

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра электронной техники и технологии

В.В. Баранов, Л.И. Гурский

**ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТЫ
И УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

ПРАКТИКУМ

для студентов специальностей
39 02 02 «Проектирование и производство РЭС»,
39 02 03 «Медицинская электроника»
всех форм обучения

Минск 2004

УДК 621.396.9 + 621.382 (075.8)

ББК 32.85 я 73

Б 24

Баранов В.В.

Б24 Электрорадиоэлементы и устройства функциональной электроники: Практикум для студ. спец. 39 02 02 «Проектирование и производство РЭС», 39 02 03 «Медицинская электроника» всех форм обуч. / В.В. Баранов, Л.И. Гурский. – Мн.: БГУИР, 2004. – 47 с.: ил.
ISBN 985-444-659-X

Данный практикум охватывает две темы в рамках основных разделов учебной дисциплины – резисторы и конденсаторы.

Предназначен для закрепления и углубления теоретических знаний, полученных на лекциях и в процессе самостоятельного изучения дисциплины, приобретения практических навыков расчета основных функциональных характеристик дискретных и интегральных электрорадиоэлементов.

Практикум может быть использован студентами специальности 39 02 03 «Медицинская электроника» в качестве учебного пособия по дисциплине “Элементная база средств медицинской электроники” на практических занятиях.

УДК 621.396.9 + 621.382 (075.8)

ББК 32.85 я 73

ISBN 985-444-659-X

© Баранов В.В., Гурский Л.И., 2004

© БГУИР, 2004

Тема 1

РЕЗИСТОРЫ: РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТОПОЛОГИИ КОРРЕКТИРУЕМЫХ РЕЗИСТОРОВ

1.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Задача расчета выбранной топологии корректируемых резисторов (КР) сводится к определению ее геометрических размеров на основании исходных электрических и технологических данных с учетом вида корректировки. Методы расчета зависят от конкретной формы КР и вида корректировки [1]. Но, несмотря на это, все они разработаны на основе единой методики, позволяющей установить взаимосвязи между электрическими, технологическими и топологическими параметрами КР и выразить их в виде уравнений. Рассмотрим основные положения этой методики.

Пленочные резисторы, изготовленные по существующим технологиям, могут иметь отклонения величины сопротивления от номинального как в большую, так и в меньшую сторону. Изменение величины сопротивления резистора в процессе его корректировки выборкой материала резистора происходит только в сторону увеличения сопротивления.

Если R - номинал резистора, γ_R - допустимая относительная погрешность сопротивления; $\gamma_{R\text{ТЕХН}}$ - технологическая погрешность изготовления; $\gamma_{R\text{РАСЧ}}$ - расчетное значение допустимой относительной погрешности сопротивления; R_T - номинальное значение исходного технологического сопротивления; D - диапазон корректировки, то получение заданного сопротивления резистора с помощью корректировки возможно, если выполняется условие

$$R_{T\max} \leq R_{\max},$$

где $R_{\max} = R(1 + \gamma_{R\text{РАСЧ}})$.

Величина номинального значения исходного технологического сопротивления R_T определяется выражением

$$R_T = R \frac{1 + \gamma_{R\text{РАСЧ}}}{1 + \gamma_{R\text{ТЕХН}}}. \quad (1)$$

В случае изготовления КР с элементом корректировки (ЭК) можно также записать

$$R_T = R_{\text{ОСН}} + R_{\text{ЭК}}^0,$$

где $R_{\text{ОСН}}$ - сопротивление основной части резистора; $R_{\text{ЭК}}^0$ - сопротивление ЭК до корректировки.

Диапазон корректировки, на величину которого должно изменяться сопротивление ЭК, определяется выражением

$$D = R_{\min} - R_{T \min} = \left(1 - \frac{\gamma_{R \text{ ПАСЧ}}}{\gamma_{R \text{ ТЕХН}}} \right) R \frac{2\gamma_{R \text{ ТЕХН}}}{1 + \gamma_{R \text{ ТЕХН}}}. \quad (2)$$

В ряде случаев при расчете топологии удобнее в качестве расчетного параметра использовать коэффициент формы резистора $k_{\phi} = R/\rho_{KB}$. Для корректируемого резистора с ЭК коэффициент формы равен сумме коэффициентов основной части и ЭК резистора

$$k_{\phi} = k_{\phi \text{ ОСН}} + k_{\phi \text{ ЭК}}.$$

Коэффициент формы исходного технологического сопротивления КР определяется выражением

$$k_{\phi T} = k_{\phi} \frac{1 + \gamma_{R \text{ ПАСЧ}}}{1 + \gamma_{R \text{ ТЕХН}}}. \quad (3)$$

В данной теме рассматриваются методы расчета топологий КР прямоугольной, трапециевидной и Т-образной форм, а также решетчатых КР и с распределенным шунтом. Проводится сравнение топологий КР по параметрам и даются рекомендации по их применению в зависимости от назначения резисторов и предъявляемых к ним требований.

