdot 0,04 \cdot 0,008 = 2,56 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

По формуле (2) определяем эффективную толщину платы и эффективный зазор между платами:

$$b = b_p - \frac{V_m}{L_x L_z}, \quad \delta = \delta_n + \frac{V_m}{L_x L_z} \quad (2)$$

$$b = 0,02 - \frac{2,56 \cdot 10^{-4}}{0,26 \cdot 0,2} = 0,015 \text{ м}, \quad \delta = 0,004 + \frac{2,56 \cdot 10^{-4}}{0,26 \cdot 0,2} = 0,009 \text{ м.}$$

Площадь поверхности, натянутой на нагретую зону, вычисляем по формуле (3):

$$S_3 = 2(L_x L_y + L_x L_z + L_y L_z), \quad (3)$$

$$S_3 = 2(0,26 \cdot 0,105 + 0,26 \cdot 0,2 + 0,105 \cdot 0,2) = 0,201 \text{ м}^2.$$

Площадь поверхности корпуса:

$$S_k = 2(L_1 L_2 + L_1 h + L_2 h), \quad (4)$$

$$S_k = 2(0,292 \cdot 0,126 + 0,226 \cdot 0,126 + 0,292 \cdot 0,226) = 0,262 \text{ м}^2$$

Площади внутренней и внешней поверхностей нагретой зоны определим по формулам (5):

$$S_{31} = 2L_x L_z (m-1), \quad S_{32} = 2[L_x L_z + m\delta(L_x + L_z)]; \quad (5)$$

$$S_{31} = 2(5-1) \cdot 0,26 \cdot 0,2 = 0,416 \text{ м}^2;$$

$$S_{32} = 2 \cdot 0,26 \cdot 0,2 + 2 \cdot 5 \cdot 0,009 \cdot (0,2 + 0,26) = 0,146 \text{ м}^2.$$

Определим по формулам (6) параметры A и C :

$$A = 1 + \frac{S_k}{S_{32} + \frac{0,055}{b} S_{31}}, \quad C = \frac{4,55 S_k}{S_k + 3 S_{32} A}; \quad (6)$$

Подставляя значения получим

$$A = 1 + \frac{0,262}{0,146 + 0,416 \frac{0,055}{0,015}} = 1,16;$$

$$C = \frac{4,55 \cdot 0,262}{0,262 + 3 \cdot 0,201 \cdot 1,16} = 1,23.$$

Средние поверхностные перегревы нагретой зоны и корпуса вычислим по формулам (7):

$$\vartheta_k = \frac{P}{9 S_k}, \quad \vartheta_3 = \vartheta_k (1 + CA), \quad \vartheta_n = \vartheta_k (1 + C) \quad (7)$$

Подставляя значения получим

$$\vartheta_x = \frac{50}{9 \cdot 0,262} = 21,2 \text{ град};$$

$$\vartheta_3 = 21,2(1 + 1,23 \cdot 1,16) = 51,5 \text{ град};$$

$$\vartheta_b = 21,2(1 + 1,23) = 47,3 \text{ град}.$$

Задача 1.5

Рассчитать среднюю поверхностную температуру t_3 нагретой зоны аппарата, размеры которого следующие: $L_1=460$ мм, $L_2=365$ мм и $h=200$ мм. Шасси ориентировано горизонтально, расположено в средней части аппарата и занимает все его сечение. Коэффициент заполнения $k_3=0,086$. Все поверхности имеют степень черноты $\varepsilon=0,9$. Давление внутри и снаружи аппарата нормальное, температура корпуса $t_k=59,6$ °C. Поверхность нагретой зоны $S_3=0,833$ м². Производительность вентилятора $G_V=1,4 \cdot 10^{-2}$ м³/сек. Мощность источников тепла в аппарате $P=300$ Вт.

Решение

Определим удельный тепловой поток:

$$q_3 = \frac{P}{S_3} = \frac{300}{0,833} = 360 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

Найдем объем пустого корпуса аппарата:

$$V_{\text{шт}} = L_1 \cdot L_2 \cdot h = 0,46 \cdot 0,365 \cdot 0,20 = 0,0336 \text{ м}^3,$$

Вычислим среднее значение площади поперечного сечения воздушного потока:

$$F = \frac{V}{2l_1} = \frac{0,0336}{2 \cdot 0,46} = 0,0365 \text{ м}^2.$$

Рассчитаем среднюю скорость вынужденного потока воздуха:

$$v = \frac{G_V}{F} = \frac{0,014}{0,0365} = 0,383 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Определим приведенную степень черноты:

$$\varepsilon_n \approx \varepsilon^2 = 0,9 \cdot 0,9 = 0,81.$$

Найдем соотношение:

$$\frac{S_3}{l_1 l_2} = \frac{0,833}{0,46 \cdot 0,365} = 4,69.$$

Определим по графикам значения функций

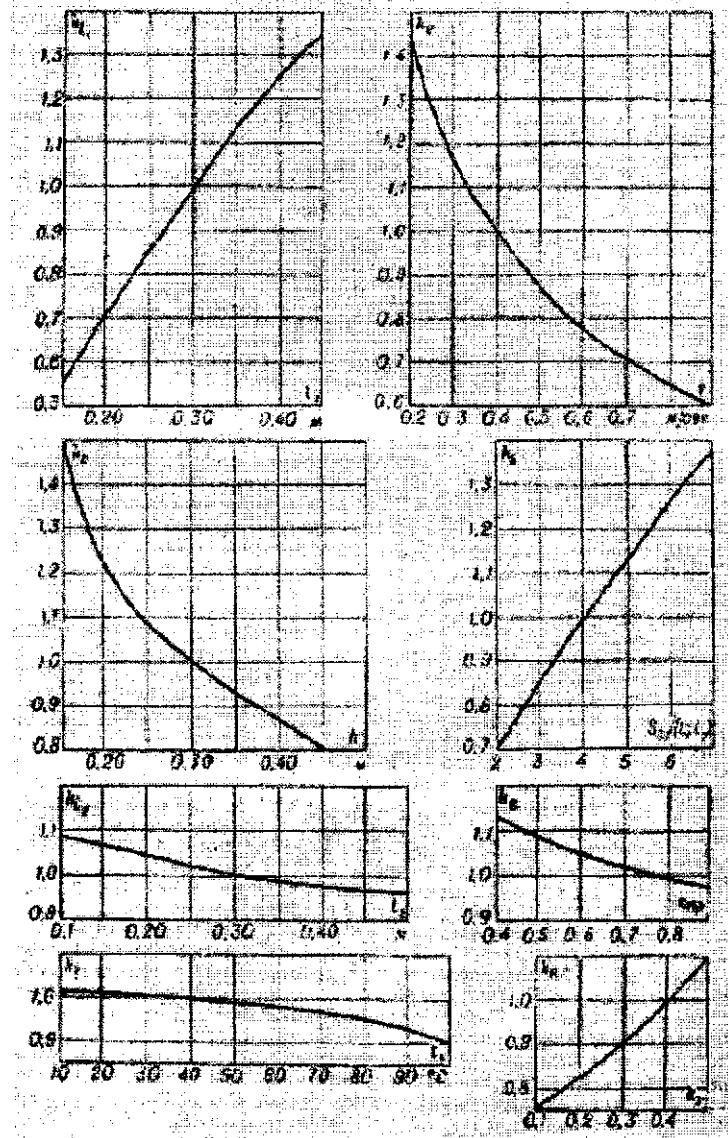


Рис. Графики для расчета среднего поверхностного перегрева нагретой зоны относительно корпуса

Из графиков получим:

$$\left. \begin{aligned} k_t &= k_t(t_k); & k_\epsilon &= k_\epsilon(\epsilon_n); & k_v &= k_v(v) \\ k_{l_1} &= k_{l_1}(l_1); & k_{l_2} &= k_{l_2}(l_2); & k_h &= k_h(h) \\ k_k &= k_k(k_s); & k_s &= k_s(S_3 / l_1 l_2) \end{aligned} \right\}$$

$$k_t = k_t(59,6) = 0,98; \quad k_\epsilon = k_\epsilon(0,81) = 1,0;$$

$$k_v = k_v(0,383) = 1,03; \quad k_{l_1} = k_{l_1}(0,46) = 1,4;$$

$$k_{l_2} = k_{l_2}(0,365) = 0,985; \quad k_h = k_h(0,2) = 1,23;$$

$$k_k = k_k(0,086) = 0,75; \quad k_s = k_s(4,96) = 1,13.$$

Рассчитываем перегрев нагретой зоны относительно корпуса $\Delta t_{з,к}$ и температуру $t_з$ нагретой зоны:

$$\left. \begin{aligned} \Delta t_{з,к} &= t_з - t_к = 0,046 P_{уд} k_t k_\epsilon k_v k_{l_1} k_{l_2} k_h k_k k_s; \\ 0 &\leq P_{уд} \leq 500 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned} \right\}$$

$$t_з = t_к + \Delta t_{з,к}$$

$$\Delta t_{з,к} = 0,046 \cdot 360 \cdot 0,98 \cdot 1,0 \cdot 1,03 \cdot 1,4 \cdot 0,985 \cdot 1,23 \cdot 0,75 \cdot 1,13 = 24 \text{ град}$$

$$t_з = 59,6 + 24 = 84 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Задача 1.6

Провести ориентировочный тепловой расчет резисторов и дискретного транзистора фрагмента ГИС при следующих исходных данных: ГИС размещена на ситалловой подложке СТ-50-1 толщиной 0,6 мм в металлюстеклянном корпусе К151.14-2, посаженном с помощью клея (0,1 мм) на теплоотводящую шину; размеры контакта корпуса с теплоотводом 15 × 7 мм; мощность, выделяемая в корпусе - 0,2 Вт; максимальная температура окружающей среды в процессе эксплуатации ИМС 50°С, $\alpha=300$, внутреннее тепловое сопротивление КТ324 $R_{Твн}=860^\circ \text{C/Вт}$.

Элемент	$P_{\text{от}}$ Вт × 10 ⁻³	$\theta_{\text{с}}$	$T_{\text{max доп}}$ °С
КТ324	15	10,5	85
R ₁	25	4,0	125
R ₂	60	20,4	125

Рассеиваемые мощности и перегрев элементов и максимально допустимые рабочие температуры приведены в таблице.

Решение

Внутренний перегрев области p-n-перехода транзистора КТ324

$$\theta_{\text{вн}} = R_{\text{Твн}} P_{\text{с}}$$

$$\theta_{\text{вн}} = 860 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 17,5^\circ\text{C}$$

Оцениваем перегрев корпуса по соотношению:

$$\theta_{\text{к}} = R_{\text{к}} P_{\text{с}},$$

где $R_{\text{к}} = 1/(\alpha S_T)$ - тепловое сопротивление корпуса.

Тогда

$$\theta_{\text{к}} = 0,2 / (300 \cdot 15 \cdot 7 \cdot 10^{-6}) = 6,3^\circ\text{C}$$

Проводим оценки рабочих температур и сравнение с максимально допустимой температурой по следующим соотношениям

$$T_{\text{с}} = T_{\text{с max}} + \theta_{\text{к}} + \theta_{\text{с}} \leq T_{\text{max доп}},$$

$$T_{\text{нк}} = T_{\text{с max}} + \theta_{\text{к}} + \theta_{\text{с}} + \theta_{\text{вн}} \leq T_{\text{max доп}},$$

где $T_{\text{с max}}$ - максимальная температура окружающей среды в процессе эксплуатации, заданная в ТУ; $T_{\text{max доп}}$ - максимально допустимая рабочая температура элемента и компонента.

Тогда

$$T_{R1} = 50 + 6,3 + 4,0 \approx 60^\circ\text{C} < 125^\circ\text{C},$$

$$T_{R2} = 50 + 6,3 + 20,0 \approx 77^\circ\text{C} < 125^\circ\text{C},$$

$$T_{\text{КТ324}} = 50 + 6,3 + 10,5 + 17,5 \approx 84,3^\circ\text{C} < 85^\circ\text{C}.$$

Таким образом, наиболее теплонагруженным из рассматриваемых электрорадиоэлементов является транзистор, его рабочая температура в самых неблагоприятных условиях лишь немного меньше предельно допустимой.

В рамках допущений ориентировочного расчета можно сделать вывод, что для данной ИМС температура внешней среды 50°С является предельно допустимой.

Задача 1.7

Оценить рабочую температуру элементов полупроводниковой ИМС, потребляющей мощность 0,2 Вт, размещенной в металлоглазном круглом корпусе с использованием эвтектического сплава. Диаметр основания корпуса 15 мм. Условия эксплуатации: $T_{\text{max доп}}=150^\circ\text{C}$, охлаждение корпуса осуществляется кондукцией через тонкий воздушный промежуток, тепловое сопротивление $R_T=0$, перегрев кристалла относительно подложки или основания корпуса $\theta_{\text{кр}}=0$, толщина кристалла $h_{\text{к}}=0,2$ мм, коэффициент теплопроводности кремния $\lambda_{\text{кр}}=80$ Вт/(м·°C).

Решение

Перегрев корпуса рассчитывается по формуле

$$\theta_{\text{к}} = R_{\text{к}} P_{\Sigma}$$

где $R_{\text{к}} = 1/(\alpha S_T)$ - тепловое сопротивление корпуса.

Поскольку при теплоотводе кондукцией через тонкий воздушный промежуток $\alpha \approx 3 \cdot 10^2$, а площадь теплового контакта корпуса с теплоотводом $S_T = \pi R^2$, то перегрев корпуса будет равен

$$\theta_{\text{к}} = 0,2 / (3 \cdot 10^2 \cdot 3,14 \cdot 7,5^2 \cdot 10^{-6}) = 3,7^\circ\text{C}$$

Внутренний перегрев области *p-n*-перехода определяется по формуле

$$\theta_{\text{ин}} = R_{\text{Твн}} P = h_{\text{кр}} P / \lambda_{\text{кр}}$$

$$\theta_{\text{ин}} = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2) / 80 = 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2 \approx 0$$

Условие обеспечения нормальных тепловых режимов записывается в виде

$$T_3 = T_{\text{с max}} + \theta_{\text{к}} + \theta_{\text{кр}} + \theta_{\text{ин}} \leq T_{\text{max доп}}$$

где T_3 - температура элементов полупроводниковой ИМС.

Таким образом

$$T_3 = 125 + 3,7 \approx 129^\circ\text{C} < 150^\circ\text{C}$$

Задача 1.8

$P=0,2$ Вт, размеры кристалла $1,5 \times 1,5 \times 0,2$ мм, $h_{\text{кл}} \approx 0,1$ мм, $\lambda_{\text{кл}}=1,1$ Вт/(м·°C), $\lambda_{\text{кр}}=130$ Вт/(м·°C), $T_{\text{доп}}=150^\circ\text{C}$, $T_{\text{с max}}=125^\circ\text{C}$. Найти допустимое значение полного теплового сопротивления корпуса.

Решение

Допустимое значение полного теплового сопротивления корпуса

$$R_{\text{Тк}} \leq \frac{T_{\text{доп}} - T_{\text{с max}}}{P} - \frac{1}{S_{\text{кр}}} \left(\frac{h_{\text{кр}}}{\lambda_{\text{кр}}} + \frac{h_{\text{кл}}}{\lambda_{\text{кл}}} \right),$$

Тогда

$$R_{\text{Тк}} \leq \frac{150 - 125}{0,2} - \frac{1}{1,5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{130} + \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{1,1} \right) \approx 85^\circ\text{C} / \text{Вт}$$

Задача 1.9

Среднеповерхностная температура кожуха радиоэлектронного аппарата $t_3=40^\circ\text{C}$. Размеры аппарата $L_1=0,3$ м, $L_2=0,2$ м, $L_3=0,15$ м, степень черноты $\epsilon=0,86$, температура среды $t_c=20^\circ\text{C}$, $A_2=1,36$ Вт/м^{7/4}·град^{5/4}, $A_3=1,55$ Вт/м²·град^{4/3}, $\phi=1$.

Рассчитать мощность, рассеиваемую радиоэлектронным аппаратом, при нормальном атмосферном давлении.

Решение

1. Определим площади S_1, S_2, S_3 :

$$S_1 = l_1 \cdot l_3 = 0,2 \cdot 0,15 = 0,03 \text{ м}^2;$$

$$S_2 = l_2 \cdot l_3 = 0,3 \cdot 0,15 = 0,045 \text{ м}^2;$$

$$S_3 = l_2 \cdot l_1 = 0,3 \cdot 0,2 = 0,06 \text{ м}^2.$$

2. Для каждой из поверхностей определим законы теплообмена по формуле:

$$(t - t_c) \leq \left(\frac{840}{L} \right)^3, \text{ [град]}$$

Для поверхности S_1 : $(40 - 20) \leq \left(\frac{840}{200} \right)^3$; $20 \leq (4,2)^3$; $20 \leq 74,088$, так

как неравенство выполняется, то у поверхности S_1 теплообмен подчиняется закону $1/4$ степени.

Для поверхностей S_2 и S_3 определяющим размером будет l_2 , поэтому все рассуждения для этих поверхностей можно вести одновременно:

$$20 \leq \left(\frac{840}{300} \right)^3; \quad 20 \leq (2,8)^3; \quad 20 \leq 19,7,$$

так как неравенство не выполняется, то у поверхностей S_2 и S_3 теплообмен подчиняется закону $1/3$ степени.

3. Определяем конвективные коэффициенты теплоотдачи. Для поверхности S_1 (ориентирована вертикально, закон теплообмена подчиняется $1/4$ степени):

$$\alpha_{k_1} = A_2 \left(\frac{t - t_c}{h} \right)^{1/4} = |h = l_3| = 1,36 \cdot \left(\frac{40 - 20}{0,15} \right)^{1/4} = 1,36 \cdot (133,3)^{1/4} = 1,36 \cdot 3,398 \approx 4,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$$

Для поверхности S_2 (ориентирована вертикально, закон теплообмена подчиняется $1/3$ степени):

$$\alpha_{k_2} = A_3 (t - t_c)^{1/3} = 1,55 \cdot (20)^{1/3} = 1,55 \cdot 2,71 = 4,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$$

Для поверхности S_3 (ориентирована горизонтально, нагретой стороной вверх, закон теплообмена подчиняется $1/3$ степени):

$$\alpha_{k_3} = 1,3 \cdot A_3 (t - t_c)^{1/3} = 1,3 \cdot 1,55 \cdot (20)^{1/3} = 5,46 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$$

4. Определим коэффициент теплоотдачи излучением:

$$\alpha_n = \epsilon_{\text{пр12}} \cdot \varphi_{12} \cdot f(t, t_c) = 0,86 \cdot 1 \cdot 6,35 \approx 5,46 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$$

5. По закону Ньютона-Рихмана определим рассеиваемую мощность:

$$P = \sigma_{\Sigma} (t - t_c); \quad \sigma_{\Sigma} = \sum \sigma_i; \quad \sigma_i = \alpha_n \cdot S_m$$

$$\sigma_{k_1} = \alpha_{k_1} \cdot S_1 = 4,6 \cdot 0,03 = 0,138 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$$

$$\sigma_{k_2} = \alpha_{k_2} \cdot S_2 = 4,2 \cdot 0,045 = 0,189 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$$

$$\sigma_{k_3} = \alpha_{k_3} \cdot S_3 = 5,46 \cdot 0,06 = 0,3276 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$$

$$\sigma_n = \alpha_n \cdot S_1 = 5,46 \cdot 0,03 = 0,1638 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$$

$$\sigma_{n_2} = \alpha_n \cdot S_2 = 5,46 \cdot 0,045 = 0,2457 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$$

$$\sigma_{n_3} = \alpha_n \cdot S_3 = 5,46 \cdot 0,06 = 0,3276 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$$

$$P = 2 \cdot (0,138 + 0,189 + 0,3276 + 0,1638 + 0,2457 + 0,3276) \cdot (40 - 20) = 2 \cdot 1,3917 \cdot 20 \approx 55,7 \text{ Вт}$$

Задача 1.10

Резистор обдувается продольным потоком воздуха, температура которого $t_c = 20^\circ \text{C}$, скорость $u = 2 \text{ м/с}$, физические параметры воздуха: $\lambda_f = 2,60 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$, $\nu_f = 15,05 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Средняя температура поверхности сопротивления $t = 80^\circ \text{C}$, длина резистора $l = 10 \text{ см}$. Определить конвективный коэффициент теплоотдачи.