1.2. РЕЗИСТОРЫ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Исходными данными для расчета являются конструктивные особенности КР, заключающиеся в расположении контактных элементов, наличии основной части резистора и ЭК; требуемые электрические параметры резистора — величина номинала R , допустимая расчетная относительная погрешность номинала $\gamma_{R \text{ ПАСЧ}}$, мощность рассеяния резистора P_a ; параметры, определяемые технологией, относительная технологическая погрешность сопротивления резистора $\gamma_{R \text{ ТЕХН}}$, удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки ρ_{KB} , удельная допустимая мощность рассеяния резистивного материала P_0 .

Цель расчета — определение геометрических параметров топологии резистора, т.е. размеров ЭК (ширины b_K и длины l_K) и основной части резистора $b_{\text{ОСН}}$ и $l_{\text{ОСН}}$.

1.2.1. Корректируемый по ширине резистор при сплошном виде выборки

Разработку методики расчета корректируемого по ширине резистора начнем с расчета размеров ЭК. Принимаем, что выборка материала ЭК производится условными ячейками со стороной a одна за другой вдоль линий тока (рис. 1.1). После выборки крайнего целого столбца удаляются последующие, пока не будет достигнут заданный номинал резистора. При этом в общем случае будет удалено k целых столбцов и i ячеек $k + 1$ столбца. В случае максимально допустимого отклонения действительного сопротивления резистора от номинального ЭК должен обеспечить корректировку в диапазоне D . При этом заданный номинал резистора будет достигнут при выборке максимального числа столбцов k_m . После выборки k_m столбцов ширина оставшейся части ЭК b_p должна обеспечить рассеяние заданной мощности P_a , т.е. должно выполняться условие $b_K - ak_m \geq b_p$. На основании рис. 1.1 и условия $a^2 \ll b_p l_K < b_K l_K$, при выполнении которого можно не учитывать эффект искривления линий тока, текущее сопротивление ЭК в процессе корректировки можно представить как сумму сопротивлений двух прямоугольников, один из которых имеет длину $l_K - ia$ и ширину $b_K - ak$, а другой — длину ia и ширину $b_K - (k + 1)a$, т.е.

$$R_{ЭК}(k, i) = \rho_{KB} \frac{l_K [b_K - (k + 1)a] + ia^2}{(b_K - ka)[b_K - (k + 1)a]},$$

где ρ_{KB} — сопротивление квадрата резистивной пленки.

Полагая в полученном выражении k постоянным и учитывая, что $R_{ЭК}$ от i зависит линейно, определим текущее относительное приращение сопротивления γ_{Ri} на шаг единичной выборки Δi (в рассматриваемом случае шаг выборки $\Delta i = a$):

$$\gamma_{Ri} = \frac{\Delta R_{ЭК}(i)}{R} = \frac{dR_{ЭК}(i)}{R di} \Delta i = \frac{\rho_{KB} a^2}{(b_K - ka)[b_K - (k + 1)a]R}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что γ_{Ri} имеет максимальное значение при выборке последнего столбца, т.е. при $k + 1 = k_m$. Это может иметь место в случае, когда $\rho_{KB} = \rho_{KB \min}$. Следовательно, для обеспечения при корректировке заданной точности номинала необходимо, чтобы соблюдалось условие

$$\gamma_{Ri} = \gamma_{R \max} \frac{\rho_{KB \min} a^2}{(b_K - ak_m)[b_K - (k_m - 1)a]R} \leq \gamma_{R \text{ расч}}, \quad (5)$$

где $\gamma_{R \max}$ — максимальная относительная погрешность корректировки резистора.

Поскольку сопротивление ЭК после корректировки во всем диапазоне D , т.е. при полной выборке k_m столбцов, равно

$$R_{\text{ЭК}}(k_m) = \rho_{KB \min} \frac{l_K}{b_K - ak_m}, \quad (6)$$

а до корректировки

$$R_{\text{ЭК}}^0 = \rho_{KB \min} k_{\phi \text{ЭК}},$$

где $k_{\phi \text{ЭК}}$ — коэффициент формы ЭК, выраженный через его геометрические параметры

$$k_{\phi \text{ЭК}} = \frac{l_K}{b_K}, \quad (7)$$

то можно записать, что

$$R_{\text{ЭК}}(k_m) = R_{\text{ЭК}}^0 + D. \quad (8)$$

Тогда из выражений (6) - (8) имеем

$$b_K - ak_m = \frac{\rho_{KB \min} k_{\phi \text{ЭК}} b_K}{\rho_{KB \min} k_{\phi \text{ЭК}} + D}. \quad (9)$$

Воспользовавшись условием $b_K - ak_m \geq b_P$, на основании (9) можно записать

$$\frac{\rho_{KB \min} k_{\phi \text{ЭК}} b_K}{\rho_{KB \min} k_{\phi \text{ЭК}} + D} \geq b_P. \quad (10)$$

Таким образом, выражения (7) и (10) позволяют определить геометрические параметры ЭК b_K и l_K , если известен коэффициент формы ЭК $k_{\phi \text{ЭК}}$. Поэтому необходимо рассмотреть вопрос выбора его значений.

Согласно рис. 1.1, площадь ЭК прямоугольной формы:

$$S_{\Pi} = l_K b_K = k_{\phi \text{ЭК}} b_K^2. \quad (11)$$

Подставив в (11) значение b_K из (10) и приравняв нулю производную $dS_{\Pi}/dk_{\phi \text{ЭК}}$, получим, что ЭК занимает минимальную площадь $S_{\Pi \text{ОПТ}}$ при значении коэффициента формы $k_{\phi \text{ЭК}}$, равном

$$k_{\phi \text{ОПТ}} = \frac{D}{\rho_{KB \min}}, \quad (12)$$

чему соответствуют $b_{K \text{ОПТ}}$ и $l_{K \text{ОПТ}}$.

Если при проектировании ставится задача обеспечения минимальной площади, занимаемой резистором на подложке, то необходимо принимать $k_{\phi \text{ЭК}} = k_{\phi \text{ОПТ}}$. Однако при решении задачи обеспечения высокой стабильности КР следует стремиться к возможно меньшему нарушению структуры резистивной пленки, обусловленной воздействием, например, лазерного луча при корректировке. В этом случае необходимо, чтобы длина корректируемой части резистора l_K была по возможности минимальной. Рассмотрим этот случай.

Примем коэффициент формы ЭК резистора

$$k_{\phi \text{ЭК}} = \theta k_{\phi \text{ОПТ}}, \quad (13)$$

где θ — коэффициент пропорциональности.

Проследим за относительным изменением размеров ЭК и его площади в зависимости от значений коэффициента θ . Из рис. 1.2 видно, что при $\theta = 0,2$ длина ЭК l_K уменьшилась, а площадь ЭК увеличилась примерно в 2 раза. Соответственно возрастет и стабильность КР в результате того, что длина нарушенного при корректировке края резистивной пленки уменьшится (см. рис. 1.2). При значениях $\theta < 0,2$ имеют место незначительное уменьшение l_K и резкое возрастание $S_{\text{П}}$. Следовательно, за нижний предел значений θ целесообразно принять значение $\theta = 0,2$. При $\theta > 1,0$ возрастают как длина, так и площадь ЭК. Следовательно, значения θ при расчете ЭК должны находиться в пределах

$$\theta_{\min} = 0,2 \leq \theta \leq \theta_{\max} = 1. \quad (14)$$

С учетом (13) значение b_K из (10) примет вид

$$b_K = b_P \left(1 + \frac{1}{\theta} \right), \quad (15)$$

а значение l_K из (7) с учетом (13) и (15):

$$l_K = b_P k_{\phi \text{ОПТ}} (\theta + 1). \quad (16)$$

Следовательно, на основании (14) b_K могут иметь значения от $2b_P$ до b_P , а l_K — от $2b_P k_{\phi \text{ОПТ}}$ до $1,2 b_P k_{\phi \text{ОПТ}}$.

Теперь найдем длину основной части $l_{\text{ОСН}}$ (ширина ее $b_{\text{ОСН}}$ определяется с учетом допустимой мощности рассеяния), для чего выражение представим так:

$$k_{\phi \text{Т}} = k_{\phi \text{ОСН}} + k_{\phi \text{ЭК}}^0; \quad (17)$$

$$l_{\text{ОСН}} = b_{\text{ОСН}} (k_{\phi \text{Т}} - \theta k_{\phi \text{ОПТ}}). \quad (18)$$

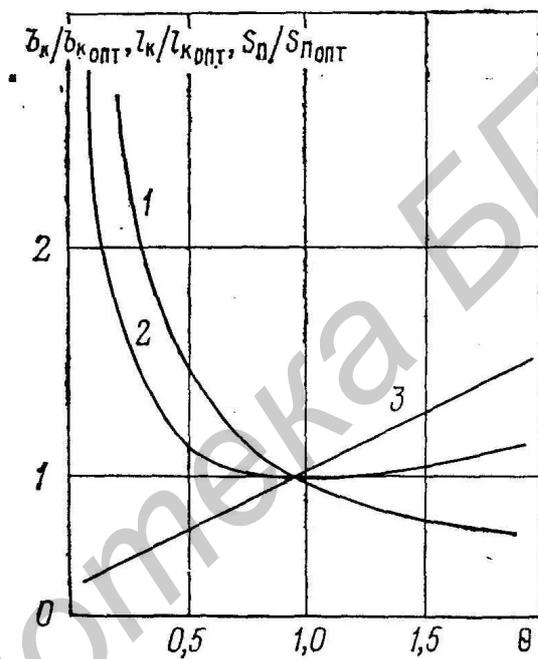


Рис. 1.2. Относительное изменение геометрических параметров ЭК прямоугольной формы в зависимости от коэффициента θ :