Решение

Рассчитаем критерий Рейнольдса:

$$Re_f = \frac{u \cdot l}{\nu_f} = \frac{2 \cdot 0,1}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 13,3 \cdot 10^3 < 10^5, \text{ т. е. имеет место ламинарный}$$

режим движения воздуха вдоль резистора.

По формуле: $Nu_f = 0,57 \sqrt{Re_f}$, определим критерий Нуссельта.

$Nu_f = 65,5$, но можно записать, что $Nu_f = \frac{\alpha_k \cdot l}{\lambda_f}$, откуда

$$\alpha_k = \frac{Nu_f \cdot \lambda_f}{l} = \frac{65,5 \cdot 2,60 \cdot 10^{-2}}{0,1} = 17 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$$

Задача 1.11

Необходимо определить способ охлаждения блока в негерметичном корпусе со следующими исходными данными: $P = 0,5 \text{ кВт}$; $\Delta t_c = 30^\circ \text{C}$; $q = 400 \text{ Вт/м}^2$; режим работы длительный, давление воздуха, окружающего блок, нормальное, вероятность обеспечения теплового режима не ниже 0,6.

Решение

Из графика определяем область целесообразного применения способа охлаждения. По графику видно, что точка с заданными параметрами попадает в область 2, т. е. возможно применение как естественного, так и принудительного воздушного охлаждения.

По графику вероятностных кривых находим, что при естественном воздушном охлаждении РЭС с перфорированным корпусом вероятность обеспечения теплового режима $p = 0,28$. Это говорит о том, что тепловой режим практически не будет обеспечен.

По графику вероятностных кривых для РЭС с принудительным охлаждением для вероятности $p=0,6$ находим требуемый для обеспечения нормального теплового режима удельный расход воздуха:

$$\frac{G}{P} = 240 \text{ кг/ч·кВт}, \text{ откуда } G = 240 \cdot 0,5 = 120 \text{ кг/ч}$$

Известно, что при рациональном проектировании можно обеспечить заданный тепловой режим при удельном расходе воздуха не выше 180-250 кг/ч·кВт, т. е. можно сделать вывод, что целесообразно применить принудительное воздушное охлаждение.

Задача 1.12

Необходимо решить вопрос, следует ли проектировать некоторое перфорированное радиоэлектронное устройство в виде двух отдельных блоков (функциональный и блок питания) либо разместить все в одном блоке. Допустимо только естественное воздушное охлаждение. Показатели для функционального блока $\Delta t_c=30^\circ \text{C}$; $q=250 \text{ Вт/м}^2$; для блока питания $\Delta t_c=60^\circ \text{C}$, $q=250 \text{ Вт/м}^2$. При монтаже в одном блоке показатели имеют следующие значения: $\Delta t_c=30^\circ \text{C}$, $q=390 \text{ Вт/м}^2$.

Решение

Так как по условию задачи допустимо только применение естественного воздушного охлаждения, то по графику вероятностных кривых определим, что вероятность обеспечения теплового режима p для двух различных вариантов:

I вариант — функциональный блок и блок питания выполняются как отдельные блоки;

II вариант — функциональный блок и блок питания размещены в одном блоке.

Тогда:

I вариант:

функциональный блок — $p=0,35$

блок питания — $p=0,95$

II вариант — $p=0,28$

Отсюда можно сделать вывод, что не рекомендуется использовать один блок, т. е. второй вариант для данного способа охлаждения является неприемлемым.

Задача 1.13

Определить конвективный коэффициент теплоотдачи вертикально ориентированной плоскости высотой $h=0,6 \text{ м}$. Средняя температура плоскости $t=80^\circ \text{C}$, температура среды $t_c=20^\circ \text{C}$. Конвекция естественная, давление воздуха нормальное, коэффициент, учитывающий параметры среды $A_3=1,49 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}^{4/3}$.

Решение

Для определения закона теплообмена воспользуемся формулой:

$$(t - t_c) \leq \left(\frac{840}{L} \right)^3 \text{ [град]}.$$

В нашем случае,

$$\left(\frac{840}{600} \right)^3 = 2,7 < (t - t_c) = (80 - 20) = 60 \text{ град},$$

т.е. теплообмен подчиняется "закону $1/3$ ". Тогда:

$$\alpha_k = A_3(t - t_c)^{1/3} = 1,49 \cdot 60^{1/3} = 1,49 \cdot 3,92 = 5,85 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}.$$

Задача 1.14

Вычислить r_c крепёжного соединения от ППП к шасси (см.рис. а).

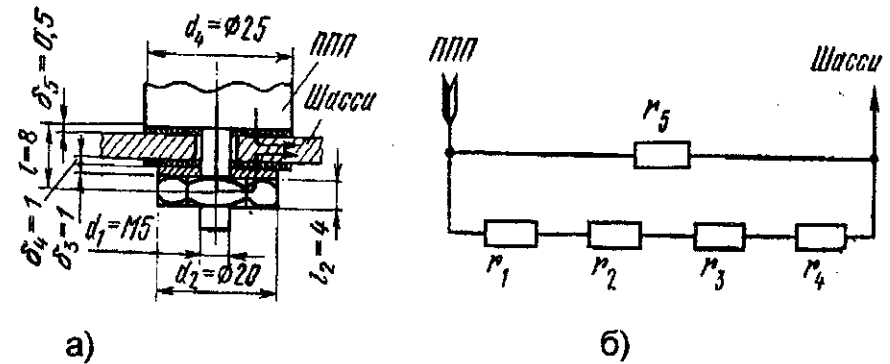


Рис. Конструктивная (а) и электротепловая схемы установки полупроводникового прибора на шасси

Винт крепления, шайба и гайка изготовлены из стали (λ_1), изоляционные шайбы - из текстолита (λ_2).

Решение

Так как между винтом крепления и шасси есть воздушный зазор, то поток тепловой энергии (или рассеиваемая мощность) P имеет два пути: от ППП через верхнюю шайбу в шасси и от ППП через винт крепления, гайку и две шайбы в шасси. Эквивалентная схема для r_e показана на рис. б. Определяем r_1 (размеры по рис. а). Для винта крепления

$$r_1 = 4l_1 / \pi d_1^2 \lambda_1 = 4 \cdot 0,8 \cdot 10^{-2} / \pi \cdot 0,25 \cdot 10^{-4} \cdot 45 = 9,05 \text{ град/Вт};$$

для гайки $S = \pi 0,25 d_2 l_2$ при этом длина пути теплового потока

$$\delta_2 = 0,5l_2 + 0,25d_2 + 0,5l_2 = l_2 + 0,25d_2$$

$$r_2 = (0,4 + 0,5) \cdot 10^{-2} / \pi \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,4 \cdot 10^{-2} \cdot 45 = 3,17 \text{ град/Вт};$$

для шайбы

$$r_3 = 4\delta_3 / \pi(d_2^2 - d_1^2)\lambda_1 =$$

$$4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2} / \pi(2^2 - 0,5^2) \cdot 10^{-4} \cdot 45 = 0,075 \text{ град/Вт},$$

для нижней изоляционной шайбы

$$r_4 = 4\delta_4 / \pi(d_4^2 - d_1^2)\lambda_2 = 4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2} / \pi(2,5^2 - 0,5^2) \cdot 0,27 \cdot 10^{-4} =$$

$$= 7,86 \text{ град/Вт};$$

для верхней изоляционной шайбы

$$r_5 = 4\delta_5 / \pi(d_4^2 - d_1^2)\lambda_2 = 4 \cdot 0,05 \cdot 10^{-2} / \pi(2,5^2 - 0,5^2) \cdot 0,27 \cdot 10^{-4} =$$

$$= 3,93 \text{ град/Вт};$$

Определяем суммарное тепловое сопротивление крепёжного соединения:

$$r_e = (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) r_5 / (r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5) =$$

$$(9,05 + 3,17 + 0,075 + 7,86) \cdot 3,93 :$$

$$(9,05 + 3,17 + 0,075 + 7,86 + 3,93) = 3,32 \text{ град/Вт}.$$

Задача 1.15

РЭС работает в условиях естественной конвекции воздуха в неограниченном объёме (объём, где расположена РЭС, намного больше объёма РЭС) и на уровне моря. Вычислить комплекс критериев $Gr \cdot Pr$ если определяющий размер $l=0,3$ м, $\Delta\theta=50$ К ($\theta_c = 273$ К); составить критериальное уравнение и вычислить α_k

Решение

Вычисляем

$$\theta = \frac{\theta_c + \theta_{ср}}{2} = \frac{\theta_c + (\theta_c + \Delta\theta)}{2} = 298,$$

$$Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot c_p \cdot \rho}{\nu \cdot \lambda} = \frac{9,81 \cdot 0,00366 \cdot 0,3^3 \cdot 50 \cdot [0,05 \cdot 1,2]}{15,1 \cdot 10^{-6} \cdot 2,59 \cdot 10^{-2}} = 1,5 \cdot 10^8.$$

Известно, что для случая, когда $Gr \cdot Pr = 1,5 \cdot 10^8$, режим движения среды турбулентный, при этом коэффициенты $c = 0,135$, $m = n = 0,33$.

Тогда из формулы $Nu = c \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot Gr^m \cdot K_{дон}$ получаем

$$Nu = 0,135 \cdot Pr^{0,33} \cdot Gr^{0,33}$$

После подстановки исходных параметров в уравнение для критериев получим

$$\alpha_k = 0,135 \cdot \lambda \cdot l^{-1} (c_p \cdot \rho \cdot \beta \cdot \Delta\theta \cdot l^3 \cdot \lambda^{-1} \cdot \nu^{-1})^{0,33} =$$

$$= 0,135 \cdot 2,59 \cdot 10^{-2} \cdot 0,3^{-1} \cdot (1005 \cdot 1,21 \cdot 0,00366 \times$$

$$\times 9,81 \cdot 50 \cdot 0,3^3 \cdot 2,59^{-1} \cdot 15,1^{-1} \cdot 10^6)^{0,33} = 5,82 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 1.16

Среднеповерхностная температура кожуха радиоэлектронного аппарата t_c . Размеры аппарата $L_1=0,5$ м, $L_2=0,4$ м, $H=0,3$ м, коэффициент черноты $\varepsilon=0,82$, температура среды $t_c=25$ °С.

Рассчитайте мощность, рассеиваемую радиоэлектронным аппаратом, при нормальном атмосферном давлении и давлении $P=380$ мм.рт.ст.

Задача 1.17

Радиоэлектронный аппарат рассеивает мощность $P=120$ Вт. Размеры аппарата $L_1=0,4$ м, $L_2=0,5$ м, $H=0,2$ м, коэффициент черноты кожуха $\varepsilon=0,88$, температура среды $t_c=15$ °С. Рассчитайте среднеповерхностную температуру кожуха при нормальном атмосферном давлении и давлении $P=500$ мм.рт.ст.

Задача 1.18

Две плоские поверхности размером $0,4 \times 0,6$ м расстояние между которыми $\delta=0,06$, находятся в теплообмене. Температура первой поверхности $t_1=55$ °С, второй - $t_2(t_1 > t_2)=25$ °С, коэффициенты черноты соответственно $\epsilon=0,5$ и $\epsilon=0,8$. Рассчитайте тепловой поток от первой поверхности ко второй при горизонтальном (первая поверхность сверху, вторая снизу и наоборот) и вертикальном расположении поверхностей. Атмосферное давление $P=420$ мм.рт.ст.

Задача 1.19

Плоская двухслойная вертикальная стенка размерами $L=0,4$ м, $H=0,6$ м делит радиоэлектронный аппарат на две области. Температура воздуха в первой области $t_{c1}=45$ °С, температура поверхности стенки, обращенной к первой области $t_{s1}=60$ °С, коэффициент черноты $\epsilon=0,72$. Толщина и теплопроводность слоев стенки соответственно равны $\delta_1=3$ мм, $\lambda_1=0,2$ Вт/м·°С, и $\delta_2=2,0$ мм, $\lambda_2=0,08$ Вт/м·°С. Рассчитайте тепловой поток через стенку, температуру на границе слоев, температуру второй поверхности стенки и воздуха во второй области.

Задача 1.20

Рассчитайте температуру p - n -перехода полупроводникового прибора ГТ804, установленного в центре горизонтального металлического диска радиуса $L_0=60$ мм, толщиной $\delta=4$ мм.

Мощность, рассеиваемая полупроводниковым прибором $P=4$ Вт, тепловое сопротивление переход-корпус ППП - $R_{п-к}=2,0$ °С/Вт, корпус-диск - $R_{кд}=0,3$ °С/Вт, теплопроводность материала диска $\lambda=396$ Вт/м·°С, коэффициент черноты поверхности $\epsilon=0,6$, температура среды $t_c=20$ °С. Мощностью, рассеиваемой непосредственно корпусом ППП, пренебречь.

Задача 1.21

В центре диска радиуса $L_0=60$ мм, толщиной $\delta=3,0$ мм установлен полупроводниковый прибор КТ805. Теплопроводность материала диска $\lambda=30$ Вт/м·°С, коэффициент черноты $\epsilon=0,4$, среднеповерхностная температура диска $t_s=70$ °С, температура среды $t_c=20$ °С, тепловое сопротивление переход-корпус ППП - $R=3,3$ °С/Вт, корпус-диск $R=0,4$ °С/Вт.

Определить мощность, рассеиваемую полупроводниковым прибором, и температуру p - n -перехода.

Задача 1.22

В круглый стержень диаметром $d=10$ мм и длиной $l=380$ мм втекает тепловой поток $P=6$ Вт. Коэффициент теплопроводности материала стержня $\lambda=47$ Вт/м·°С, усредненный коэффициент теплоотдачи поверхности $\alpha=12$ Вт/м²·°С. Рассчитайте температуру перегрева стержня в точках с координатой $X=l$. Постройте график $\vartheta=f(P)$.

Задача 1.23

Резистор МТ-2 (размеры резистора $l=28$ мм, $d=8,6$ мм) в условиях естественной конвекции рассеивает номинальную мощность. Коэффициент черноты резистора $\epsilon=0,8$. Рассчитайте допустимую мощность, которую может рассеять резистор, если он находится в поперечном потоке воздуха, скорость которого $\vartheta=3$ м/с, температура среды $t_c=35$ °С. Мощностью рассеиваемой выводами пренебречь.

Задача 1.24

Верхняя сторона плоской горизонтальной поверхности размером $0,4 \times 0,4$ м² омывается принудительным потоком воздуха со средней скоростью $\vartheta=1$ м/с. Температура поверхности $t_s=55$ °С, температура воздуха $t_c=25$ °С, коэффициент черноты поверхности $\epsilon=0,86$. Определите тепловой поток, рассеиваемый поверхностью при естественной конвекции и принудительном обдуве.

Задача 1.25

Полупроводниковый прибор ГТ804, рассеивающий мощность $P=7$ Вт, установлен в центре прямоугольной металлической пластины с размерами 70×120 мм². Пластина с обеих сторон омывается потоком воздуха вдоль большей стороны, скорость потока $\vartheta=2$ м/с, температура воздуха $t_s=20$ °С. Рассчитайте температуру p - n -перехода полупроводникового прибора. Тепловое сопротивление переход-корпус ППП - $R_{п-к}=0,2$ °С/Вт, корпус-пластина - $R_{к-п}=2,0$ °С/Вт.

Задача 1.26

Шасси радиоэлектронного аппарата имеет три паза, размеры которых в поперечном сечении 28×10 мм, длина $L=0,4$ м. По пазам прогоняется вода со средней скоростью $\vartheta=0,4$ м/с и температурой $t_c=30$ °С. Температура шасси $t_s=40$ °С. Рассчитайте тепловой поток, уносимый прогоняемой жидкостью.

Задача 1.27

Радиоэлектронный аппарат в герметичном кожухе рассеивает мощность $P=180$ Вт, размеры аппарата $L_1=0,4$ м, $L_2=0,4$ м, $H=0,2$ м, толщина стенок кожуха $\Delta=3$ мм. Шасси ориентировано горизонтально, размеры шасси равны внутренним размерам кожуха. Высота условной нагретой зоны $h_1=0,1$ м, расстояние от нагретой зоны до крышки $h_2=0,08$ м, шасси с установленными на нем деталями и кожух имеют коэффициент черноты $\epsilon=0,9$. Рассчитайте температуру нагретой зоны и кожуха аппарата, если температура окружающего воздуха $t=20$ °С. Постройте тепловые характеристики $\vartheta=f(P)$ кожуха и нагретой зоны.

Задача 1.28

Радиоэлектронный аппарат размерами $L_1=0,5$ м, $L_2=0,3$ м, $H=0,3$ м рассеивает мощность $P=130$ Вт. Крышка и дно кожуха перфорированы, площадь отверстий составляет $\eta=12$ % от площади крышки (дна). Шасси ориентировано горизонтально, площадь отверстий в шасси $S_{ш.о}=8 \cdot 10^{-3}$ м², реальная площадь теплоотдающей поверхности шасси с установленными на нем деталями $S_3=0,68$ м² площадь излучающей поверхности нагретой зоны $S_{з.л}=0,54$ м², коэффициент заполнения аппарата $K_3=0,5$, коэффициент черноты кожуха и шасси с установленными деталями $\epsilon=0,8$. Рассчитайте температуру нагретой зоны и кожуха аппарата, если температура окружающего воздуха $t_c=20$ °С.

Задача 1.29

Радиоэлектронный аппарат, рассеивающий мощность $P=220$ Вт, охлаждается принудительным продувом воздуха. Размеры аппарата $L_1=0,5$ м, $L_2=0,3$ м, $H=0,2$ м, шасси с установленными на нем радиодеталями расположено горизонтально, усредненный диаметр радиодетали $d=18$ мм, площадь реальной теплоотдающей поверхности шасси с установленными радиодеталями $S_3=0,6$ м², площадь излучающей поверхно-

сти нагретой зоны $S_{з.л}=0,33$ м². Воздух продувается вдоль большего размера шасси, средняя площадь сечения, свободная для прохода воздуха $S_0=0,04$ м², объемный расход воздуха $V=0,16$ м³/с, температура воздуха на входе равна температуре среды $t_c=25$ °С. Рассчитайте температуру нагретой зоны и кожуха аппарата.

Задача 1.30

Радиоэлектронный аппарат размерами $L_1=0,5$ м, $L_2=0,4$ м, $H=0,4$ м рассеивает мощность $P=200$ Вт. Шасси расположено горизонтально и делит внутренний объем примерно на равные области, размеры шасси $0,45 \times 0,38$ м². Коэффициент заполнения аппарата - $K=0,3$, реальная теплоотдающая поверхность нагретой зоны (шасси и установленных на нем деталей) - $S_3=0,78$ м², площадь излучающей поверхности нагретой зоны $S_{з.л}=0,54$ м². Внутри аппарата установлен вентилятор производительностью $G=0,14$ м³/с, создающий принудительную циркуляцию воздуха вдоль большей стороны шасси. Рассчитайте температуру нагретой зоны и кожуха аппарата, если температура среды $t_c=20$ °С, коэффициент черноты поверхности кожуха, шасси и деталей $\epsilon=0,9$.

Задача 1.31

Транзистор КТ802, рассеивающий мощность $P=20$ Вт, устанавливается на радиаторе. Рассчитайте размеры основания $D \times H$, количество ребер n , расстояние между ними b , задавшись высотой h и толщиной δ ребра, толщиной основания Δ и коэффициентом черноты ϵ . Тепловое сопротивление переход-корпус ППП - $R_{п-к}=2,5$ °С/Вт, корпус-радиатор $R_{к-р}=0,3$ °С/Вт, допустимая температура перехода $t_{п.л}=150$ °С температура окружающей среды $t_c=20$ °С. Материал радиатора - дюралюминий $\lambda=120$ Вт/м·°С. Мощностью, рассеиваемой непосредственно корпусом ППП, пренебречь. Постройте тепловые характеристики $\vartheta=f(P)$ перехода и радиатора.

Задача 1.32

Рассчитайте мощность, которую может рассеять транзистор КТ805, установленный на плоском одностороннем ребренном радиаторе, размеры основания которого $D=100$ мм, $H=124$ мм, толщина основания $\Delta=5$ мм, количество ребер $n=8$, расстояние между ребрами $b=12$ мм, высота ребра $h=15$ мм, толщина $\delta=3$ мм, коэффициент черноты $\epsilon=0,9$, со-

противление переход-корпус $R=3,3$ °C/Вт, корпус-радиатор $R=0,4$ °C/Вт. Материал радиатора - дюралюминий ($\lambda=172$ Вт/м·°C). Температура окружающей среды $t_c=22$ °C. Мощностью, рассеиваемой непосредственно корпусом ППП, пренебречь.

Задача 1.33

Радиоэлектронный аппарат цилиндрической формы размерами $D=0,3$ м, $H=0,25$ м имеет оребренную боковую поверхность. Количество ребер $n=60$, высота ребра $h=18$ мм, толщина $\delta=3$ мм, коэффициент черноты поверхности ребер $\epsilon=0,86$. Рассчитайте мощность, которую может рассеять аппарат, если среднеповерхностная температура корпуса не должна превышать $t_{с,д}=50$ °C. Температура среды $t_c=20$ °C.

2. ЗАЩИТА ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

Задача 2.1

Конструктивный элемент аппаратуры колеблется по гармоническому закону с амплитудой 0,1 мм на частоте 100 Гц. Определить величину вибрационной перегрузки, которой подвергается элемент.

Решение

Для решения задачи воспользуемся формулой:

$$j = \frac{A \cdot f^2}{250} = \frac{0,1 \cdot 100^2}{250} = \frac{1000}{250} = 4g$$

Задача 2.2

Величина вибрационной перегрузки на элементе конструкции составляет 1g. Определить амплитуду колебаний элемента, если он вибрирует по гармоническому закону с частотой 100 Гц.

Решение

Для решения задачи воспользуемся формулой:

$$j = \frac{A \cdot f^2}{250} \Rightarrow A = \frac{j \cdot 250}{f^2} = \frac{1 \cdot 250}{100^2} = 0,025 \text{ мм}$$

Задача 2.3

Определить значение собственной резонансной частоты платы из стеклотекстолита ($\rho=2$ г/см³, $k_m=0,74$) толщиной 1,5 мм, размеры сторон которой 200×100 мм, а коэффициент В составляет 124 единиц. Масса элементов, равномерно размещенных на поверхности платы, составляет 60 г.

Решение

Для решения задачи воспользуемся формулами:

$$f_0 = \frac{k_m \cdot k_b \cdot B \cdot h \cdot 10^4}{a^2}; \quad k_b = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_s}{m_n}}}$$

$$m_n = a \cdot b \cdot h \cdot \rho = 20 \cdot 10 \cdot 0,15 \cdot 2 = 60 \text{ г};$$

$$k_b = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_s}{m_n}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7;$$

$$f_0 = \frac{0,74 \cdot 0,7 \cdot 124 \cdot 0,15 \cdot 10^4}{20^2} \approx 241 \text{ Гц}$$

Задача 2.4

Определить амплитуду колебаний центра печатной платы на резонансной частоте, если логарифмический декремент платы $\delta=0,06$, а амплитуда колебаний мест закрепления платы — 0,01 мм.

Решение

Для решения задачи воспользуемся формулой:

$$A = A_0 \cdot \mu;$$

для расчета μ воспользуемся формулой:

$$\mu = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 \cdot \alpha^2}}{\sqrt{(1 - \alpha^2)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 \cdot \alpha^2}} = \left| \alpha = \frac{f}{f_0} = 1 \text{ т.к. } f = f_0 \right| = \frac{\pi}{\delta}$$

таким образом получим:

$$A = A_0 \cdot \frac{\pi}{\delta} = 0,01 \cdot \frac{3,14}{0,06} = 0,52 \text{ мм};$$

Задача 2.5

Блок, масса которого составляет 10 кг, установлен на четырех одинаковых виброизоляторах типа АД-3, расположенных снизу в горизонтальной плоскости. Коэффициент жесткости используемых виброизоля-

торов составляет 4 Н/мм. Определить значение собственной частоты блока.

Решение

Для решения задачи воспользуемся формулой:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\Sigma}}{m}} = |k_{\Sigma} = 4k| = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4 \cdot 4 \cdot 10^3}{10}} = \frac{40}{6,28} = 6,37 \text{ Гц.}$$

Задача 2.6

На конструкцию типа балки, выполненную из стали, нанесен слой вибропоглощающего (ВП) материала. Толщины слоев: балки - $H_1=2$ мм; вибропоглощающего материала - $H_2=12$ мм, модули упругости соответственно - $E_1=2 \cdot 10^{11}$ Н/м², $E_2=2 \cdot 10^8$ Н/м²; коэффициент механических потерь (КМП) конструкции без ВП слоя $\eta_n=0,05$, $\eta_1=0,01$; $\eta_2=0,8$. Определить КМП конструкции.

Решение

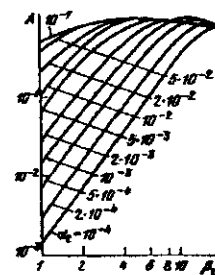


Рис. Зависимость коэффициента A от физических и геометрических параметров вибропоглощающего слоя

Определим относительный модуль упругости α_2 :

$$\alpha_2 = \frac{E_2}{E_1} = \frac{2 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^{11}} = 10^{-3}$$

и относительную толщину вибропоглощающего слоя

$$\beta_2 = \frac{H_2}{H_1} = \frac{12}{2} = 6.$$

По графику (см.рис.) для $\beta_2 = 6$ и $\alpha_2 = 10^{-3}$ находим, что $A=0,4$.

Находим коэффициент механической прочности η :

$$\eta = \eta_n + (\eta_2 - \eta_1)A,$$

$$\eta = 0,05 + (0,8 - 0,01) \cdot 0,4 = 0,366.$$

Задача 2.7

Определить собственную частоту колебаний этажерочного микро модуля, установленного на печатной плате.

Данные микро модуля $a=b=11 \cdot 10^{-3}$ м; $l=25 \cdot 10^{-3}$ м; $I=0,134 \cdot 10^{-4}$ м⁴; $E=4,57 \cdot 10^8$ Н/м²; $m_0=2,74$ Н/м; $\alpha=1,86$.

Решение

Подставив исходные данные в формулу

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\alpha^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \text{ Гц,}$$

где l - длина балки, м; E - модуль нормальной упругости, Н/м², I - момент инерции балки, м⁴, α - корень трансцендентного уравнения частот (находится из уравнений изгибных колебаний для различных вариантов крепления балки); m - приведенная погонная масса балки, определяемая по формуле

$$m = m_0 + \frac{1}{l} \sum_{s=1}^i k_s m_s \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}},$$

где m_0 - равномерно распределенная погонная масса; m_s - сосредоточенная масса; s - номер массы; k_s - коэффициент приведения сосредоточенной массы m_s к равномерно распределенной в зависимости от вида крепления и относительной абсциссы сосредоточенной массы $\varphi_s = \frac{x_s}{l}$ (см. рис. и табл.).

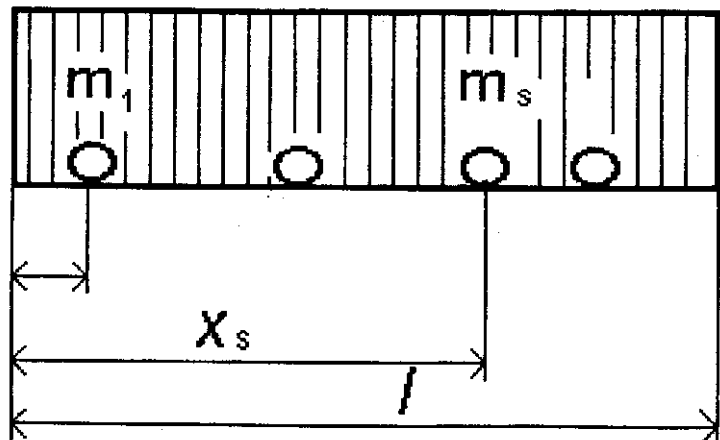


Рис. Схема приведения сосредоточенных масс к распределенной массе

Вид закрепления балки	Значение $\varphi_s = \frac{x_s}{l}$								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	0,04	0,37	1,2	2,12	2,52	2,12	1,2	0,37	0,04
	0,31	1,07	1,86	2,27	2,09	1,16	0,72	0,21	0,02
	0	0,02	0,08	0,21	0,46	0,85	1,38	2,1	2,97
	0,19	0,69	1,31	1,81	2,0	1,81	1,31	0,69	0,19

Подставляя данные, получим

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{1,86}{(25 \cdot 10^{-3})^2} \sqrt{\frac{4,57 \cdot 10^8 \cdot 0,134 \cdot 10^{-4}}{2,74}} = 410 \text{ Гц.}$$

Задача 2.8

Рассчитать собственную частоту вибрации печатной платы (см. рис.).

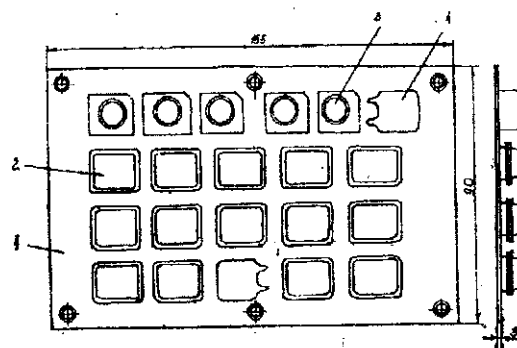


Рис. Печатная плата с радиоэлементами:
1 - печатная плата; 2 - микросхема;
3 - потенциометр; 4 - конденсатор

Материал платы - гетинакс, $k_m = 0,54$; масса элементов: микросхемы - $2 \cdot 14 = 28$ г; конденсаторы - $1,5 \cdot 2 = 3$ г; потенциометры - $3 \cdot 5 = 15$ г; $m_{пл} = 50$ г.

Решение

Определим поправочный коэффициент k_b :

$$k_b = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_e}{m_{пл}}}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1+\frac{46}{50}}} = 0,72.$$

Отношение сторон составляет $\frac{b}{a} = \frac{155}{90} = 1,72$. Считая, что пластина свободно оперта по контуру, находим коэффициент $C=96$. Подставляя в формулу

$$f = \frac{k_m \cdot k_b \cdot C \cdot h}{b^2} \cdot 10^4 \text{ Гц},$$

числовые значения, получим

$$f = \frac{0,54 \cdot 0,73 \cdot 96 \cdot 0,3}{15,5^2} \cdot 10^4 = 473 \text{ Гц}.$$

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

Задача 3.1

Определить коэффициент паразитной индуктивной связи между выходным и входным трансформаторами усилителя звуковых частот на высшей частоте $f_B=5$ кГц, если из расчета усилителя известно, что входное сопротивление первого усилительного прибора, подключенного к входному трансформатору, $Z_{\text{вх}}=1$ кОм, индуктивность рассеивания входного трансформатора $L_{\text{свх}}=40$ мГ, индуктивность рассеивания выходного трансформатора $L_{\text{сввых}}=10$ мГ, полное сопротивление выходной цепи $Z_B=2$ кОм, коэффициент связи между трансформаторами $k_{\text{св}}=0,02\%$.

Решение

$$M_{\text{пар}} = k_{\text{св}} \sqrt{L_{\text{свх}} L_{\text{сввых}}} = 0,2 \cdot 10^{-3} \sqrt{40 \cdot 10} = 4 \text{ мкГ},$$

Тогда

$$\beta = U_{\text{пр}} / E_{\text{ист}} = \omega M_{\text{пар}} Z_{\text{пр}} / Z_A Z_B = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 / 2 \cdot 10^3 \cdot 10 = 0,63\%.$$

Задача № 3.2

Определить, можно ли в широкополосном одноконтурном резонансном усилителе при основной частоте $f_0=60$ МГц и полосе пропускания $\Delta f_{0,7}=20$ МГц каждого каскада установить контурные катушки без экранов или экранирующих перегородок. Коэффициент связи между соседними катушками $k_{\text{св}}=0,1\%$, коэффициент усиления одного каскада равен 5.

Решение

Учитывая, что затухание контура

$$d_3 = \Delta f_{0,7} / f_0 = 20/60 = 0,333,$$

по формуле $\beta = \frac{M_{\text{пар}}}{rL} = \frac{k_{\text{св}}}{d_3}$ получим

$$\beta = 0,1\% / 0,333 = 0,3\%.$$

Поскольку $5 \ll 1/\beta = 333$ устанавливать катушки без экранов и перегородок можно, при условии, что емкостная связь между контурами также достаточно мала.

Задача 3.3

Определить коэффициент паразитной связи на высшей граничной частоте усилителя звуковых частот $f_v = 5$ кГц, если входное сопротивление усилителя $Z_B = 1$ кОм и он связан с источником наводки емкостью $C_{\text{пар}} = 1$ пФ.

Решение

При $X_{\text{пар}} \gg Z_B$

$$U_n = E_{\text{ист}} \frac{Z_B}{X_{\text{пар}}}$$

Тогда

$$\beta = U_n / E_{\text{ист}} = Z_B / X_{\text{пар}} = \omega C_{\text{пар}} Z_B = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-12} \cdot 10^3 = 0,00314 \%$$

Задача 3.4

Определить коэффициент паразитной связи полевого транзистора типа КП 101, если затвор его связан с источником наводки емкостью $C_{\text{пар}} = 1$ пФ. Входная емкость транзистора не более 12 пФ.

Решение

Поскольку сопротивление чисто емкостное

$$U_n = E_{\text{ист}} \frac{C_{\text{пар}}}{C_B + C_{\text{пар}}}$$

Тогда

$$\beta = U_n / E_{\text{ист}} = C_{\text{пар}} / (C_B + C_{\text{пар}}) = 1 / (12 + 1) = 7,7 \%$$

Задача 3.5

Определить коэффициент паразитной связи резонансного контура, настроенного на стандартную промежуточную частоту $f_0 = 465$ кГц, имеющего полосу пропускания $\Delta f_{0,7} = 10$ кГц и емкость $C = 200$ пФ, если он связан с источником наводки емкостью $C_{\text{пар}} = 1$ пФ.

Решение

Определим затухание контура

$$d_3 = \Delta f_{0,7} / f_0 = 10 / 465 = 0,0215$$

Наведенное напряжение

$$U_n = E_{\text{ист}} \frac{Z_B}{X_{\text{пар}}} = E_{\text{ист}} \frac{C_{\text{пар}}}{C d_3}$$

Тогда

$$\beta = U_n / E_{\text{ист}} = C_{\text{пар}} / C d_3 = 1 / 200 \times 0,0215 = 23 \%$$

Задача 3.6

Определить эффективность экранирования на частотах 0...1 кГц, даваемую кубическим экраном с длиной стенки $D = 100$ мм, выполненным из стали толщиной $d = 0,8$ мм, с $\mu_r = 100$.

Решение

Эффективность экранирования

$$\mathcal{E} = 1 + \mu_r d / D = 1 + (100 \cdot 0,8) / 100 = 1,8$$

Эффективность экранирования в неперлах

$$B = \ln \mathcal{E} = \ln 1,8 = 0,59 \text{ Нп.}$$

Эффективность экранирования в децибелах

$$A = 20 \lg \mathcal{E} = 20 \lg 1,8 = 5,1 \text{ дБ.}$$

Из этих цифр следует, что такой экран почти не действует.

Задача 3.7

Определить эффективность экранирования на частоте 0,1 МГц, даваемую стальным экраном толщиной $d = 0,8$ мм, при диаметре $D = 80$ мм, эквивалентная глубина проникновения вихревых токов $\delta = 0,049$ мм, относительная магнитная проницаемость стали $\mu_r = 100$, $m = 2$.

Решение

Так как $d > \delta$, воспользуемся формулой

$$\mathcal{E} = e^{d/\delta} \left(\frac{1}{2} + \frac{D}{2,8 m \mu_r \delta} \right),$$

где m - коэффициент формы экрана (для цилиндрического $m = 2$).

Тогда

$$\Theta = e^{0,8/0,049} \left(0,5 + \frac{80}{2,8 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 0,049} \right) = 4,1 \cdot 10^7.$$

Эффективность экрана в неперах определяется по формуле

$$B = \ln \Theta = \ln 4,1 \cdot 10^7 \approx 17,5 \text{ Нп.}$$

Эффективность экрана в децибелах определяют по формуле

$$A = 20 \lg \Theta = 20 \lg 4,1 \cdot 10^7 \approx 152 \text{ дБ.}$$

Задача 3.8

Определить эффективность экранирования вихревыми токами на частотах 100 и 1000 Гц, даваемую цилиндрическим стальным экраном толщиной $d=0,8$ мм, при диаметре $D=80$ мм.

Исходные данные: эквивалентная глубина проникновения вихревых токов $\delta_1=1,55$ мм, $\delta_2=0,49$ мм, удельная проводимость стали $\sigma=10 \cdot 10^4$ См·см³; относительная магнитная проницаемость стали $\mu_r=100$; магнитная постоянная $\mu_0=1,256 \cdot 10^{-8}$ Г·см⁻¹; для цилиндрического экрана коэффициент формы $m=2$.

Решение

Для $f_1 \delta > d$, поэтому воспользуемся следующим выражением

$$\Theta = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot D \cdot d}{2m} \right)^2},$$

Угловую частоту можно определить по формуле

$$\omega = 2\pi f.$$

Тогда

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 = 628 \text{ Гц.}$$

Тогда

$$\Theta_1 = \sqrt{1 + \left(\frac{628 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 10 \cdot 10^4 \cdot 8 \cdot 0,08}{2 \cdot 2} \right)^2} = 1,006;$$

Для $f_2 \delta < d$, поэтому воспользуемся следующим выражением

$$\Theta = e^{d/\delta} \left(\frac{1}{2} + \frac{D}{2,8 m \mu_r \delta} \right),$$

Тогда

$$\Theta_2 = e^{0,8/0,49} \left(0,5 + \frac{80}{2,8 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 0,49} \right) = 4.$$

Эффективность экрана в неперах определяется по формуле

$$B = \ln \Theta = 0,115A \text{ [Нп].}$$

Тогда

$$B_1 = \ln 1,006 \approx 0,006 \text{ Нп,} \quad B_2 = \ln 4 \approx 1,4 \text{ Нп.}$$

Эффективность экрана в децибелах определяют по формуле

$$A = 20 \lg \Theta = 8,7B \text{ [дБ].}$$

Тогда

$$A_1 = 20 \lg 1,006 \approx 0,05 \text{ дБ,} \quad A_2 = 20 \lg 4 \approx 12,0 \text{ дБ.}$$

Задача 3.9

Определить эффективность экранирования электромагнитного поля излучения, даваемую медной фольгой с толщиной $d=0,1$ мм на частоте $f=10^7$ Гц. Эквивалентная глубина проникновения $\delta=0,021$ мм, волновое сопротивление воздуха $Z_{с \text{ возд}}=377$ Ом, магнитная постоянная $\mu_0=1,256 \cdot 10^{-8}$ Г·см⁻¹, удельная проводимость меди $\sigma=57 \cdot 10^4$ См·см³, относительная магнитная проницаемость меди $\mu_r=1$.