1 — $b_k/b_{k\text{ опт}}$; 2 — $S_{\pi}/S_{\pi\text{ опт}}$; 3 — $l_k/l_{k\text{ опт}}$

Таким образом, получены все выражения для расчета геометрических параметров КР. Остается рассмотреть вопрос выбора необходимого диаметра корректирующего инструмента, так как он связан с обеспечением заданной точности резистора. Подставляя (10) в (5) и решая квадратное уравнение, получаем

$$a \leq \frac{Rb_P \gamma_{RПАСЧ}}{2\rho_{KB \min}} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\rho_{KB \min}}{\gamma_{RПАСЧ} R}} \right). \quad (19)$$

Выражение (19) позволяет определить значение стороны элементарной выборки, по которому производится подбор диаметра луча лазера a_0 . Если при выборе диаметра луча лазера окажется, что $a_0 > a$, например $a_0 = \psi a$, где $\psi > 1$, то для обеспечения заданной точности номинала резистора необходимо в ψ раз увеличивать ширину ЭК. Выражения (15) и (16) принимают в этом случае вид

$$b_K = \psi b_P \left(1 + \frac{1}{\theta} \right); \quad (20)$$

$$l_K = \psi b_P k_{\phi \text{ опт}} (\theta + 1). \quad (21)$$

Если КР прямоугольной формы выполняется без основной части, то его размеры могут быть рассчитаны следующим образом. Определяем длину КР по уравнению

$$l = b_P \frac{R(1 - \gamma_{RПАСЧ})}{\rho_{KB \min}}. \quad (22)$$

Определяем ширину КР с помощью выражения

$$b = l/k_{\phi T}. \quad (23)$$

В заключение приводим рекомендуемый порядок расчета топологии корректируемого по ширине резистора с ЭК прямоугольной формы.

Расчет КР с основной частью: определяется ширина b_P , по (12) — значение $k_{\phi \text{ опт}}$; задаются значением коэффициента θ исходя из требований к КР по стабильности и занимаемой площади; по (15) определяется ширина b_K ЭК, по (16) — длина l_K ЭК; по (18) рассчитывается $l_{\text{осн}}$ основной части резистора; по (19) определяется значение параметра a .

Расчет КР без основной части: по (3) определяется значение $k_{\phi T}$; по (22) рассчитывается длина резистора l , по (23) — ширина резистора b ; по (19) определяется значение параметра a .

1.2.2. Корректируемый резистор с локальной формой

Рассмотрим ЭК прямоугольной формы со сторонами l_K и b_K (рис. 1.3, а), выборка материала которого в процессе корректировки имеет локальный характер, и проанализируем метод расчета топологии для этого вида выборки.

Разобьем условно площадь ЭК прямоугольной сеткой с квадратными ячейками со стороной a и примем следующую последовательность корректировки: выборка материала резистора производится в центре каждой ячейки в виде круга с диаметром a_0 последовательно в направлении, совпадающем с направлением линий тока в ЭК, начиная с крайнего столбца ЭК. После выборки крайнего столбца переходят к следующему столбцу, и так до тех пор, пока не будет достигнут заданный номинал резистора с требуемой точностью. В общем случае при этом будут выбраны определенное число целых столбцов k и часть рассчитываемого столбца, в котором скорректировано i ячеек. ЭК в этом случае можно представить состоящим из трех участков с определенными проводимостями: участок длиной l_K и шириной $b_K - a(k + 1)$, участок размерами l_K и ak , участок длиной l_K и шириной a , в котором часть длиной ai состоит из выбранных ячеек, а остальная часть длиной $l_K - ai$ — из невыбранных. Тогда общая текущая проводимость ЭК запишется так :

$$G = \frac{b_K - a(k + 1)}{\rho_{KB} l_K} + \frac{ak}{\rho_L l_K} + \frac{a}{\rho_{KB}(l_L - ai) + ai\rho_L}, \quad (24)$$

где ρ_{KB} — сопротивление ячейки, в которой не была проведена выборка материала; ρ_L — сопротивление ячейки, в которой была проведена локальная выборка материала диаметром a_0 .

Принимая величину k фиксированной и рассматривая G как функцию от i , т. е. $G=f(i)$, находим величину $dR_{ЭК}/di$. Так как $R_{ЭК}=1/G$, то

$$\frac{dR_{ЭК}}{di} = \frac{\partial R_{ЭК}}{\partial G} \frac{dG}{di} = -\frac{1}{G^2} \frac{dG}{di}. \quad (25)$$

Взяв производную по i от (24), получим

$$\frac{dG}{di} = \left[\frac{a}{\rho_{KB}(l_K - ia) + a\rho_L i} \right]^2 (\rho_{KB} - \rho_L). \quad (26)$$