Решение

Волновое сопротивление металла

$$Z_{с \text{ возд}} = \sqrt{\frac{\omega \mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{2\pi f \cdot \mu_0 \mu_r}{\sigma}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 10^7 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8}}{57 \cdot 10^4}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом;}$$

Эффективность экранирования

$$\Theta \approx \frac{e^{d/\delta} Z_{с \text{ возд}}}{4Z_{с \text{ мет}}} = \frac{e^{4,8} \cdot 377}{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}} = 9,6 \cdot 10^6;$$

Эффективность экрана в неперах определяется по формуле

$$B = \ln \Theta = 0,115A \text{ [Нп].}$$

Тогда

$$B = \ln 9,6 \cdot 10^6 \approx 16 \text{ Нп.}$$

Эффективность экрана в децибелах определяют по формуле

$$A = 20 \lg \Theta = 8,7B \text{ [дБ].}$$

Тогда

$$A = 20 \lg 9,6 \cdot 10^6 \approx 139 \text{ дБ.}$$

Задача 3.10

Определить экранирующее действие вихревых токов на частотах 0,1 и 1 кГц, возникающих в цилиндрическом медном экране.

Исходные данные: толщина экрана $\delta_{\text{эк}}=0,8$ мм; диаметр экрана $D=80$ мм; эквивалентная глубина проникновения вихревых токов на частоте $f_1=0,1$ кГц равна $\delta_1=6,7$ мм, а на частоте $f_2=1$ кГц равна $\delta_2=2,1$ мм, удельная проводимость меди $\sigma=57 \cdot 10^4$ См·см³; относительная магнитная проницаемость меди $\mu_r=1$; магнитная постоянная $\mu_0=1,256 \cdot 10^{-8}$ Г·см⁻¹; для цилиндрического экрана коэффициент формы $m=2$.

Решение

Для обеих частот $\delta_{\text{эк}} < \delta$, поэтому воспользуемся следующим выражением

$$\Theta = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega \cdot \mu \cdot \sigma \cdot D \cdot \delta_{\text{эк}}}{2m} \right)^2},$$

где m - коэффициент формы экрана (для цилиндрического $m=2$).

Угловую частоту можно определить по формуле

$$\omega = 2\pi f.$$

Тогда

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 = 628 \text{ Гц.}$$

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1000 = 6280 \text{ Гц.}$$

Магнитную проницаемость определим по формуле

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 1 = 1,256 \cdot 10^{-8} \text{ Г·см}^{-1}.$$

Тогда

$$\Theta_1 = \sqrt{1 + \left(\frac{628 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 57 \cdot 10^4 \cdot 8 \cdot 0,08}{2 \cdot 2} \right)^2} = 1,23.$$

$$\Theta_2 = \sqrt{1 + \left(\frac{6280 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 57 \cdot 10^4 \cdot 8 \cdot 0,08}{2 \cdot 2} \right)^2} = 7,27.$$

Эффективность экрана в неперах определяется по формуле

$$B = \ln \Theta = 0,1154 \text{ Нп.}$$

Тогда

$$B_1 = \ln 1,23 \approx 0,21 \text{ Нп,} \quad B_2 = \ln 7,27 \approx 2,0 \text{ Нп.}$$

Эффективность экрана в децибелах определяют по формуле

$$A = 20 \lg \Theta = 8,7 \text{ дБ.}$$

Тогда

$$A_1 = 20 \lg 1,23 \approx 1,8 \text{ дБ,} \quad A_2 = 20 \lg 7,27 \approx 17,4 \text{ дБ.}$$

Задача 3.11

Определить эффективность медного цилиндрического экрана на частоте 0,1 МГц, если толщина экрана $\delta_{\text{эк}}=0,8$ мм, диаметр экрана $D=80$ мм, эквивалентная глубина проникновения вихревых токов $\delta=0,21$ мм, относительная магнитная проницаемость меди $\mu_r=1$, $m=2$.

Решение

Так как $\delta_{\text{эк}} > \delta$, воспользуемся формулой

$$\Theta = e^{\delta_{\text{эк}}/\delta} \left(\frac{1}{2} + \frac{D}{2,8 m \mu_r \delta} \right),$$

где m - коэффициент формы экрана (для цилиндрического $m=2$).

Тогда

$$\Theta = e^{0,08/0,021} \left(\frac{1}{2} + \frac{8}{2,8 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,021} \right) = 3063.$$

Эффективность экрана в неперах определяется по формуле

$$B = \ln \Theta = \ln 3063 \approx 8 \text{ Нп.}$$

Эффективность экрана в децибелах определяют по формуле

$$A = 20 \lg \Theta = 20 \lg 3063 \approx 69,7 \text{ дБ.}$$

Задача 3.12

Определить какой толщины должен быть алюминиевый экран, чтобы получить $\Theta \geq 100$, если частота $f=1$ МГц, эквивалентная глубина проникновения $\delta=0,088$ мм.

Решение

Так как

$$B = \ln \Theta = 0,1154 \text{ Нп, то}$$

$$B_{\min} = 0,115 \cdot 100 = 11,5 \text{ Нп.}$$

Тогда толщину алюминиевого экрана определим по формуле

$$\delta_{\text{экp}} = B_{\min} \cdot \delta = 11,5 \cdot 0,088 \approx 1 \text{ мм.}$$

Задача 3.13

Установить кратность уменьшения индуктивности при применении бифиляра. Пусть связь между элементами осуществляется проводом диаметром $d=0,05$ см, толщиной изоляции $a=0,05$ см и длиной $l=50$ см.

Решение

Для изолированного проводника индуктивность определяется как

$$L = 2l \left[\ln \left(\frac{4l}{d} \right) - 1 \right] = 2 \cdot 50 [8,29 - 1] = 729 \text{ нГн.}$$

Считая бифиляр двупроводной линией с расстоянием между проводниками $D = d + 2a$, найдем

$$L_6 = 2l \cdot \ln 2 \left(\frac{d + 2a}{d} \right) = 2 \cdot 50 \cdot \ln 6 = 179 \text{ нГн.}$$

Таким образом, применение бифиляра вызывает уменьшение индуктивности, а следовательно, и наводок в $L/L_6 = 729/179 \approx 4,1$ раза.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 3.14

Определить коэффициент паразитной связи на высшей граничной частоте усилителя звуковой частоты $f_n=5$ кГц, если входное сопротивление усилителя $Z_{\text{в}}=1$ кОм и он связан с источником наводки емкостью $C_{\text{пар}}=1$ пФ.

Задача 3.15

Определить коэффициент паразитной связи полевого транзистора типа КП103Е, если затвор его связан с источником наводки емкостью $C_{\text{пар}}=1$ пФ. Входная емкость транзистора не более 17 пФ.

Задача 3.16

Определить коэффициент паразитной связи резонансного контура, настроенного на стандартную промежуточную частоту $f_0=465$ кГц,

имеющего полосу пропускания $\Delta f_{0,7}=10$ кГц и емкость $C=200$ пФ, если он связан с источником наводки емкостью $C_{\text{пар}}=1$ пФ.

Задача 3.17

Транзистор 1Т313Б работает в режиме $I_3=1$ мА при $U_{\text{к}}=5$ В. Требуется определить ориентировочные значения у-параметров по частоте $f=60$ МГц при включениях по схемам ОЭ и ОБ.

Задача 3.18

Транзистор 1Т313Б работает в режиме $I_3=5$ мА при $U_{\text{к}}=5$ В. Требуется определить ориентировочные значения у-параметров по частоте $f=60$ МГц при включениях по схемам ОЭ и ОБ.

Задача 3.19

Произвести расчет у-параметров биполярного транзистора 1Т313Б при токах эмиттера 1 и 5 мА, $U_{\text{к}}=5$ В на частоте 200 МГц. Транзистор работает при включениях по схемам ОЭ и ОБ.

Задача 3.20

Определить максимально допустимый коэффициент усиления полевого транзистора КП301Б при включении с ОИ при непосредственном соединении контура с затвором ($m=1$) на частоте 465 кГц. Транзистор КП301Б имеет следующие параметры: крутизна $S=1$ мСм; входная и выходная емкости $C_{\text{вх}}=C_{\text{вых}}=3,5$ пФ; проходная емкость $C_{\text{зс}}=1$ пФ. Контур имеет среднее качество при добротности $Q=75$ и емкости $C=500$ пФ.

Задача 3.21

Определить максимально допустимый коэффициент усиления полевого транзистора КП301Б при включении с ОЗ при согласовании ($m = \sqrt{g_{\text{к}} \cdot S}$) на частоте 465 кГц. Транзистор КП301Б имеет следующие параметры: крутизна $S=1$ мСм; входная и выходная емкости $C_{\text{вх}}=C_{\text{вых}}=3,5$ пФ; проходная емкость $C_{\text{зс}}=1$ пФ. Контур имеет среднее качество при добротности $Q=75$ и емкости $C=500$ пФ.

Задача 3.22

Определить максимально допустимый коэффициент усиления полевого транзистора КП301Б при включении ОИ - ОЗ ($m=1$) на частоте 465

кГц. Транзистор КП301Б имеет следующие параметры: крутизна $S=1$ мСм; входная и выходная емкости $C_{вх}=C_{вых}=3,5$ пФ; проходная емкость $C_{ср}=1$ пФ. Контур имеет среднее качество при добротности $Q=75$ и емкости $C=500$ пФ.

Задача 3.23

Рассчитать фильтрующую цепь широкополосного шестикаскадного усилителя, работающего на основной частоте $f_0=60$ МГц. Биполярные транзисторы включены по последовательной каскадной схеме ОЭ - ОБ и работают в режиме $I_с=5$ мА; $U_к=4$ В. Для стабилизации режима применены делители, потребляющие дополнительный ток в каждом каскаде $I_{дел}=5$ мА, и эмитерные сопротивления, на которых падает часть напряжения питания в 2 В. Напряжение источника питания $E_{пит}=15$ В.

Задача 3.24

Рассчитать фильтрующую цепь двухкаскадного усилителя промежуточной частоты на биполярных транзисторах, работающего на основной частоте $f_0=465$ кГц. Усиление каждого каскада по напряжению $K_{н1}=30$. Устойчивость обеспечивается нейтрализацией проходной проводимости y_{12} или применением дополнительных двух транзисторов с включением их по каскадной схеме. Ток, потребляемый каскадом, включая делитель питания базы, 10 мА. Эквивалентное сопротивление части или всего резонансного контура между точками подключения коллектора и источника питания $R_{экв}=R_д=0,5$ кОм. Усилитель получает входные сигналы от транзисторного преобразователя частоты, связанного с ним аналогичной цепью.

Задача 3.25

Определить напряжение фона, получающегося на затворе усилительного прибора с $R_{вх}=100$ кОм. Провода сети питания и входной цепи усилительного прибора имеют диаметр 1 мм и на участке 50 мм идут параллельно на расстоянии 10 мм друг от друга, остальными связями сети с усилительным прибором можно пренебречь. Все устройство питается от одной фазы трехфазной сети с нулевым проводом, $U_{сетя}=220$ В, частота 50 Гц. Для проводов сети питания и входной цепи величина $C_{пар}=0,45$ пФ.

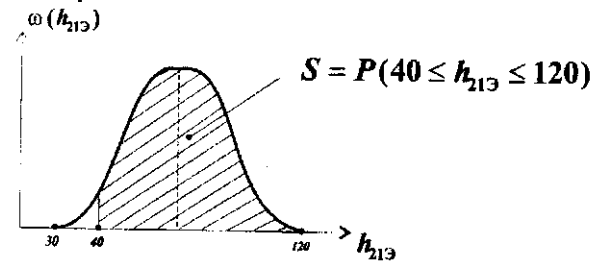
4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ РЭС

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

Задача 4.1

По ТУ транзистор типа 2Т933Б имеет значение параметра $h_{21э}=30 \dots 120$. Для работы в составе РЭУ данного вида пригодны экземпляры со значением $h_{21э} \geq 40$. Требуется определить, какое примерно число экземпляров из партии в 500 шт.件 пригодно для этих целей?

Решение



Воспользуемся предположением о нормальной модели, тогда геометрическая интерпретация интересующих вопросов такова: P определяет процент элементов, удовлетво-

ряющих указанным требованиям. Для расчета используем формулу:

$$P(a \leq x \leq b) = \Phi^* \left(\frac{b-m}{\sigma} \right) - \Phi^* \left(\frac{a-m}{\sigma} \right),$$

где $\Phi^*(...)$ - табличная функция стандартного нормального распределения.

$x \rightarrow h_{21э}$, $a = 40$, $b = 120$.

$$M = | \text{среднее значение} | = \frac{30+120}{2} = 75.$$

$$\sigma = | \text{СКО } h_{21э} | \approx \frac{h_{21\max} - m}{3} = \frac{120-75}{3} = 15.$$

Тогда:

$$P(40 \leq h_{21э} \leq 120) = \Phi^* \left(\frac{120-75}{15} \right) - \Phi^* \left(\frac{40-75}{15} \right) \approx 1 - \Phi^*(-2,3) \approx 0,98.$$

$$n = N \cdot P(40 \leq h_{21э} \leq 120) = 500 \cdot 0,98 = 490 \text{ шт.}$$

Задача 4.2

По ТУ для транзистора 2Т505Б минимальное значение параметра $h_{21Э} = 200$, а типовое значение этого параметра равно 230. Для выполнения инженерного анализа устройств, использующих указанный тип транзистора, необходимо знать математическое ожидание параметра $h_{21Э}$. Требуется определить, какое примерно количество экземпляров необходимо взять для измерения параметра $h_{21Э}$, чтобы гарантировать значение величины $M(h_{21Э})$ с ошибкой, не превышающей $\pm 5\%$?

Решение

Для расчета используем формулу:

$$n \geq \frac{t_{\gamma}^2 \cdot \sigma^2(x)}{\varepsilon^2}$$

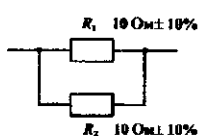
Выберем $\gamma = 0,95 \Rightarrow t_{\gamma} = 1,96 \approx 2$.

$$\varepsilon \approx \varepsilon_{от} \cdot h_{21Этип} = 0,05 \cdot 230 = 11,5.$$

$$\sigma(x) \rightarrow \sigma(h_{21Э}) = \left| \begin{array}{l} \text{воспользуемся предположением} \\ \text{о нормальной модели} \end{array} \right| \approx \frac{230 - 200}{3} = 10.$$

$$n \geq \frac{2^2 \cdot 10^2}{(11,5)^2} = 3,04 \Rightarrow n = 4 \text{ экземпляра.}$$

Задача 4.3



Между точками А и В электрической схемы устройства необходимо иметь сопротивление 5 Ом с отклонением не более $\pm 10\%$ при гарантированной вероятности $P_r = 0,9973$ и мощностью рассеивания не менее 4 Вт.

Требуется выяснить, обеспечат ли указанные требования два параллельно соединенных резистора типа МЛТ-2 с сопротивлением $R = 10 \text{ Ом} \pm 10\%$?

Решение

$$P_{рас} = P_1 + P_2 = 2 + 2 = 4 \text{ Вт.}$$

$$\delta\left(\frac{\Delta R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}\right) = \left| \begin{array}{l} \text{при } P_r = 0,9973 \\ \rho = 1 \end{array} \right| = \rho \sqrt{\sum_{i=1}^2 B_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta R_i}{R_i}\right) k_i^2} = \left| \begin{array}{l} \text{тк корреляция между} \\ R_1 \text{ и } R_2 \text{ отсутствует,} \\ \text{то } r_{R_1 R_2} = 0 \end{array} \right|$$

$$R_{\Sigma} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = 5 \text{ Ом.}$$

$$B_{R_1} = \left| B_i = \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{\varphi}, \varphi = R_{\Sigma}, x_i = R_1 \right|$$

Выполнив необходимые преобразования и подставив номинальные значения R_1 и R_2 получим:

$$B_{R_1} = 0,5.$$

Произведя аналогичный расчет B_{R_2} , получим:

$$B_{R_2} = 0,5.$$

По условию задачи имеем:

$$\delta\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right) = 10\%, \quad \delta\left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right) = 10\%.$$

Значит,

$$\delta\left(\frac{\Delta R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}\right) = 1 \sqrt{0,5^2 \cdot 10^2 \cdot 1^2 + 0,5^2 \cdot 10^2 \cdot 1^2} = \sqrt{50} \approx 7\%;$$

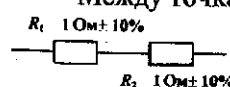
При расчете приняли $k_i = 1$, что соответствует гипотезе о нормальном распределении величин R_1 и R_2 в пределах поля допуска. Тогда:

$$\Delta R_{\Sigma} = \pm 7\%.$$

Следовательно данные резисторы обеспечат указанные требования.

Задача 4.4

Между точками А и В электрической схемы РЭУ необходимо иметь сопротивление 2 Ом с отклонением, не более $\pm 10\%$ при гарантированной вероятности $P_r = 0,9973$ и мощностью рассеивания не менее 4 Вт. Выяснить, обеспечат ли указанные требования два последовательно соединенных резистора МЛТ-2 с сопротивлением $R = 1 \text{ Ом} \pm 10\%$.



Решение

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 = 1 + 1 = 2 \text{ Ом.}$$

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2 = 2 + 2 = 4 \text{ Вт.}$$

$$\delta\left(\frac{\Delta R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}\right) = \left| \text{при } \rho = 1 \right| = \rho \sqrt{\sum_{i=1}^2 B_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta R_i}{R_i}\right) k_i^2} = \left| \begin{array}{l} \text{тк корреляция между} \\ R_1 \text{ и } R_2 \text{ отсутствует,} \\ \text{то } r_{R_1, R_2} = 0 \end{array} \right|$$

$$B_{R_i} = \left| B_i = \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{\varphi}; \varphi = R_{\Sigma}; x_i = R_i \right|$$

Выполнив необходимые преобразования и подставив номинальные значения R_1 и R_2 получим:

$$B_{R_1} = 0,5.$$

Произведя аналогичный расчет B_{R_2} , получим:

$$B_{R_2} = 0,5.$$

По условию задачи имеем:

$$\delta\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right) = 10\%, \quad \delta\left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right) = 10\%.$$

Значит,

$$\delta\left(\frac{\Delta R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}\right) = 1 \sqrt{0,5^2 \cdot 10^2 \cdot 1^2 + 0,5^2 \cdot 10^2 \cdot 1^2} = \sqrt{50} \approx 7\%;$$

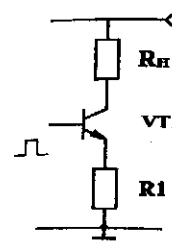
При расчете приняли $k_i=1$, что соответствует гипотезе о нормальном распределении величин R_1 и R_2 в пределах поля допуска. Тогда:

$$\Delta R_{\Sigma} = \pm 7\%.$$

Следовательно данные резисторы обеспечат указанные требования.

Задача 4.5

Требуется рассчитать вероятность безотказной работы электрического ключа за время $t=10000$ час для случая экстремального режима с учетом коэффициентов нагрузки.



VT1: 2Т841А

$R1=1 \text{ Ом } \pm 10\%$ тип МЛТ-2; $\lambda=0,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час.}$

$R_{н}=10 \dots 15 \text{ Ом}$

$U_{пит}=10 \text{ В } \pm 10\%$

Скважность управляющих импульсов $Q \approx 4$; $\tau \leq 5 \text{ мс.}$

Условия эксплуатации ключа — лабораторные.

Справочные данные VT1:

$U_{кэ \text{ нас}}=0,25 \dots 1,5 \text{ В}$; $I_{к \text{ ном. пред}}=15 \text{ А}$; $U_{кэ \text{ ном. пред}}=500 \text{ В}$; $\lambda=1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час.}$

Постоянная рассеиваемая мощность коллектора с теплоотводом 50 Вт.

Решение

Электрический ключ находится в экстремальном режиме, когда через него проходит наибольший ток (элементы находятся в экстремальном режиме):

$$U_{пит}=11 \text{ В}, \quad U_{кэ \text{ нас}}=0,25 \text{ В}, \quad R_1=0,9 \text{ Ом}, \quad R_{н}=10 \text{ Ом.}$$

Тогда ток в экстремальном режиме рассчитаем следующим образом:

$$I = \frac{U_{пит} - U_{нас}}{R_{н} + R_1} = \frac{11 - 0,25}{10 + 0,9} \approx 1,0 \text{ А.}$$

Для транзистора в качестве электрической нагрузки, существенно влияющей на надежность, будет ток, протекающий через транзистор. Тогда:

$$K_H^{(VT)} = \frac{I_{раб}}{I_{ты}} = \frac{1}{15} \approx 0,07.$$

$$K_H^{(R)} = \frac{P_{раб}}{P_{ном}} = \frac{I^2 R}{P_{ном}} = \frac{1}{2} = 0,5, \text{ (без учета скважности импульсов).}$$

$$\lambda^{(VT)}(v) = \lambda_0^{(VT)} \cdot \alpha(k_H) = |\alpha(k_H) \approx k_H| \approx \lambda_0^{(VT)} \cdot k_H = 0,07 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час.}$$

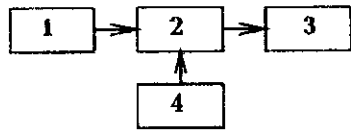
$$\lambda^{(R)}(v) = \lambda_0^{(R)} \cdot \alpha(k_H) \approx \lambda_0^{(R)} \cdot k_H = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час.}$$

$$\lambda_{\Sigma}(v) = \lambda^{(VT)}(v) + \lambda^{(R)}(v) = (0,07 + 0,25) \cdot 10^{-6} = 0,32 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час.}$$

$$P(t=10000) = e^{-\lambda_{\Sigma}(v) \cdot t} = e^{-0,0032} \approx 0,9968.$$

Задача 4.6

Электрическая принципиальная схема РЭУ разбита на 4 функционально законченные части. Электрическая структурная схема устройства при этом имеет вид:

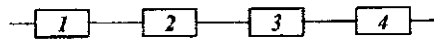


Требование, предъявляемое к надежности РЭУ, таково: вероятность безотказной работы за время $t=1000$ час. не менее 0,99. Требуется определить, какова

должна быть за время 1000 час. вероятность безотказной работы функциональных частей РЭУ?

Решение

Предположим, что с точки зрения надежности функциональные части соединены последовательно.



Тогда:

$$P_{\text{РЭУ}}(t) = P_1(t) \cdots P_4(t) = \left. \begin{array}{l} \text{предположим,} \\ \text{блоки имеют} \\ \text{равную надежность} \end{array} \right\} = P_i^4(t).$$

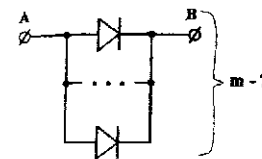
$$P_i(t) = \sqrt[4]{P_{\text{РЭУ}}(t)} = \sqrt[4]{0,99} \approx 0,9975.$$

Задача 4.7

Между точками А и В электрической схемы РЭУ необходимо обеспечить наличие полупроводящих свойств. В распоряжении инженера-конструктора имеются диоды, вероятность безотказной работы которых за интересующее время t_3 равна $P(t_3)=0,9$. Отказы диодов проявляются только в виде отказов типа "обрыв" (выгорание кристалла). Полупроводящие свойства между точками А и В за время t_3 должны обеспечиваться с вероятностью, не менее чем 0,975. Требуется найти приемлемое решение и доказать его пригодность.

Решение

$$q_{\text{ОБР}}(t_3) = 1 - P(t_3) = 1 - 0,9 = 0,1.$$



В случае двух диодов используем следующую формулу:

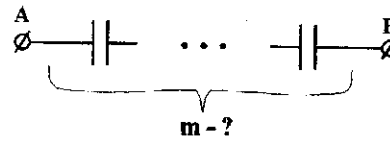
$$P(t_3) = P_{\text{VD}}^2(t_3) + 2P_{\text{VD}}(t_3) \cdot q_{\text{ОБР}}(t_3) = 0,9^2 + 2 \cdot 0,9 \cdot 0,1 =$$

Следовательно, $m=2$ (достаточно 2-х диодов).

Задача 4.8

Между точками А и В электрической схемы РЭУ необходимо обеспечить наличие емкостных свойств ("отсечь" постоянную составляющую). В распоряжении инженера-конструктора имеются конденсаторы, вероятность безотказной работы которых за интересующее время t_3 равна 0,9. Отказы конденсаторов по типу "короткое замыкание" возникают в 4 раза чаще, чем отказы типа "обрыв". Емкостные свойства между точками А и В должны обеспечиваться за время t_3 с вероятностью не менее, чем 0,95. Требуется найти решение и доказать его пригодность.

Решение



$$q(t_3) = 1 - P(t_3) = 1 - 0,9 = 0,1.$$

С учетом $q_{\text{КЗ}}:q_{\text{ОБР}} = 4:1$ получим:

$$q_{\text{КЗ}}(t_3) = 0,08, \quad q_{\text{ОБР}}(t_3) = 0,02.$$

В случае двух конденсаторов используем

следующую формулу

$$P(t_3) = P_C^2(t_3) + 2P_C(t_3) \cdot q_{\text{КЗ}}(t_3) = 0,9^2 + 2 \cdot 0,9 \cdot 0,08 = 0,954 > 0,95.$$

Следовательно, $m=2$ (достаточно 2-х конденсаторов).

Задача 4.9

На участок регулировки функциональных частей РЭУ (блоков) поступают блоки со средней плотностью 10 блоков в час. Среднее время регулировки блока равно 6 минут. Для ожидания в очереди в помещении можно поставить 3 блока. Требуется определить, какое число рабочих мест необходимо предусмотреть на участке, чтобы отказ в обслуживании получили не более чем 1,0% блоков за месяц (22 рабочих дня по 7 часов).

Решение

В данном случае имеем дело с СМО смешанного типа с ожиданием заявок в очереди. Для определения числа рабочих мест воспользуемся следующей формулой:

$$P_{n+m} = \frac{\frac{\alpha^n \left(\frac{\alpha}{n}\right)^m}{n!}}{\sum_{i=0}^n \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} \sum_{j=1}^m \left(\frac{\alpha}{n}\right)^j}$$

$$\alpha = \lambda \cdot M(T_{\text{обсл.}}) = 10 \cdot 0,1 = 1,$$

где α - коэффициент загрузки канала (рабочего места).

$$P_{\text{необсл.}} = P(x_{n+m}) = P(x_{n+3}) = P_{n+3},$$

где x - состояние СМО.

Для дальнейшего расчета будем использовать метод подбора. Так, при $n=1$ получим:

$$P_{\text{необсл.}} = P_{1+3} = 0,2 > 0,01,$$

при $n=2$:

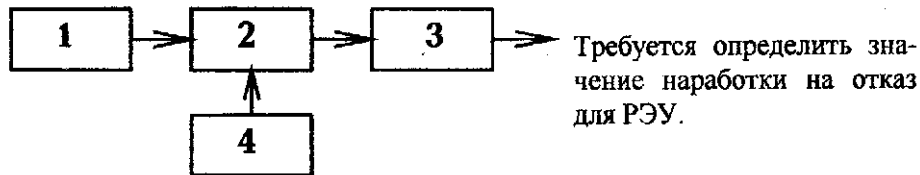
$$P_{\text{необсл.}} = P_{2+3} = 0,021 > 0,01,$$

при $n=3$:

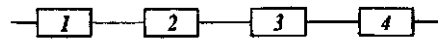
$$P_{\text{необсл.}} = P_{3+3} = 0,0022 < 0,01.$$

Задача 4.10

РЭУ состоит из четырех блоков. Нарботка на отказ для блоков соответственно составляет 6000, 8000, 5000 и 4000 час. Схема электрическая структурная РЭУ на уровне блоков имеет вид:



Решение



Будем считать, что блоки с точки зрения надежности соединены последовательно. Предполагая справедливость экспоненциального закона надежности получим:

$$\lambda_i = \frac{1}{T_{0i}}; \quad \lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 \lambda_i.$$

С учетом этого,

$$\frac{1}{T_{\text{ОРЭУ}}} = \frac{1}{T_{01}} + \dots + \frac{1}{T_{04}}.$$

Отсюда,

$$T_{\text{ОРЭУ}} \approx 1300 \text{ час.}$$

Задача 4.11

Предположим, что требования к надежности РЭУ следующие: наработка на отказ не менее 2000 час. Структура РЭУ состоит из трех блоков, два из которых уже спроектированы и наработка на отказ для них составляет соответственно 5000 и 5500 час. Требуется определить каково должно быть требование к надежности третьего блока, чтобы обеспечивалось требование к надежности РЭУ в целом.

Решение

Будем считать, что блоки с точки зрения надежности соединены последовательно. Предполагая справедливость экспоненциального закона надежности получим:

$$\lambda_i = \frac{1}{T_{0i}}; \quad \lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i.$$

Тогда,

$$\frac{1}{T_{\text{ОРЭУ}}} = \frac{1}{T_{01}} + \frac{1}{T_{02}} + \frac{1}{T_{03}}.$$

Отсюда,

$$T_{03} \approx 8500 \text{ час.}$$

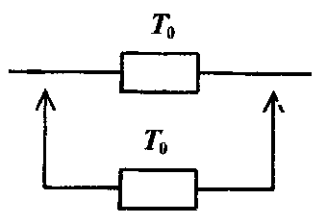
Следовательно наработка на отказ для третьего блока должна быть не менее 8500 часов.

Задача 4.12

Для повышения надежности устройства отображения информации РЛС использовано резервирование замещением с нагруженным резервом. Основное и резервное устройства одинаковы и имеют значение наработки на отказ 5000 час. Требуется определить наработку на отказ устройст-

ва с учетом резервирования. Надежность переключающего устройства считать идеальной.

Решение



$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Полагая, что справедлив экспоненциальный закон надежности получим:

$$\lambda = \frac{1}{T_0}, \quad P_i(t) = e^{-\lambda t} = P.$$

$$q_{РЭУ}^{(рез)} = q_1 \cdot q_2 = |q_1 = q_2 = q| = q^2 = |q = 1 - P| = (1 - e^{-\lambda t})^2.$$

$$P_{РЭУ}^{(рез)} = 1 - q_{РЭУ}^{(рез)} = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^2 = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}.$$

Тогда,

$$T_0^{(рез)} = \int_0^{\infty} (2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}) dt = 2 \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt - \int_0^{\infty} e^{-2\lambda t} dt = \frac{2(-1)}{\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} - \frac{1}{2\lambda} e^{-2\lambda t} \Big|_0^{\infty} =$$

$$= \frac{1}{2} T_0 e^{-2 \frac{t}{T_0}} \Big|_0^{\infty} - 2 T_0 e^{-\frac{t}{T_0}} \Big|_0^{\infty} = -2500 + 2 \cdot 5000 = 7500 \text{ час.}$$

Задача 4.13

РЭУ состоит из четырех функциональных частей. Известно, что за время работы 800 час. первая часть отказывала 5 раз, остальные за время работы 400 часов отказывали соответственно 1, 2 и 3 раза. Требуется определить наработку на отказ РЭУ в целом.

Решение

$$T_{01} = \frac{800}{5} = 160 \text{ час.}; \quad T_{02} = \frac{400}{1} = 400 \text{ час.};$$

$$T_{03} = \frac{400}{2} = 200 \text{ час.}; \quad T_{04} = \frac{400}{3} \approx 133 \text{ час.}$$

$$\frac{1}{T_{0РЭУ}} = \frac{1}{T_{01}} + \frac{1}{T_{02}} + \frac{1}{T_{03}} + \frac{1}{T_{04}}.$$

Подсчитав, получим:

$$T_{0РЭУ} \approx 47 \text{ час.}$$

Задача 4.14

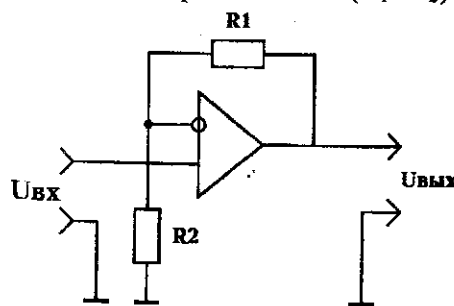
Производилось наблюдение за работой трех экземпляров РЭУ новой модели. За период наблюдения было зарегистрировано: по первому экземпляру 3 отказа, по второму и третьему 5 и 2 отказа соответственно. Нарботка первого экземпляра составила 2800, второго — 3200 и третьего — 1800 часов. Требуется определить наработку РЭУ на отказ.

Решение

$$T_{0РЭУ} = \frac{\sum_{i=1}^3 T_i^{(\Sigma)}}{\sum_{i=1}^3 n_i} = \frac{2800 + 3200 + 1800}{3 + 5 + 2} = 780 \text{ час.}$$

Задача 4.15

Коэффициент усиления каскада с использованием ИС 140УД8 определяется выражением $K = (R_1 + R_2) / R_2$.



Параметры резисторов:
 $R_1 = 2 \text{ кОм } \pm 10\%$, тип МЛТ-0,5;
 $R_2 = 10 \text{ кОм } \pm 10\%$, тип МЛТ-0,5;
 Требуется определить номинальное значение и производственный (технологический) допуск на коэффициент усиления, соответствующий вероятности $P_T = 0,9973$.

Решение

Воспользуемся выражением:

$$\Delta_{пр} = M \left(\frac{\Delta K}{K} \right) \pm \delta \left(\frac{\Delta K}{K} \right) = \left| \begin{array}{l} M(\Delta K / K) = 0 \\ \text{т.к. допуски на} \\ \text{параметры R симметр.} \end{array} \right| = \pm \delta \left(\frac{\Delta K}{K} \right).$$

$$d\left(\frac{DK}{K}\right) = r \sqrt{\sum_{i=1}^2 B_i^2 d^2\left(\frac{DR_i}{R_i}\right) K_i^2}, (\rho - \text{зависит от } P_T).$$

По условию задачи имеем: $d\left(\frac{DR_1}{R_1}\right) = d\left(\frac{DR_2}{R_2}\right) = 10\%$.

Принимаем $K_R = K_R = 1$ что соответствует гипотезе о нормальном распределении параметров R_1 и R_2 или, что тоже самое, величин $\Delta R_1 / R_1$ и $\Delta R_2 / R_2$.

$B_i = \left[\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{\varphi} \right]$, где индекс "0" означает, что в полученное выражение

должны подставляться средние (номинальные) значения параметров элементов. Тогда,

$$B_{R_1} = \left| \frac{\partial \rightarrow K = \frac{R_1 + R_2}{R_2}}{\partial x_1 = R_1} \right| = \frac{1}{R_2} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{2}{2 + 10} \approx 0,17.$$

$$B_{R_2} = \left| \frac{\partial \rightarrow K = \frac{R_1 + R_2}{R_2}}{\partial x_2 = R_2} \right| = -\frac{R_1}{R_2^2} \cdot \frac{R_2 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} \approx -0,17.$$

При $P_T = 0,9973$ $\rho = 1$. Тогда,

$$\delta\left(\frac{\Delta K}{K}\right) = 1 \sqrt{0,17^2 \cdot 10^2 \cdot 1^2 + (-0,17)^2 \cdot 10^2 \cdot 1^2} = \sqrt{5,8} \approx 2,4\%.$$

Следовательно $\Delta_{\text{нр}} = \pm 2,4\%$.

$$K_{\text{ном}} = \frac{R_{1\text{ном}} + R_{2\text{ном}}}{R_{\text{ном}}} = \frac{2 + 10}{2} = 6.$$

Поэтому $K = 6 \pm 2,4\%$, (допуск гарантируется с вероятностью 0,9973).

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 4.16

В выборке резисторов со значением сопротивления $1 \text{ кОм} \pm 20\%$ определить процент элементов, имеющих значения сопротивлений от 800 Ом до 1100 Ом.

Задача 4.17

Определить допуск старения для выходного параметра технологического процесса, определяемого моделью

$$y = x_1^{0,8} \cdot x_2^{0,6}; \quad x_1 = 1 \text{ кОм} \pm 10\%, \quad x_2 = 1000 \text{ пФ} \pm 20\%$$

Значения коэффициентов старения параметров x_1 и x_2 : $c_1 = (2 \pm 1) \cdot 10^{-4} \%$ на час. Интересующий диапазон времен $\tau = 10000$ час. Значение гарантированной вероятности обеспечения допуска принять равным 0,9973.

Задача 4.18

В РЭА применен разъем (соединитель), имеющий 20 штырей. Определить интенсивность отказов этого разъема при среднем токе через контакт 100 мА, $t_{\text{раб}} = t_{\text{ном}}$ ($20 \pm 5^\circ\text{C}$). По справочным данным для разъемов данного вида $\lambda = 0,2 \cdot 10^{-6}$ 1/ч на один контакт (штырь). Номинальный ток через контакт 1А.

Задача 4.19

Определить вероятность с которой гарантируется отсутствие постепенных отказов РЭА при следующих исходных данных:

- среднее значение выходного параметра на момент времени t : $M(Y) = 50$;
- среднее квадратическое значение параметра на момент времени t : $\sigma(Y) = 10$;
- критерий отсутствия постепенных отказов $u \geq u_{\text{ном}} - 10 \%$.

Задача 4.20

Со сборочного конвейера поступает на участок регулировки простейший поток заявок (функциональных узлов) с плотностью $\lambda = 10$ (ФУ/час). Среднее время регулировки одного ФУ $M(T_{\text{об}}) = 6$ мин. Определить какое число мест регулировщиков (каналов обслуживания) необходимо иметь, чтобы отказ получали не более 5% поступающих на регулировку ФУ?

Задача 4.21

На участок регулировки ФУ РЭА поступает простейший поток заявок с плотностью $\lambda = 6$ (блоков/час). В помещении одновременно могут

находиться, ожидая в очереди, 4 блока. Среднее время регулировки одного блока составляет 10 минут. Определить какое число мест регулировки (каналов обслуживания) необходимо иметь, чтобы относительная пропускная способность системы была не менее 0,99. (Относительная пропускная способность системы $g=1-P_n$, где P_n - вероятность не обслуживания заявки).

Задача 4.22

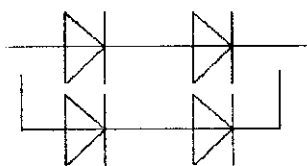
Определить показатель серийнопригодности (% выхода годных к эксплуатации) LC-контуров при значениях допуска на L и $C \pm 10\%$. Годным к эксплуатации (дальнейшей установке в РЭА) считается контур для которого выполняется условие:

$$f_{рез} - 5\% \leq f_{рез} \leq f_{рез} + 5\%$$

где $f_{рез}$ - номинальное значение резонансной частоты.

Задача 4.23

Реализовано постоянное резервирование. Характер отказов (к.з. или обрыв играет принципиальную роль). Определить вероятность безотказной работы резервируемого узла:



$$\lambda_{\text{диола}} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час, } t_{\text{зад}} = 10000 \text{ час.}$$

Отказы типа "к.з." и типа "обрыв" в диодах возникают одинаково часто.

Задача 4.24

Определить допуск старения на резонансную частоту LC-контур. $L=100 \text{ мкГ} \pm 5\%$; $C=100 \text{ пФ} \pm 10\%$.

Коэффициент старения для индуктивности $\lambda_L = (-1 \dots -3) \cdot 10^{-3} \text{ 1/час}$.

Изменение емкости за 2000 часов не более чем на +5%.

Интересующий диапазон времен $\tau=1000 \text{ час}$.

Задача 4.25

Согласно схеме ЭЗ в заданном месте должен стоять элемент с сопротивлением $5 \text{ кОм} \pm 5\%$. Для реализации этого используют два параллельно соединенных резистора с номинальным значением сопротивления 10 кОм . Необходимо рассчитать, какой допуск должны иметь резисторы

с $R=10 \text{ кОм}$, чтобы обеспечивалось требование к заданному допуску сопротивления 5 кОм ?