Тогда из (25) с учетом (24) и (26) следует

$$\frac{dR_{ЭК}}{di} = a^2 (\rho_L - \rho_{KB}) \left(\frac{\rho_{KB} l_K \rho_L}{\omega_L \rho_L \omega'_L + ka \rho_{KB} \omega_L + a \rho_L \rho_{KB} l_K} \right)^2, \quad (27)$$

где $\omega'_L = \rho_{KB}(l_K - ia) + a\rho_L i$; (28)

$$\omega_{\text{Л}} = b_{\text{К}} - a(k+1). \quad (29)$$

Положим, что для перекрытия всего диапазона корректировки D в случае минимального действительного значения $\rho_{\text{КВ min}}$ понадобится выборка материала в каждой ячейке по всей площади ЭК. В этом случае можно написать, что число выбранных столбцов

$$k_m = b_{\text{К}} / a; \quad (30)$$

$$k+1 = k_m. \quad (31)$$

Тогда значение $\omega_{\text{Л}}$ из (29) с учетом (31) будет равно 0, а из (28) при всех полностью выбранных столбцах получим

$$\omega'_{\text{Л}} = \rho_{\text{КВ min}} l_{\text{К}}. \quad (32)$$

Следовательно, из (27) с учетом (29) — (32) найдем

$$\frac{dR_{\text{ЭК}}}{di} = a^2 (\rho_{\text{Л}} - \rho_{\text{КВ min}}) \left(\frac{\rho_{\text{Л}}}{(b_{\text{К}} - a) \rho_{\text{КВ min}} + a \rho_{\text{Л}}} \right)^2$$

или, учитывая, что $\rho_{\text{КВ}}$ и $\rho_{\text{Л}}$ соизмеримы и $b_{\text{К}} > a$:

$$\frac{dR_{\text{ЭК}}}{di} \cong a^2 (\rho_{\text{Л}} - \rho_{\text{КВ min}}) \left(\frac{\rho_{\text{Л}}}{b_{\text{К}} \rho_{\text{КВ min}}} \right)^2. \quad (33)$$

Точность корректировки при этом $\gamma_{\text{РПАСЧ}}$ определим по формуле

$$\gamma_{\text{РПАСЧ}} = \frac{a^2 (\rho_{\text{Л}} - \rho_{\text{КВ min}})}{R b_{\text{К}}^2} \left(\frac{\rho_{\text{Л}}}{R \gamma_{\text{РПАСЧ}}} \right)^2. \quad (34)$$

Из (34) находим, что

$$b_{\text{К}} = \frac{a \rho_{\text{Л}}}{\rho_{\text{КВ min}}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{Л}} - \rho_{\text{КВ min}}}{R \gamma_{\text{РПАСЧ}}}}. \quad (35)$$

Поскольку сопротивление ЭК после выборки во всех ячейках можно выразить как $R_{\text{ЭК}} = \rho_{\text{Л}} k_{\Phi \text{ЭК}}$ и в то же время по условию оно определяется выражением

$$R_{\text{ЭК}} = \rho_{\text{КВ min}} \frac{l_{\text{К}}}{b_{\text{К}}} + D = \rho_{\text{КВ min}} k_{\Phi \text{ЭК}} + D,$$

то, решив их совместно относительно $k_{\Phi \text{ЭК}}$, найдем

$$k_{\Phi \text{ЭК}} = \frac{D}{\rho_{\text{Л}} - \rho_{\text{КВ min}}}. \quad (36)$$

Далее выразим значение b_K через b_P .

При выборке числа столбцов k_m общая ширина по поперечному сечению ЭК, оставшегося после выборки материала ЭК, должна быть не менее ширины b_P . Это условие можно записать так:

$$b_K - a_0 k_m \geq b_P \quad (37)$$

или с учетом (30)

$$b_K \left(1 - \frac{a_0}{a} \right) \geq b_P. \quad (38)$$

Примем

$$\frac{a}{a_0} = k_L. \quad (39)$$

Подставляя в (38) значение a из (39) и решая его относительно b_K , находим

$$b_K \geq b_P \frac{k_L}{k_L - 1}. \quad (40)$$

Подставляя в (40) значение b_K из (35) с заменой одновременно a через a_0 из (39) и выражая отсюда a_0 , получаем

$$a_0 \geq b_P \frac{1}{k_L - 1} \frac{1}{\frac{\rho_L}{\rho_{KB \min}} \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_{KB \min}}{R \gamma_{R \text{ ПАСЧ}}}}}. \quad (41)$$

Таким образом, формулы (39) — (41) позволяют определить необходимые параметры ЭК, шаг корректировки и требования к корректирующему инструменту, если будут известны значения ρ_L и k_L . Определим эти величины.

Квадратную ячейку со стороной a после выборки площади диаметром a_0 можно представить состоящей из четырех идентичных по конфигурации частей (рис. 1.3, б). Одна из них ограничена контуром 01234. Из рисунка видно, что сопротивление этой части равно сопротивлению всей ячейки ρ_L , так как они соединены параллельно-последовательно. Таким образом, необходимо определить сопротивление этой части ячейки. Так как все линии тока полагаем в элементе параллельными друг другу, то сопротивление рассматриваемого участка можно представить состоящим из последовательно соединенных сопротивлений прямоугольника 1235 и прямоугольной трапеции с вогнутой стороной 0534.