Задача 4.26

Выяснить из какой партии целесообразнее (с точки зрения обеспечения надежности) применять элементы в РЭУ, если $t_3=10000 \text{ час}$, а законы распределения для элементов партий нормальные с параметрами:

1-ая партия: $T_{ср}=12000 \text{ час}$; $\sigma_t=1000 \text{ час}$;

2-ая партия: $T_{ср}=30000 \text{ час}$; $\sigma_t=12500 \text{ час}$.

Вывод объяснить с помощью геометрической интерпретации.

Задача 4.27

Для выходного параметра источника опорного напряжения справедлива математическая модель вида

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{стабV1}} \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Параметры элементов: $R_1=10 \text{ кОм} \pm 5\%$; $R_2=15 \text{ кОм} \pm 5\%$; тип стабилизатора V_1 - КС133А. Требуется рассчитать процент выхода годных к эксплуатации указанных устройств (уровень серийнопригодности) в условиях серийного производства.

Задача 4.28

На участок ремонта ФУ РЭУ поступает в среднем за рабочую смену (7 часов) 140 изделий. Для ожидания в очереди на участке можно разместить 2 изделия. Необходимо рассчитать какое число мест регулировки (ремонта) следует предусмотреть на участке, чтобы в среднем за смену отказ в ремонте получали не более 5-ти изделий? Среднее время ремонта одного изделия 3 минуты.

Задача 4.29

Транзистор 2Т945А по ТУ имеет значение параметра $h_{21E}=10 \dots 60$. Требуется рассчитать какое минимальное количество экземпляров необходимо взять для измерений, чтобы по результатам статистической обработки измерений гарантировать среднее значение параметра h_{21E} с погрешностью не более чем $\pm 5\%$?

Задача 4.30

Получить матрицу чувствительности

$$y_1 = \frac{1}{2(R_1 + R_2)C_1}, \quad y_2 = \frac{(R_1 + R_2)/R_1 \cdot R_2}{2C_1},$$

$$R_1=1 \text{ кОм} \pm 10\%, \quad R_2=3 \text{ кОм} \pm 5\%, \quad C_1=1 \text{ мкФ} \pm 10\%.$$

Матрица должна состоять из относительных коэффициентов чувствительности. Применить аналитический метод.

Задача 4.31

Получить матрицу чувствительности (относительных коэффициентов чувствительности), применяя метод приращений.

$$y_1 = \frac{1}{2(R_1 + R_2)C_1}, \quad y_2 = \frac{(R_1 + R_2)/R_1 \cdot R_2}{2C_1},$$

$$R_1=1 \text{ кОм} \pm 10\%, \quad R_2=3 \text{ кОм} \pm 5\%, \quad C_1=1 \text{ мкФ} \pm 10\%.$$

Задача 4.32

Определить коэффициенты чувствительности и записать матрицу чувствительности.

$$y_1 = R_1 + R_2, \quad y_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad y_3 = \frac{(R_1 + R_2)R_1}{R_2}$$

$$R_1=2 \text{ кОм} \pm 10\%, \quad R_2=3 \text{ кОм} \pm 10\%.$$

Задача 4.33Выяснить, обеспечивается ли условие работоспособности объекта по параметру y .

$$Y=100-2x_1+2x_1x_2-3x_1x_2+x_2;$$

где $x_1=10 \text{ усл.ед.} \pm 10\%$, $x_2=5 \text{ усл.ед.} \pm 10\%$.Условие работоспособности: $35 \leq y \leq 50$ при $x_1 < 10$, $30 \leq y \leq 60$ при $x_1 \geq 10$ **Задача 4.34**

Математическая модель объекта проектирования имеет вид:

$$f = \frac{0,23}{C_1 \cdot R_1 \cdot \lg\left(1 + \frac{2R_3}{R_2}\right)} \text{ [кГц]};$$

где $C_1=0,01 \text{ мкФ} \pm 20\%$; $R_1=100 \text{ Ом} \pm 5\%$; $R_3=10 \text{ кОм} \pm 10\%$; $R_2=2 \text{ кОм} \pm 5\%$

Требуется подготовить исходные данные для моделирования объекта по методу Монте-Карло.

Задача 4.35

Методом приращений получить относительные коэффициенты чувствительности и записать матрицу чувствительности для случая:

$$y_1 = C_1 + C_2 + C_3; \quad \frac{1}{y_2} = \frac{1}{C_1} + \frac{2}{C_2} + \frac{3}{C_3}.$$

$$C_1=10 \text{ пФ} \pm 10\%; \quad C_2=20 \text{ пФ} \pm 20\%; \quad C_3=30 \text{ пФ} \pm 20\%.$$

Задача 4.36

Математическая модель объекта имеет вид

$$y=10+5x_1-10x_2-x_1x_2.$$

Требование к точности выходного параметра таково:

$$36 \leq y \leq 44. \quad x_{1 \text{ ном}}=10 \text{ В}; \quad x_{2 \text{ ном}}=1 \text{ В}.$$

Требуется решить задачу синтеза допусков и доказать, что выбранное решение является оптимальным (лучшим).

Задача 4.37

Имеем цепь:



$$C_1=C_2=C_3=1 \text{ мкФ} \begin{matrix} +30\% \\ -10\% \end{matrix}$$

Требуется рассчитать какой разброс будет иметь результирующая емкость цепи? Укажите также среднее значение результирующей емкости.

Задача 4.38

Имеем цепь:

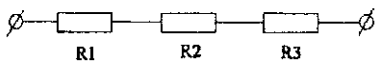


$$C_1 = C_2 = C_3 = 10 \text{ мкФ} \pm 20\%$$

Требуется указать номинальное значение результирующей емкости и ее разброс (отклонение от номинального уровня) при гарантированной вероятности $P_r = 0,9973$.

Задача 4.39

Имеем цепь:

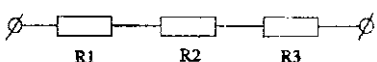


$$R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ кОм} \pm 10\%$$

Требуется указать номинальное значение результирующего сопротивления и разброс сопротивления относительно номинального значения при гарантированной вероятности $P_r = 0,9973$.

Задача 4.40

Имеем цепь:

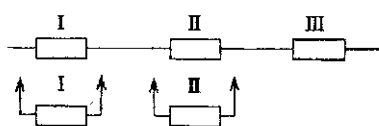


$$R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ Ом} \pm 5\%$$

Требуется указать номинальное значение сопротивления цепи и рассчитать вероятностным методом какой разброс будет иметь результирующее сопротивление цепи?

Задача 4.41

Определить оптимальное число резервных элементов вида I и вида II



Показ.	P_i	$m_i, \$$
Эл. I	0,7	5
Эл. II	0,8	40
Эл. III	0,995	30

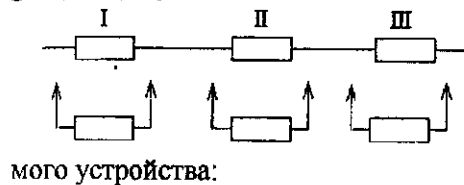
II из условия обеспечения минимальной

стоимости устройства, но при этом вероятность безотказной работы устройства должна быть не менее $P = 0,950$. Информация об элементах представлены в таблице.

Режим работы резервных элементов - нагруженный.

Задача 4.42

Методом динамического программирования найти количество резервных элементов (функциональных частей) каждого типа, обеспечивающих заданный уровень надежности (вероятность отказа устройства $g \leq 0,001$) при минимальной массе всего устройства. Схема резервированного устройства:



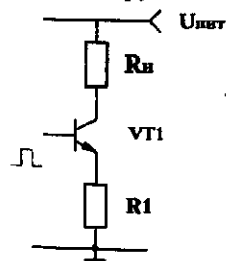
Эл.	$P_i(t)$	$m_i, \text{ усл. ед.}$
I	0,99	1
II	0,98	2
III	0,999	3

мого устройства:

Вероятность безотказной работы и массы элементов (функциональных частей) приведены в таблице.

Задача 4.43

Выполнить расчет показателей надежности электронного ключа с учетом электрического режима и условий работы в составе технологического оборудования. Максимальный ток нагрузки 1А.



$$U_{пит} = +30 \text{ В} \pm 10\%$$

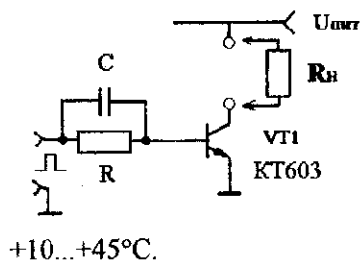
$$V_1 - 2Т603$$

$$R_1 - 3,3 \text{ Ом}$$

При необходимости у преподавателя получить нужную справочную информацию.

Задача 4.44

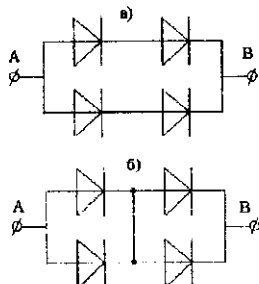
Рассчитать показатели безотказности транзисторного ключа.



$U_{пит} = 20 \text{ В} \pm 10\%$
 $R_n = 40 \text{ Ом}$
 $I_{вх} = 100 \text{ мА}$
 $R = 10 \text{ Ом} \pm 10\%$ (ОМЛТ-0,25)
 $C = 1 \text{ мкФ} \pm 10\%$ (МБМ, 160 В)
 Диапазон рабочих температур

+10...+45°C.

Задача 4.45



Между точками электрической схемы А и Б необходимо обеспечить наличие полупроводящих свойств. Использовано постоянное резервирование со смешанным способом включения резервных элементов. Необходимо определить какая и схем лучше с точки зрения надежности. Тип диодов КД205А. $T_3 = 10000$ часов. Отказы типа "к.з." и типа "обрыв" возникают одинаково часто.

5. РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЭС

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

Задача 5.1

Рассчитать геометрические размеры однородной RC-структуры, выполняющей функцию фазосдвигающей цепи, при следующих исходных данных: фазовый сдвиг на частоте $f = 500$ кГц $\varphi = -180^\circ$; RC-структура нагружена на сопротивление нагрузки $R_n = 100 \text{ кОм}$.

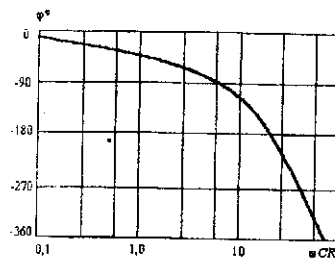


Рис. Обобщенная фазо-частотная характеристика

Решение

По обобщенной фазо-частотной характеристике определяем произведение ωCR :

$$\omega CR = 19,8.$$

Отсюда

$$CR = 19,8 / 2\pi f = 0,63 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Для уменьшения влияния нагрузки на фазовую характеристику фазосдвигающей цепи выбираем $R = 10 \text{ кОм} < R_n = 100 \text{ кОм}$.

Определяем емкость RC-структуры:

$$C = \frac{0,63 \cdot 10^{-5}}{R} = 630 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

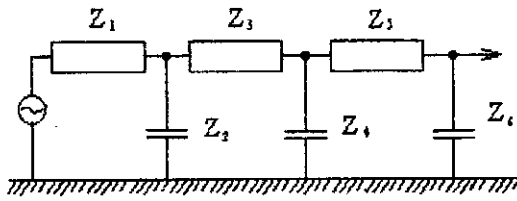
Выбираем материалы RC-структуры, характеризуемые удельным поверхностным сопротивлением резистивного слоя $\rho_s = 1000 \text{ Ом/}\square$ и удельной емкостью $C_0 = 10000 \text{ пФ/см}^2$, и определяем длину и ширину RC-структуры:

$$l = \sqrt{RC / \rho_s C_0} = 0,8 \text{ см, } b = \rho_s l / b = 0,08 \text{ см.}$$

Задача 5.2

Определить эффективность трехъячеичного фильтра, начинающегося с конденсатора, на частоте $f = 1$ МГц при выходном сопротивлении источника наводки $R_{ист} = 100 \text{ Ом}$. В качестве последовательных сопротивлений применены резисторы $R = Z_3 = Z_5 = 50 \text{ Ом}$. Конденсаторы взяты проходные, марки КБП-Р, емкостью $C = 0,047 \text{ мкФ}$.

Решение



Эффективность *n*-ячеечного фильтра определяется по формуле

$$\Theta = \frac{U}{U_n} = \frac{Z_1 Z_3 Z_5 \dots}{Z_2 Z_4 Z_6 \dots}$$

Емкостное сопротивление

рассчитывается по формуле

$$Z = \frac{1}{\omega C}$$

Тогда

$$\Theta = \frac{Z_1 Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4 Z_6} = R_{\text{нет}} \omega C \cdot R \omega C \cdot R \omega C = R_{\text{нет}} R^2 \omega^3 C^3 = 100(2\pi)^3 10^{18} \cdot 0,047^3 \cdot 10^{-18} \cdot 50^2 = 6600.$$

Эффективность экрана в неперах определяется по формуле

$$B = \ln \Theta = 0,115 A \text{ [Нп]}.$$

Тогда

$$B = \ln 6600 \approx 8,8 \text{ Нп}.$$

Эффективность экрана в дБ определяется по формуле

$$A = 20 \lg \Theta = 8,7 B \text{ [дБ]}.$$

Тогда

$$A = 20 \lg 6600 \approx 76,4 \text{ дБ}.$$

Задача 5.3

Рассчитать на частоте 10 МГц МПД с волновым сопротивлением $\rho=50$ Ом с медными проводниками на подложке из поликора толщиной $h=1,0$ мм, $W=0,94$ мм, $W/h=0,94$, толщина скин-слоя $\delta_c=0,7$ мкм, проводимость $\sigma=6 \cdot 10^7$ (Ом·м⁻¹).

Решение

Рассчитаем поверхностное сопротивление

$$R_s = 1/\sigma \delta_c = 0,024 \text{ Ом}.$$

Определяем необходимую толщину проводника

$$t = 3\delta_c = 2,1 \text{ мкм}.$$

Из рисунка по значению $t/h=0,0021$ и отношению $W/h=0,94$ определяем значение $\alpha_n \rho h / R_s = 5,2$.

Рассчитываем потери

$$\alpha_n = 5,2 R_s / \rho h = 0,025 \text{ дБ/см}.$$



Рис. Зависимость потерь α_n от W/h для различных t/h

Задача 5.4

Определить минимальную толщину монолитного пластмассового корпуса, обеспечивающего безотказную работу ИМС в течение 30 суток при $p_{кр}=0,9 p_0$. Материал корпуса - пресспорошок ЭФП-63 (коэффициент диффузии молекул влаги в герметизирующей оболочке $D=6,1 \cdot 10^{-13}$ м²/с).

Решение

Время, в течении которого на поверхности ИМС достигается критическая концентрация влаги, определяют из выражения

$$\tau = -\frac{4d^2}{\pi^2 D} \ln \left[\frac{\pi^2}{8} \left(1 - \frac{p_{кр}}{p_0} \right) \right].$$

Отсюда несложно выразить толщину герметизирующего материала d . После подстановки получим

$$d = \sqrt{\frac{3,14^2 \cdot 30 \cdot 2,4 \cdot 3600 \cdot 6,1 \cdot 10^{-13}}{4 \ln [3,14^2 / 8(1-0,9)]}} = 1,36 \text{ мм}.$$

Герметизирующая оболочка такой толщины обеспечивает требуемую влагозащиту при отсутствии в ней дефектов.

Задача 5.5

Рассчитать размеры толсто пленочного плавко подгоняемого резистора при следующих исходных данных: $R_{ном}=1000$ Ом, $\delta(\Delta R/R)=\delta=\pm 2\%$, $P=40$ мВт, $M(\rho_{\square})=500$ Ом/□, $\delta(\Delta \rho_{\square}/\rho_{\square})=\pm 20\%$, $P_0=20$ мВт/мм², $K_H=1$.

Решение

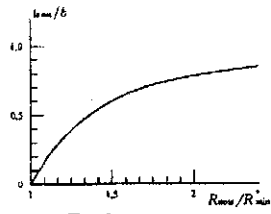


Рис. График для расчета глубины разреза в плавном подгоняемом пленочном резисторе

Определим границы поля рассеивания R_{max}^* , $R_{мин}^*$, учитывая, что $\delta(\Delta R^*/R^*) = \delta^* = \delta(\Delta \rho_{\square}/\rho_{\square})$:

$$R_{max}^* = R_{ном} = R_{ном}(1 + \delta) = 1000(1 + 0,02) = 1020 \text{ Ом}$$

$$R_{мин}^* = R_{ном} \frac{1 - \delta^*}{1 + \delta^*} = 1020 \frac{1 - 0,2}{1 + 0,2} = 680 \text{ Ом}$$

Определим отношение $R_{ном}/R_{мин}^* = 1000/680 = 1,47$ и по графику найдем $t_{pmax}/b = 0,58$.

Оценим величину b_{pmin} исходя из отсутствия локального перегрева:

$$b_{pmin} \geq \left(\frac{P \rho_{мин}}{P_0 K_H R_{ном}} \right)^{0,5} = \left(\frac{40 \cdot 400}{20 \cdot 1 \cdot 1000} \right)^{0,5} \approx 0,9 \text{ мм}$$

Определим ширину резистора b

$$b = \frac{b_{pmin}}{1 - t_{pmax}/b} = \frac{0,9}{1 - 0,58} \approx 2,1 \text{ мм} > b_{мин} = 0,8 \text{ мм}$$

Определим длину резистора из соотношения:

$$l = \frac{R_{max}^* b}{\rho_{max}} = \frac{1020 \cdot 2,1}{600} \approx 3,6 \text{ мм}$$

Задача 5.6

Рассчитать ступенчато подгоняемый тонкопленочный резистор с исходными данными: $R_{ном} = 1000 \text{ Ом}$, $\delta(\Delta R/R) = \delta = \pm 2\%$, $P = 40 \text{ мВт}$, $M(\rho_{\square}) = 500 \text{ Ом}/\square$, $\delta(\Delta \rho_{\square}/\rho_{\square}) = \pm 20\%$, $P_0 = 20 \text{ мВт}/\text{мм}^2$, $K_H = 1$. Контуры резистора формируются методом фотолитографии ($l_{мин} = 0,1$).

Решение

Определим границы поля рассеивания R_{max}^* , $R_{мин}^*$, учитывая, что $\delta(\Delta R^*/R^*) = \delta^* = \delta(\Delta \rho_{\square}/\rho_{\square})$:

$$R_{max}^* = R_{ном} = R_{ном}(1 + \delta) = 1000(1 + 0,02) = 1020 \text{ Ом}$$

$$R_{мин}^* = R_{ном} \frac{1 - \delta^*}{1 + \delta^*} = 1020 \frac{1 - 0,2}{1 + 0,2} = 680 \text{ Ом}$$

Определим ширину резистора b исходя из допустимой мощности рассеивания:

$$b \geq \left(\frac{P \rho_{max}}{P_0 K_H R_{max}^*} \right)^{0,5} = \left(\frac{40 \cdot 600}{20 \cdot 1 \cdot 1020} \right)^{0,5} \approx 1,1 \text{ мм}$$

Определим длину основной части резистора:

$$l_0 = \frac{R_{max}^* b}{\rho_{max}} = \frac{1020 \cdot 1,1}{600} \approx 1,85 \text{ мм}$$

Определим количество однотипных секций для подгонки и длину секций.

$$n_c = \frac{R_{мин}^* - R_{мин} \rho_{max}}{R_{max}^* - R_{мин} \rho_{мин}} = \frac{980 - 680 \cdot 600}{1020 - 980 \cdot 400} \approx 12,$$

$$l_c = \frac{(R_{max}^* - R_{мин}^*) b}{\rho_{max}} = \frac{(1020 - 980) \cdot 1,1}{600} \approx 0,075 \text{ мм}$$

Так как $l_c < l_{мин} = 0,1$, то примем $l_c = 0,1 \text{ мм}$ и определим ширину секций

$$b_c = \rho_{max} l_{мин} / (R_{max}^* - R_{мин}^*) = 600 \cdot 0,1 / (1020 - 980) = 1,5 \text{ мм}$$

Определим количество секций с переменной длиной и длину самой короткой секции. Выше было показано, что при сопротивлении секции $R_{c1max} = R_{max}^* - R_{мин}^*$, необходимо принять $l_{c1} = l_c = 0,1 \text{ мм}$ и $b_c = 1,5 \text{ мм}$.

Из соотношения

$$n_c \geq 3,31 \lg \left(\frac{R_{мин}^* - R_{мин} \rho_{max}}{R_{max}^* - R_{мин} \rho_{мин}} + 1 \right) = 3,31 \lg \left(\frac{980 - 680 \cdot 600}{1020 - 980 \cdot 400} + 1 \right) \approx 3,6$$

следует $n_c = 4$.

Длины подстроечных секций равны: $l_{c1} = l_{мин} = 0,1 \text{ мм}$; $l_{c2} = 2l_{c1} = 0,2 \text{ мм}$; $l_{c3} = 4l_{c1} = 0,4 \text{ мм}$; $l_{c4} = 6l_{c1} = 0,6 \text{ мм}$.

Задача 5.7

Определить время задержки создаваемое диффузионной RC-линией с параметрами $\rho_{\square} \approx 20 \dots 50 \text{ Ом}/\square$, $C_0 = 160 \text{ пФ}/\text{мм}^2$, $l = 5 \text{ мм}$.

Решение

для диффузионной RC-линии длиной l время задержки определяется по формуле

$$t_{зд} \approx 0,4\tau = 0,4R_l C_l = \rho C_0 l^2.$$

Подставляя исходные данные получаем

$$t_{зд} \approx 0,4 \cdot (20 \dots 50) \cdot 160 \cdot 10^{-12} \cdot 25 = (32 \dots 80) \cdot 10^{-9} \text{ сек.}$$

Задача 5.8

Металлостеклянный корпус 401.14-2 приклеивают к теплоотводу: $R_{ТК} \approx 60^\circ \text{C/Вт}$ при $\alpha_\tau = 8 \cdot 10^2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$; кристалл размером $1,5 \times 1,5 \times 0,2$ мм припаивают к основанию корпуса ($h_{кл} = 0$); $T_{доп} = +150^\circ\text{C}$, $T_{сmax} = +125^\circ\text{C}$, $\lambda_{кр} = 130 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$. Определить допустимую рассеиваемую кристаллом мощность $P_{доп}$.

Решение

Допустимая рассеиваемая кристаллом мощность определяется по формуле

$$P_{доп} \leq \frac{T_{доп} - T_{сmax}}{R_{ТК} + (h_{кр}/\lambda_{кр} + h_{кл}/\lambda_{кл})/S_{кр}}$$

Подставив значения получим

$$P_{доп} \leq \frac{150 - 125}{60 + 0,2 \cdot 10^{-3} / (130 \cdot 1,5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6})} = 0,415 \text{ Вт.}$$

Задача 5.9

Выполнить расчет односторонней печатной платы усилителя. Определить минимально допустимые значения толщины и ширины печатных проводников, исходя из электрического режима работы усилителя.

Исходные данные: напряжение питания $U = 12,6 \text{ В}$; максимальный ток, проходящий через проводник $I_{max} = 0,4 \text{ А}$; размер платы 110×70 мм; материал платы — стеклотекстолит фольгированный марки СФ-1-50; $J_{доп} = 30 \text{ А/мм}^2$; метод изготовления платы фотохимический; фоторезист сухой пленочный.

Решение

Так как метод изготовления печатной платы фотохимический, то, следовательно, минимально допустимая толщина печатных проводников будет равна толщине фольги, т.е.

$$h_n = h_\phi = 0,050 \text{ мм.}$$

Минимально допустимую ширину печатного проводника определяем по формуле

$$b_n \geq \frac{I_{max}}{h_n \cdot J_{доп}},$$

где $J_{доп}$ - допустимое значение плотности тока. Тогда

$$b_n = \frac{0,4}{0,05 \cdot 30} = 0,26 \text{ мм,}$$

т.е. плотность печатного монтажа платы может быть не выше 2-го класса.

Задача 5.10

Определить количество проводников, которые можно разместить на односторонней печатной плате между двумя отверстиями.

Исходные данные: метод изготовления платы — фотохимический; расстояние между отверстиями $l_{min} = 7,5$ мм; максимальный диаметр контактной площадки $D_{max} = 2$ мм; шаг координатной сетки $2,5$ мм; плотность печатного монтажа — 1-ый класс; материал платы — гетинакс фольгированный марки ГФ-1-35.

Необходимые табличные данные:

- погрешность расположения базовых отверстий на заготовке $\delta_1 = 0,02$ мм;
- погрешность расположения относительно координатной сетки на фотошаблоне проводника $\delta_2 = 0,03$ мм;
- погрешность расположения печатных элементов при экспонировании на слое $\delta_3 = 0,02$ мм;
- погрешность расположения базовых отверстий в фотошаблоне $\delta_4 = 0,03$ мм;
- погрешность расположения проводника на фотошаблоне относительно координатной сетки $\delta_5 = 0,004$ мм;
- для первого класса плотности печатного монтажа $S_{min} = 0,500$ мм;
- минимальная эффективная ширина проводника $t_{n min} = 0,500$ мм;
- толщина предварительно осажденной меди $h_{nm} = 0,005$ мм;

- толщина металлизированного резиста $h_p=0,02$ мм.

Решение

Число проводников, которое можно проложить между двумя контактными площадками может быть определено по формуле:

$$n = \frac{l_{\min} - D_{\max} - 2 \cdot \delta_{\text{кл}} - S_{\min}}{t_{n_{\max}} + 2 \cdot \delta_{\text{шт}} + S_{\min}}; \text{ где}$$

$$\delta_{\text{кл}} = \delta_{\text{ш}} + \delta_3 + \frac{\delta_n + \delta_3}{2}; \quad t_{n_{\max}} = t_{n_{\min}} + 1,5 \cdot h_{\text{пм}} + h_p;$$

Определяем:

$$t_{n_{\max}} = 0,5 + 1,5 \cdot 0,005 + 0,02 = 0,5275 \text{ мм};$$

$$\delta_{\text{кл}} = 0,03 + 0,02 + \frac{0,03 + 0,02}{2} = 0,075 \text{ мм};$$

$$n = \frac{7,5 - 2 - 2 \cdot 0,075 - 0,5}{0,5275 + 2 \cdot 0,004 + 0,5} = 4,68 \approx 5$$

Задача 5.11

Определить минимально допустимую ширину печатного проводника, падение напряжения, мощность потерь двух параллельных печатных проводников.

Исходные данные: напряжение питания $U=12,6$ В; максимальный ток, проходящий через проводник $I_{\text{max}}=0,7$ А; размер платы 45×75 мм; материал платы — СФ-2-35; метод изготовления — комбинированный позитивный; способ получения рисунка — фотохимический; фоторезист сухой пленочный; резистивное покрытие — олово-свинец; $h_{\text{пм}}=0,0065$ мм; $h_{\text{ф}}=0,035$ мм; $h_{\text{г}}=0,055$ мм; $l=0,03$ м; $\rho=0,020$ Ом·мм²/м; $j_{\text{доп}}=30$ А/мм²; $\text{tg}\delta=0,002$; $C=9 \cdot 10^{-3} EF/h$ — емкость печатной платы в пФ ($E=6,0$; $F=2200$ мм²; $h=1,5$ мм; $f=1$ МГц); для 2-го класса III по ГОСТ 23751-86 $b_{\text{зад}}=0,2$ мм; (при расчете мощности потерь f [МГц], C [пФ], U [В]).

Решение

Минимально допустимую толщину печатного проводника определим по формуле

$$t_n = h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}} + h_{\text{г}} = 0,035 + 0,0065 + 0,055 = 0,0965 \text{ мм.}$$

где $h_{\text{ф}}$ - толщина фольги,

$h_{\text{пм}}$ - толщина предварительно осажденной меди,

$h_{\text{г}}$ - толщина наращенной гальванической меди.

Минимально допустимую ширину печатного проводника можно определить по формуле

$$b = \frac{I_{\text{max}}}{t_n \cdot j_{\text{доп}}} = \frac{0,7}{0,0965 \cdot 30} \approx 0,24 \text{ мм.}$$

где $j_{\text{доп}}$ - допустимая плотность тока.

$$b > b_{\text{зад}} = 0,24 > 0,2,$$

т.е. данное значение b приемлемо для данного класса платы.

Падение напряжения определяется как

$$\Delta U = I_{\text{max}} \frac{\rho \cdot l}{b \cdot t_n} = 0,7 \frac{0,02 \cdot 0,03}{0,24 \cdot 0,0965} = 0,018 \text{ В.}$$

Мощность потерь можно определить по формуле

$$P_n = 2\pi f C U^2 \text{tg}\delta,$$

где f - частота питающего напряжения схемы.

По условию

$$C = 9 \cdot 10^{-3} EF/h = 9 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 2200/1,5 = 79,2 \text{ пФ.}$$

Тогда

$$P_n = 2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 79,2 \cdot 10^{-6} \cdot 12,6^2 \cdot 0,002 = 157,9 \cdot 10^{-6} \text{ Вт.}$$

Задача 5.12

Определить требуемую массу блоков РЭС самолетного комплекса, если условно принять, что распределение ресурса массы комплекса $m_k=200$ кг, площадь раскрытия антенны $S_A=0,35$ м² удельный коэффициент $k_m=100$ кг/м², мощность излучения $P=300$ Вт, КПД $\eta=0,2$, удельный коэффициент $k_{\text{мнер}}=0,1$ кг/Вт.

Решение

Для решения задачи воспользуемся формулой:

$$\sum_{i=1}^k m_{\text{он}} = m_k - k_m \cdot S_a - k_{\text{мнер}} \cdot \frac{P}{\eta} = 200 - 100 \cdot 0,35 - 0,1 \cdot \frac{300}{0,2} = 15 \text{ кг}$$

Задача 5.13

Определить время влагозащиты ИМС в металлополимерном корпусе при $T=293\text{ К}$, $V=2\cdot 10^{-7}\text{ м}^3$, $d=3\cdot 10^{-3}\text{ м}$, $S=5,3\cdot 10^{-6}\text{ м}^2$. Использован заливающий компаунд ЭК-16Б.

Задача 5.14

Определить форму, геометрические размеры, метод изготовления и минимальную площадь, занимаемую резисторами на подложке, при следующих исходных данных: номиналы резисторов $R_1=6\text{ кОм}$, $R_2=1\text{ кОм}$, $R_3=100\text{ кОм}$, допустимое отклонение сопротивления резисторов от номинала $\gamma_{R1}=5\%$, $\gamma_{R2,R3}=15\%$; мощности рассеяния $P_1=10\text{ мВт}$, $P_2=30\text{ мВт}$, $P_3=16\text{ мВт}$; диапазон температур $-20\div 100^\circ\text{ С}$; погрешность воспроизведения материала резистивной пленки $\gamma_{ps}=2,5\%$; погрешность старения резистивной пленки $\gamma_{rs}=0,3\%$.

Задача 5.15

Определить геометрические размеры и минимальную площадь двух конденсаторов на одной подложке, изготовленных в едином технологическом цикле, при следующих исходных данных: емкость конденсаторов $C_1=100\text{ пФ}$, $C_2=2500\text{ пФ}$; допустимое отклонение емкости от номинала $\gamma_c=15\%$; рабочее напряжение $U_{раб}=15\text{ В}$; диапазон температур $-60\div 125^\circ\text{ С}$; тангенс угла диэлектрических потерь на рабочей частоте $\text{tg}=0,03$; максимальная рабочая частота $f_{max}=400\text{ кГц}$; погрешность воспроизведения удельной емкости $\gamma_{co}=1\%$.

Задача 5.16

Определить размеры пленочного резистора при следующих исходных данных: $R_{ном}=4\text{ кОм}$, $\delta(\Delta R/R)_{доп}=\pm 10\%$, $P=20\cdot 10^{-3}\text{ Вт}$, $K_R=1$, $T_{max}=+125^\circ\text{ С}$, $T_{min}=-60^\circ\text{ С}$, $\delta(\Delta b)=\delta(\Delta l)=\pm 0,01\text{ мм}$, $b_{min}=0,1\text{ мм}$ (контуры пленок формируются методом фотолитографии), $t_{раб}=10000\text{ ч}$.

6. ТЕХНОЛОГИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

Задача 6.1

Рассчитать диаметр заготовки d_3 для накатывания метрической резьбы на шпильку.

1. $d_n=5,0$, $d_b=4,57$;
2. $d_n=4,0$, $d_b=3,57$;
3. $d_n=2,0$, $d_b=1,5$.

Решение

Диаметр заготовки d_3 для накатывания резьбы определяется по формуле

$$d_3 = \sqrt{0,5(d_{n1} + d_{b2})},$$

где d_n - наружный диаметр резьбы, мм,

d_b - внутренний диаметр резьбы, мм.

Таким образом

$$d_3 = \sqrt{0,5(5,02 + 4,572)} = 4,79\text{ мм},$$

$$d_3 = \sqrt{0,5(4,02 + 3,572)} = 3,79\text{ мм},$$

$$d_3 = \sqrt{0,5(2,02 + 1,52)} = 1,77\text{ мм}.$$

Задача 6.2

Рассчитайте R_z поверхности детали "направляющая" по данным задания

- $H_{S11maxT}=2\text{ мкм}$; $H_{S12maxT}=2,6\text{ мкм}$; $H_{S13maxT}=2,2\text{ мкм}$;
 $H_{S14maxT}=2,4\text{ мкм}$; $H_{S15maxT}=2,2\text{ мкм}$; $H_{S16maxT}=2,4\text{ мкм}$;
 $H_{S17maxT}=2,25\text{ мкм}$; $H_{S18maxT}=2,3\text{ мкм}$; $H_{S19maxT}=2,38\text{ мкм}$;
 $H_{S110maxT}=2,7\text{ мкм}$; $H_{S111maxT}=2,24\text{ мкм}$; $H_{S112maxT}=2,35\text{ мкм}$;
 $H_{S11minT}=2,2\text{ мкм}$; $H_{S12minT}=2,4\text{ мкм}$; $H_{S13minT}=2,45\text{ мкм}$;
 $H_{S14minT}=2,6\text{ мкм}$; $H_{S15minT}=2,35\text{ мкм}$; $H_{S16minT}=2,2\text{ мкм}$;
 $H_{S17minT}=2,35\text{ мкм}$; $H_{S18minT}=2,64\text{ мкм}$; $H_{S19minT}=2,62\text{ мкм}$;
 $H_{S110minT}=2,24\text{ мкм}$; $H_{S111minT}=2,4\text{ мкм}$; $H_{S112minT}=2,46\text{ мкм}$;

Решение

Высота неровности профиля по десяти точкам R_z определяется как среднее расстояние между пятью высшими точками выступов и пятью низшими точками впадин, отсчитанных от средней линии без учета знака

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |H_{Si, \max}| + \sum_{j=1}^5 |H_{Sj, \max}| \right)$$

Таким образом для решаемой задачи

$$R_z = \frac{1}{5} (|2.6 + 2.7 + 2.4 + 2.4 + 2.38| + |2.64 + 2.6 + 2.46 + 2.45 + 2.62|) = 5.05 \text{ мкм}$$

Задача 6.3

Выберите материал анодного защитного покрытия детали "кронштейн", изготовленной из материала сталь 45.

Электрохимический потенциал материала

Материал	Na	Al	Zn	Fe	Ni	Sn	Cu	Ag
Потенциал, В	-2.71	-1.3	-0.76	-0.44	-0.25	-0.13	+0.34	+0.8

Решение

Если основной металл в паре с металлом покрытия является анодом, т.е. имеет более высокий потенциал, то покрытие называется анодным. В окружающей среде в этом случае металл покрытия является более активным, т.к. имеет более отрицательный потенциал и разрушается раньше, чем металл детали.

Т.е. применительно к требованиям задачи в качестве материала покрытия детали могут быть выбраны Zn, Al или Na. Исходя из технологичности процесса, целесообразно в качестве покрытия выбрать Zn.

Задача 6.4

Определите количество ударов пуасона при проведении технологической операции холодной высадки головки детали при $l=4d$,

где l - длина деформируемой части заготовки;

d - диаметр заготовки.

- 1) 1 удар;
- 2) 2 удара;
- 3) 3 удара.

Решение

Высадка головки детали обеспечивается при

$l \leq (2.5 \dots 2.8)d$ - за 1 удар пуасона холодновысадочного автомата,

$l \leq (3.5 \dots 5.5)d$ - за 2 удара,

$l > (6 \dots 8)d$ - за 3 удара.

Таким образом по условию задачи формовка должна выполняться за 2 удара.

Задача 6.5

Определить минимальный диаметр пробивного отверстия $d_{S \min T}$ при штамповке стальной заготовки толщиной $S=2$ мм.

- а) $d_{S \min T} \geq S$;
- б) $d_{S \min T} \geq 0.5S$;
- в) $d_{S \min T} \geq 0.75S$;
- г) $d_{S \min T} \geq 1.25S$.

Решение

Исходя из условия $d_{\min} \geq S$ для стальной заготовки применительно к условию задачи d_{\min} должно быть больше или равно 2 мм.

Задача 6.6

Привести эскиз инструмента для выполнения отверстий в печатных и многослойных платах, выбрать материал, указать на эскизе следующие требования:

- 1) угол заточки;
- 2) обратная конусность;
- 3) угол спинки зуба;
- 4) угол крутизны спирали;
- 5) радиальное биение рабочей части относительно хвостовика;
- 6) несимметричность режущих кромок относительно оси сверла;
- 7) шероховатость поверхности спиральных канавок;
- 8) стойкость инструмента.

Решение

Материал - ВК6М.

- | | | |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------|
| 1) $125 \pm 5^0 \text{C}$; | 2) $28 \pm 5^0 \text{C}$; | 4) 0.01 мм; |
| 5) 0.02 мм; | 6) 0.08-0.16 по R_a ; | 8) до 5000 отв. |

Задача 6.7

Рассчитать диаметр и выбрать материал сверла для получения отверстий в печатных платах, при условиях:

1. Диаметр отверстия 0,8 мм;
2. Допуск на диаметр 0,05 мм;
3. Усадка материала после сверления 5%;
4. Материал платы - СФ-2-50, толщиной 3,0 мм.

Предложить мероприятия по улучшению качества сверления и повышению стойкости инструмента.

Решение

$$D_c = D_{отв} + 0.7 \cdot (\delta_1 + \delta_2) = 0.8 + 0.7 \cdot (0.05 + 0.15) = 0.94 \approx 1 \text{ мм.}$$

$\delta_2 = 5\%$ от толщины платы.

В качестве материала сверла выбираем сплав ВК6М.

Мероприятия: охлаждение сверла, гидроабразивная обработка отверстий после сверления, двойное сверление (0.5 мм и 1 мм).

Задача 6.8

Определить усилие вырубки печатной платы по контуру при следующих данных:

1. Размер платы 100×60 мм;
 2. Материал - стеклотекстолит СФ-1-50, толщиной 1.5 мм;
 3. Сопротивление срезу текстолита $\sigma_{ср} = 9 \cdot 10^7$ Па.
- Выбрать технологическое оборудование для данной операции.

Решение

$$P = k \cdot L \cdot \delta \cdot \sigma_{ср} = 1.1 \cdot (100 + 60) \cdot 2 \cdot 1.5 \cdot 10^{-6} \cdot 9 \cdot 10^6 = 47.5 \text{ кН}$$

Выбираем пресс однокривошипный К120 с усилием 120 кН.