Сопротивление прямоугольника определим по формуле

$$r_{II} = \rho_{KB \min} \frac{a - a_0}{a} = \rho_{KB \min} \left(1 - \frac{1}{k_L} \right). \quad (42)$$

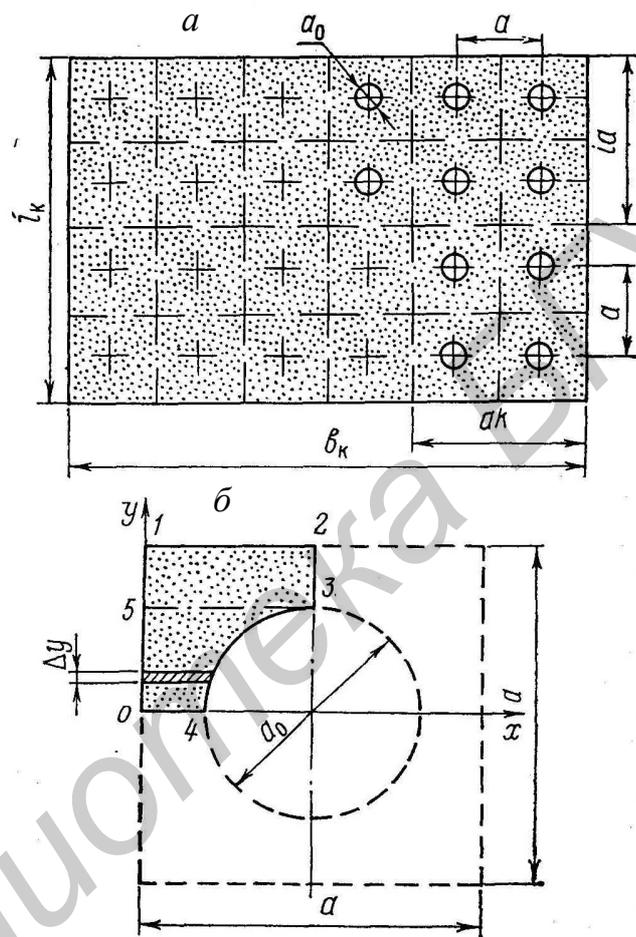


Рис. 1.3. Схема ЭК прямоугольной формы с продольным видом корректировки при локальной выборке (а) и фрагмент условной элементарной ячейки (б)

Сопrotивление второй фигуры — трапеции с вогнутой стороной можно представить как сумму сопротивлений последовательно соединенных элементарных участков с длиной Δy . Если принять точку 0 за начало осей координат, то сопротивление рассматриваемой фигуры

$$r_V = \rho_{KB \min} \int_{y=0}^{y=0,5a_0} \frac{dy}{0,5a_0 k_{\text{Л}} - \sqrt{0,25a_0^2 - (0,5a_0 - y)^2}}. \quad (43)$$

Решая (43), получаем

$$r_V = \rho_{KB \min} \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{2k_{\text{Л}}}{\sqrt{k_{\text{Л}}^2 - 1}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{k_{\text{Л}} + 1}}{\sqrt{k_{\text{Л}} - 1}} \right). \quad (44)$$

Тогда с учетом (42) и (44)

$$\rho_{\text{Л}} = r_{\text{П}} + r_V = \rho_{KB \min} [1 + f(k_{\text{Л}})], \quad (45)$$

где

$$f(k_{\text{Л}}) = -\frac{1}{k_{\text{Л}}} - \frac{\pi}{2} + \frac{2k_{\text{Л}}}{\sqrt{k_{\text{Л}}^2 - 1}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{k_{\text{Л}} + 1}}{\sqrt{k_{\text{Л}} - 1}}. \quad (46)$$

С учетом (45) выражения (36), (41) представим в виде

$$k_{\Phi \text{ЭК}} = \frac{D}{\rho_{KB \min} f(k_{\text{Л}})} = \frac{k_{\Phi \text{ОПГ}}}{f(k_{\text{Л}})}, \quad (47)$$

$$a_0 \geq \frac{b_P}{k_{\text{Л}} - 1} \frac{1}{[1 + f(k_{\text{Л}})] \sqrt{\rho_{KB \min} f(k_{\text{Л}}) / R \gamma_{R \text{ПАСЧ}}}}. \quad (48)$$

Длина основной части резистора определяется по уравнению

$$l_{\text{ОСН}} = b_P k_{\Phi \text{ОСН}}. \quad (49)$$

Таким образом, выведены все формулы, с помощью которых можно рассчитать топологию резистора. Определим теперь, какому значению $k_{\text{Л}}$ соответствует минимум занимаемой площади ЭК. Площадь ЭК

$$S_{\text{Л}} = b_K l_K = k_{\Phi \text{ЭК}} b_K^2$$

или с учетом (40) и (47)

$$S_{Л} = f_2(k_{Л}) = \frac{k_{\Phi \text{ ОПТ}}}{f(k_{Л})} b_P^2 \left(\frac{k_{Л}}{k_{Л} - 1} \right)^2 = k_{\Phi \text{ ОПТ}} b_P^2 \frac{[f_1(k_{Л})]^2}{f(k_{Л})}. \quad (50)$$

Из графика $S_{Л} = f_2(k_{Л})$ (рис. 1.4) следует, что оптимальные по минимуму занимаемой площади резистора значения $k_{Л}$ находятся в пределах

$$k_{Л} = k_{Л \text{ ОПТ}} \cong 1,5 - 2,0.$$

Если резистор выполняется без основной части, то предельным значением $k_{\Phi \text{ ЭК}}$ является $k_{\Phi \text{ Т}}$. С учетом (47) можно записать

$$\frac{k_{\Phi \text{ ОПТ}}}{f(k_{Л})} \leq k_{\Phi \text{ Т}}. \quad (51)$$

Из (51) с учетом (2) и (3) следует, что

$$f(k_{Л}) \geq \left(1 - \frac{\gamma_{R \text{ РАСЧ}}}{\gamma_{R \text{ ТЕХН}}} \right) \frac{2\gamma_{R \text{ ТЕХН}}}{1 + \gamma_{R \text{ РАСЧ}}}. \quad (52)$$

Выражение (52) определяет минимальное значение $k_{Л}$, при котором обеспечивается корректировка в диапазоне D . С учетом (52) по (48) находится a_0 для КР без основной части.

Рекомендуемый порядок расчета резисторов с ЭК прямоугольной формы при локальной выборке: исходя из возможностей имеющегося оборудования, задается значение $k_{Л}$, наиболее близкое к $k_{Л \text{ ОПТ}}$; по (46) определяется значение $f(k_{Л})$, по (47) – значение $k_{\Phi \text{ ЭК}}$; по (40) находится ширина ЭК b_K , по (7) – длина ЭК l_K ; определяется $k_{\Phi \text{ ОСН}}$ с учетом значения $k_{\Phi \text{ Т}}$, рассчитанного по (3); по (49) находится $l_{\text{ОСН}}$ основной части резистора; по (48) определяется a_0 , по (39) – шаг выборки a .

Рекомендуемый порядок расчета резисторов без основной части: определяется значение $k_{Л}$ исходя из (46) и (52); по (3) рассчитывается значение $k_{\Phi \text{ Т}}$, по (40) – значение b_K , по (7) – значение l_K ; по (48) с учетом (52) рассчитывается значение a_0 ; по (39) определяется шаг выборки a .

1.3. КОРРЕКТИРУЕМЫЙ РЕЗИСТОР ТРАПЕЦИЕВИДНОЙ ФОРМЫ

Рассмотрим сначала варианты выполнения ЭК трапецевидной формы (рис. 1.5). С целью сравнения по занимаемой площади топология ЭК (см. рис. 1.5, а) выполнена так, что она эквивалентна по электрическим параметрам

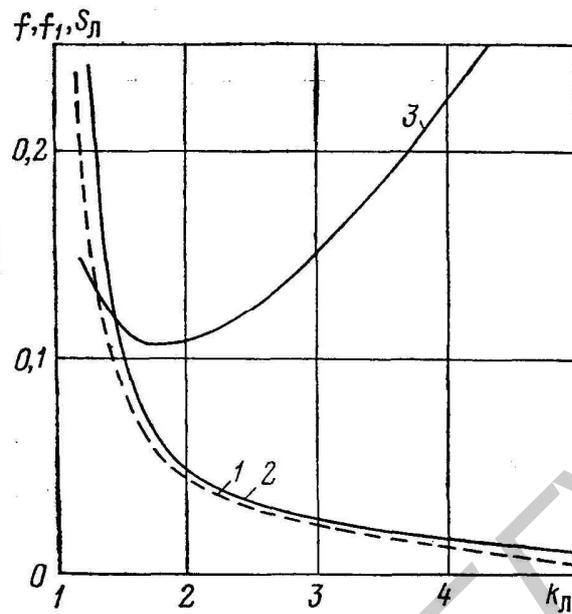


Рис. 1.4. Функциональные зависимости для определения параметров ЭК прямоугольной формы при корректировке с локальной выборкой:

$$1 - f(k_{л}); 2 - [f_1(k_{л})]^2; 3 - S_{л} = f_2(k_{л}) = [f_1(k_{л})]^2 / f(k_{л})$$