Задача 6.9

В партии микромодульных УНЧ измерены коэффициент усиления после операций пайки и заливки и рассчитаны среднеквадратические погрешности коэффициента усиления. Определите коэффициент корреляции между операциями и коэффициенты в уравнении регрессии при следующих данных:

Статистич. Показатели	Пайка	Заливка
1. Коэф. усиления	100	80
2. Средн. квадр. откл.	10	8
3. Начальный момент связи	8064	
4. Количество элементов	50	50

Решение

Смешанный момент связи

$$\mu_{11} = \nu_{11} - \Pi_{вх} \cdot \Pi_{вых} = 8064 - 100 \cdot 80 = 64$$

Коэффициент корреляции

$$r = \frac{\mu_{11}}{\sigma_{вх} \cdot \sigma_{вых}} = \frac{64}{10 \cdot 8} = 0.8$$

$$b_1 = r \frac{\sigma_{вх}}{\sigma_{вых}} = 0.8 \cdot 1.25 = 1;$$

$$b_2 = r \frac{\sigma_{вых}}{\sigma_{вх}} = 0.8 \cdot 0.8 = 0.64.$$

Задача 6.10

Рассчитать максимальную энергию разряда при контактной конденсаторной сварке деталей на установках: ИО.026 и ТКМ-8.

Суммарная емкость зарядного контура, мкФ: 340 800

Напряжение заряда, В: 250 1000

Решение

$$W_1 = \sum \frac{C_1 \cdot U_1^2}{2} = \frac{340 \cdot 10^{-6} \cdot 62500}{2} = 10.625 \text{ Дж.}$$

$$W_2 = \sum \frac{C_2 \cdot U_2^2}{2} = \frac{800 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6}{2} = 400 \text{ Дж.}$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 6.11

Вычислите напряженность электрического поля в направлении тока, если через образец *n*-типа течет электронный ток плотностью 100 А/м^2 , дырочным током можно пренебречь. Концентрация доноров 10^{23} см^{-3} , подвижность электронов в кремнии $14 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Задача 6.12

Вычислить, какую разность потенциалов нужно приложить к торцам образца *p*-типа, расположенным на расстоянии $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ один от другого, чтобы получить Холловское напряжение 10^{-2} В . Магнитное поле принять равным 44 мкГ . Подвижность дырок в германии равна $0,18 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, концентрация дырок 10^{22} м^{-3} . Нарисовать схему расположения образца и направление полей.

Задача 6.13

Время жизни носителей при излучательной межзонной рекомбинации в германии при комнатной температуре равно $8 \cdot 10^{-2} \text{ с}$. Концентрация носителей при этом составляла $n = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Определить коэффициент излучательной рекомбинации. Уровень инжекции при измерении считать малым.

Задача 6.14

Вычислить скорость дрейфа электронов в меди при напряженности электрического поля $E = 10^3 \text{ В/м}$, $\mu_n = 0,12 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Задача 6.15

Значение времени жизни электронов в образце $2 \cdot 10^4 \text{ с}$. Вычислить диффузионную длину. Коэффициент диффузии принять равным единице.

Задача 6.16

Определить количество тепла, выделяемого при контакте двух полупроводников, если через него протекает ток силой 1 А в течение 1 часа . Величина коэффициента Пельтье $2 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/Кл}$.

Задача 6.17

Наиболее вероятная энергия электронов в разряде равна 1 эВ . Вычислите температуру электронов.

Задача 6.18

При какой толщине пленки никеля удельное электрическое сопротивление ее увеличится в $1,35$ раза по сравнению с удельным сопротивлением массивного никеля? Длину свободного пробега электрона взять равной 500 \AA .

Задача 6.19

Для каких сталей отжиг можно заменить более дешевой обработкой - нормализацией?

Задача 6.20

Детали кожухов и экраны закрытого типа изготавливают из листовой стали глубокой вытяжкой. Детали не подвержены нагрузке при работе. Какую сталь целесообразно использовать?

Задача 6.21

Радиаторные трубки мощной РЭА должны обладать хорошей теплопроводностью и коррозионной стойкостью. Какой материал можно выбрать для изготовления?

Задача 6.22

Определить мощность потерь на вихревые токи ферромагнетика объемом $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ на частоте 300 кГц при максимальной индукции в течение цикла $1,2 \text{ тл}$. Коэффициент пропорциональности $= 1$.

Задача 6.23

Каким методом можно выполнить микрогравировку и какова технологическая схема процесса?

Задача 6.24

Изделия изготовлены из стали 20, стали 45 и стали У10А. Назначить режимы термической (химико-термической) обработки, повышающие эксплуатационные свойства деталей.

Задача 6.25

При горячей объемной ковке детали из стали 20 появилась видманштетная структура. Какой технологической операцией можно устранить этот дефект и каковы режимы технологического процесса?

Задача 6.26

При отливке детали из стали 40 появились дендритная и зональная ликвации. Какой технологической операцией можно устранить эти недостатки, назначьте технологические режимы процесса.

Задача 6.27

Выбрать метод формирования упрочняющего покрытия из нитрида титана на инструментальной стали, необходимую оснастку и оборудование.

Задача 6.28

Определить минимально возможный диаметр отверстия, которое можно получить электронным лучом при токе $I=8 \cdot 10^{-3}$ А и напряжении $U=10^5$ В.

Задача 6.29

Определить, к какой группе относятся нижеперечисленные стали: сталь 08, У7, 12ХНЗА и указать на химический состав.

Задача 6.30

Определить, к какой группе относятся нижеперечисленные сплавы и указать их химический состав: Бр ОЦ4-3, Бр-2, В 96, АЛ5.

Задача 6.31

Деталь из вольфрама изготовлена электроискровым методом за 1,2 часа. Рассчитать время изготовления такой же детали из титана.

Задача 6.32

При обработке вольфрама электроэрозионным способом латунным электродом за 1 час было снято 50 г металла. Сколько металла будет снято за то же время при обработке жаропрочного сплава и каков будет износ электрода-инструмента?

Задача 6.33

Рассчитать диаметр и выбрать материал сверла для получения отверстий в печатных платах, изготовленных из стеклотекстолита. Диаметр отверстия 0,8 мм, допуск на него $\pm 0,05$ мм, усадка материала после сверления 5%. Предложить мероприятия по улучшению качества сверления и повышению стойкости инструмента.

Задача 6.34

Аналитическим методом рассчитать технологический допуск на переходное сопротивление контактной пары, активная составляющая которой определяется как

$$R_n = \frac{c\rho}{2} \left(\frac{Rh_m^{2d}}{1,88r^{4/3}} \right)^{\frac{1}{2d+1}} \left(\frac{E}{P_k} \right)^{\frac{6d+1}{6d+3}}$$

где c - коэффициент, зависящий от качества обработки материала контактов, выражается в условных единицах; ρ - удельное сопротивление материала контакта; R - радиус выступов микронеровностей, h_m - максимальная высота микровыступов; E - модуль упругости первого рода; P_k - контактное усиление; d - приведенный параметр шероховатости, равный сумме условных параметров для каждого материала контактной пары (для шлифованных поверхностей $d_1=d_2=3$); r - радиус кривизны полусферы

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}, \quad r_1 = r_2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

если известно, что

$$\delta\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right) = \pm 10\%, \quad \delta\left(\frac{\Delta h_m}{h_m}\right) = \pm 20\%,$$

$$\delta\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = \pm 20\%, \quad \sigma\left(\frac{\Delta E}{E}\right) = \pm 5\%,$$

$$\delta\left(\frac{\Delta P_k}{P_k}\right) = \pm 30\%, \quad \sigma\left(\frac{\Delta r_1}{r_1}\right) = \sigma\left(\frac{\Delta r_2}{r_2}\right) = \pm 2\%$$

Задача 6.35

Определить допуски на элементы проволочного резистора и выбрать метод достижения требуемой точности при следующих условиях: резистор наматывается на каркас диаметром $D=10 \cdot 10^{-2}$ м проводом диаметром $d=5 \cdot 10^{-5}$ м из константана с удельным сопротивлением $\rho=(0,45-0,52)$ Ом·мм²/м. Номинальная величина сопротивления резистора $R=1000$ Ом, а производственный допуск на нее $\delta\left(\frac{\Delta R}{R}\right)=5\%$. Величина сопротивления провода, наматываемая на цилиндрический каркас, определяется уравнением

$$R = \frac{4\rho\omega(D+d)}{d^2} \cdot 10^{-3} \text{ Ом},$$

где ω - число витков.

Задача 6.36

Рассчитать число параллельных рабочих мест на автоматизированной поточной линии для выполнения операции сборки переменных резисторов, если оперативное время 135 с, а плановая программа выпуска изделий 100000 штук в год при односменной работе линии.

Задача 6.37

Разработать типовой технологический процесс изготовления печатной платы с шириной печатных проводников 1 мм и шириной пробельных мест 1 мм в условиях массового производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гель П.П., Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. - Л.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: Учеб. для радиотехнич. спец. вузов. - М.: Высш. шк., 1990.
3. Конструирование радиоэлектронных средств: Учеб. пособие для студентво специальности «Конструирование и технология радиоэлектронных средств»/Н.С.Образцов, В.Ф.Алексеев, С.Ф.Ковалевич и др.; Под ред. Н.С.Образцова. - Мн.: БГУИР, 1994.
4. Кузмин А.Я. Конструирование и микроминиатюризация электронно-вычислительной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов. - М.: Радио и связь, 1985.
5. Конструирование и расчет больших гибридных интегральных схем, микросборок и аппаратуры на их основе: Учеб. пособие для вузов / Г.В. Алексеев и др. Под ред. Б.Ф. Высоцкого - М.: Радио и связь, 1981.
6. Медведев А.М. Надежность и контроль качества печатного монтажа. - М.: Радио и связь, 1986.
7. Колбун В.С. Проектирование печатного монтажа с помощью САПР PCAD. Учеб. пособие по курсу «Прикладное программное обеспечение САПР». Мн.: БГУИР, 1995.
8. Воробьева Ж.С., Образцов Н.С. и др. Конструкторская документация: обеспечение влагозащиты конструкций РЭС/Методическое пособие по курсу «Конструирование и производство радиоэлектронных средств» по специальности Т.08.01 для всех форм обучения. - Мн.: БГУИР, 1996.
9. Лычук П.П., Образцов Н.С., Алексеев В.Ф. и др. Компоненты и элементы радиоэлектронных средств: Учебное пособие для студентов специальности «Проектирование и производство радиоэлектронных средств». - Мн.: БГУИР, 1996.
10. Левин А.П., Сватикова Н.Э. Расчет вибропрочности конструирования РЭС. - М.: МИРЭС, 1983.
11. Проектирование приборных панелей радиоэлектронной аппаратуры. Методическое пособие по курсу «Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры» для спец. «Конструирование и производство радиоаппаратуры» / Ю.В. Шамгин и др. - Мн.: МРТИ, 1986.

12. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Сов. радио, 1976.

13. Варламов Р.Г. Компонировка радиоэлектронной аппаратуры - 2 изд. перераб. и дополн. - М.: Сов. радио, 1975.

14. Мевис А.Ф., Несвижский В.Б., Фефер А.И. Допуски и посадки деталей радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Под ред. О.А. Лупова - М.: Радио и связь, 1984.

15. Преснухин Л.Н., Шахнов В.А. Конструирование электронно-вычислительных машин и систем. - М.: Высш. школа, 1986.

16. Справочник конструктора РЭС: Компоненты, механизмы, надежность / Н.А. Барканов, Б.Е. Бердический, П.Д. Верхоятницкий и др. Под ред. Р.Г. Варламова. - М.: Радио и связь, 1985.

17. Полупроводниковые приборы: транзисторы. Справочник / В.А. Аронов, А.В. Баюков, А.А. Зайцев и др. Под общ. ред. Н.Н. Горбунова - 2 изд. перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1985.

18. Аксенов А.И., Нефедов А.В. Элементы схем бытовой радиоаппаратуры. Конденсаторы. Резисторы: Справочник. - М.: Радио и связь, 1995.

19. Справочная книга радиолюбителя-конструктора: В 2-х книгах. Кн.1. А.А. Бокуняев, Н.М.Борисов, Е.Б.Гумеля и др.; Под ред. Н.И.Чистякова. - 2-е изд., исправ. - М.: Радио и связь, 1993.

20. Справочная книга радиолюбителя-конструктора: В 2-х книгах. Кн.2/Р.Г.Варламов, В.Я.Замятин, Л.М.Капчинский и др.; Под ред. Н.И.Чистякова. - 2-е изд., исправ. и доп. - М.: Радио и связь, 1993.

21. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник / А.В. Баюков, А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев и др. Под общ. ред. Н.Н. Горюнова - 2 изд. перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1984.

22. Справочник по интегральным микросхемам / В.В. Тарабрин, С.В. Якубовский, Н.А. Барканов и др. Под ред. Б.В. Тарабрина - 2-е изд. перераб. и дополн. - М.: Энергия, 1980.

23. Конденсаторы: Справочник /И.И.Четвертков, М.Н. Дьяконов, В.И. Присяжков и др. Под ред. И.И. Четверткова, М.Н.Дьяконова. - М.: Радио и связь, 1993.

24. Резисторы (справочник) / Ю.Н. Андреев и др. Под ред. И.И. Четверткова. - М.: Энергоиздат, 1981.

25. Бачелис Д.С. и др. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / Под общ. ред. Н.И. Белоруссова. - М.: Энергия, 1971.

26. Разработка и оформление конструкторской документации РЭС: Справочник / Э.Т. Романычева, А.К. Иванова, А.С. Куликов, Н.Г. Миронина, А.В. Алимов. - М.: Радио и связь, 1989.

27. Справочник по электротехническим материалам. В 2 т. Т. 2 / Под ред. Ю.В. Карицкого и др. 3 изд. перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1987.

28. Улинич Р.Б. Практическое обеспечение надежности РЭС при проектировании. - М.: Радио и связь, 1985 (Б-ка инженера по надежности).

29. Аникеенко В.Ф. и др. Программирование на микроЭВМ: Пособие. - Мн.: Высш. школа, 1987.

30. ГОСТ 2.105-79. Общие требования к текстовым документам.

31. Справочник конструктора РЭС: Общие принципы конструирования / Под ред. Р.Г. Варламова. - М.: Сов. радио, 1980.

32. ГОСТ 2.310-68. ЕСКД. Нанесение на чертежах обозначений, покрытий, термической и других видов обработки.

34. ГОСТ 9.303-84. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору.

35. ГОСТ 9.104-78. Покрытия лакокрасочные. Группы условий эксплуатации.

36. ГОСТ 10317-79. Размеры печатных плат.

37. ГОСТ 16840-78. Лепестки печатные. Основные параметры конструкций.

40. ГОСТ 22174-76. Резисторы переменные непроволочные. Корпуса. Основные размеры.

41. ГОСТ 23751-86. Платы печатные. Основные параметры конструкции.

42. ГОСТ 23752-79. Платы печатные. Общие технические условия.

45. ОСТ 4ГО.010.027. Отверстия вентиляционные. Конструкция и размеры.

46. ОСТ 4ГО.010.030-81. Установка навесных элементов на печатные платы.

47. ОСТ 4ГО.010.036. Узлы и блоки на микросхемах. Методика обоснования и выбора типовых конструктивно-технологических решений.

48. ОСТ 4ГО.014.000. Покрытия металлические и неметаллические. Выбор и область применения.

49. ОСТ 4ГО.070.019. Скобы, ленты, хомуты для крепления кабелей, жгутов, проводов. Руководство по выбору.
51. ОСТ 4ГО.812.000. Детали крепления радиоэлементов на печатной плате. Технические условия.
1. ОСТ 11.029.001-47. Флюсы и припой.
54. ОСТ 11.110.775.009. Наконечники кабельные для неизолированных проводов.
55. Федоренко В.А., Шошин А.И. Справочник по машиностроительному черчению. - Л.: Машиностроение, 1972.
56. Соломахо В.Л., Томилин Р.А., Цитович В.В., Юдовин Л.Г. Справочник конструктора-приборостроителя. - Мн.: Высш. школа, 1988.
57. Шерстнев В.В. Конструирование и микроминиатюризация ЭВА. - М.: Радио и связь, 1984.
58. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов/ Е.М.Парфенов, Э.Н.Камышная, В.П.Усачев. - М.: Радио и связь, 1989.
59. Соскаров В.Е. и др. Системы стандартов в электросвязи и радиоэлектронике. - М.: Радио и связь, 1985.
60. Шило В.Л. Полупроводниковые цифровые микросхемы. Учебник. - М.: Металлургия, 1983.
61. Варламов Р.Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Сов. радио, 1975.
62. Павловский В.П. Проектирование технологических процессов РЭС. - Л.: Энергия, 1984.
63. Механические воздействия и защита радиоэлектронных средств: Учеб. пособие для вузов/ Н.И.Каленкович, Е.П.Фастовец, Ю.В.Шамгин. - Мн.: Выш.шк., 1989.
64. Буловский П.И. и др. Надежность приборов и систем управления. - Л.: Машиностроение, 1975.
65. Авиационная акустика / Под ред. А.Г. Мунина. - М.: Машиностроение, 1981.
66. Устройства электропитания бытовой РЭС. - М.: Радио и связь, 1991.
67. Прахов Б.В., Зенкин И.М.. Изобретательство и патентование. - Киев: Техника, 1981.
68. Пархаменко В.П. Основы изобретательской и рационализаторской работы. - Мн.: Высш. школа, 1984.
69. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: Учебник для вузов. 2 изд. перераб. и дополн. - М.: Высш. школа, 1986.
70. Технология деталей радиоэлектронной аппаратуры: Уч. пособие для вузов / С.Е. Ушакова, В.С. Сергеев, А.В. Ключников, В.П. Привалов / Под ред. С.Е. Ушаковой. - М.: Радио и связь, 1986.
71. Тявловский М.Д., Хмыль А.А., Станишевский В.К. Технология деталей и периферийных устройств ЭВА: Уч. пособие для вузов. - Мн.: Высш. школа, 1981.
72. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭС. - М.: Высш. школа, 1985.
73. Чистяков Ю.Д., Райнова Д.Г. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. - М.: Металлургия, 1977.
74. Рычина Т.А. Электрорадиоэлементы. - М.: Сов. радио, 1979.
75. Речецкий В.И. Акустоэлектронные радиокомпоненты. - М.: Сов. радио, 1980.
76. Иванов Р.Д. Магнитные металлические пленки в микроэлектронике. - М.: Сов. радио, 1980.
77. Каретникова В.И., Рычина Т.А., Ермаков А.И. Трансформаторы питания и дроссели фильтров для РЭС. - М.: Сов. радио, 1973.
78. Цветков В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. - М.: Наука и техника.
79. Системы автоматизированного проектирования в радиоэлектронике: Справочник / Е.В. Авдеев, А.Т. Еремин, И.П. Коренков, М.П. Песков / Под ред. И.П. Коренкова. - М.: Радио и связь, 1986.
80. Технология СБИС. - М.: Мир, 1987.
81. Достанко А.П. Технология интегральных схем. - Мн.: Высш. школа, 1987.
82. Черняев В.Н. Технология микросхем и микропроцессоров. - М.: Высш. школа, 1987.
83. Иванов Ю.В., Лакота Н.А. Гибкая автоматизация производства РЭС с применением микропроцессоров и роботов. - М.: Радио и связь, 1987.
84. Технологическая подготовка гибких автоматизированных сборно-монтажных производств в приборостроении / Н.П. Меткин, М.С. Лапин и др. - Л.: Машиностроение, 1986.
85. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. - М.: Радио и связь, 1991.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ	5
2. ЗАЩИТА ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	31
3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ	37
4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ РЭС	47
5. РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЭС	67
6. ТЕХНОЛОГИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ	77
ЛИТЕРАТУРА	87
ПРИЛОЖЕНИЯ	92

Авторы

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ
ОБРАЗЦОВ
ХМЫШ
БОРОНИ
ВАЛГУЕ
ЛАНИ
ШАТА
СОБЧ

СЕРИЙНЫЙ ЗАДАЧ ПО КОНСТРУКТИВНОМУ И ТЕПЛОВОМУ РАДИОЭЛЕКТРОННЫМ СРЕДСТВАМ

для студентов высших учебных заведений
и преподавателей техникумов

Компьютерная

Ответственный за выпуск
Редактор Н.В.Григорьев
Корректор Е.Н.Белкина

Подписано в печать

Белорусский государственный университет