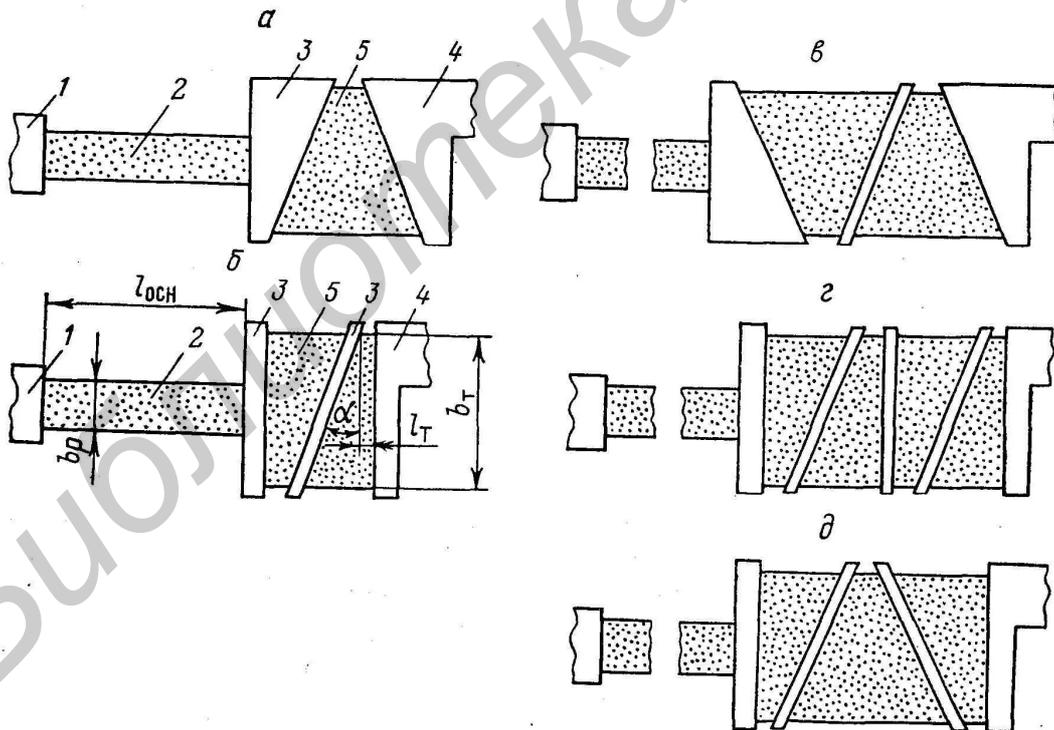


Рис. 1.5. Разновидности КР с ЭК трапецевидной формы:
 1, 4 – контактные площадки; 2 – основная часть резистора;
 3 – перемычка; 5 – ЭК

представленной топологии (рис. 1.5, б), т.е. соблюдены следующие условия: диапазон корректировки сопротивления у всех конструкций одинаков; заданный номинал резистора достигается с требуемой точностью в пределах всего диапазона корректировки; оставшаяся после корректировки часть ЭК обеспечивает заданную мощность рассеяния. Представленные топологии (рис. 1.5, в – д) также эквивалентны между собой.

Топологии (рис. 1.5, б – д), по сравнению с топологией (см. рис. 1.5, а) имеют то преимущество, что исходное (до корректировки) сопротивление ЭК не зависит от величины рассовмещения контактных площадок относительно резистивного слоя [95]. В свою очередь, топологии ЭК (см. рис. 1.5, б, г) по сравнению с соответствующими топологиями (рис. 1.5, а, в) более предпочтительны, так как они компактны и занимают меньшую площадь. Топология (рис. 1.5, д) по сравнению с топологией (рис. 1.5, г) занимает еще меньшую площадь (отсутствует одна проводящая перемычка).

При разработке топологии ЭК трапециевидной формы должен содержать не менее двух трапециевидных резистивных участков, причем те из них, которые расположены со стороны входа и выхода ЭК относительно линий тока, должны иметь форму прямоугольной трапеции. Соблюдение этого условия позволяет уменьшить площадь, занимаемую резистором на подложке [200, 201].

Теперь перейдем к вопросу расчета резисторов с ЭК трапециевидной формы. Исходными данными для расчета их топологии являются топологические особенности резистора и вид корректировки; заданные электрические параметры резистора – номинал R , относительная погрешность сопротивления $\gamma_{R\text{РАСЧ}}$, мощность рассеяния P_a ; параметры, определяемые технологией, – относительная технологическая погрешность сопротивления резистора $\gamma_{R\text{ТЕХН}}$, удельная допустимая мощность рассеяния резистивной пленки P_0 , сопротивление квадрата резистивной пленки ρ_{KB} .

Цель расчета – определение геометрических параметров топологии корректируемого резистора, т.е. размеров ЭК (ширины b_T , длины малого основания трапеции l_T , угла наклона a проводящей перемычки) и основной части резистора – длины l_{OCH} и ширины b_{OCH} (рис. 1.6).

При разработке метода расчета резисторов с ЭК трапециевидной формы используем формулы, предназначенные для расчета резисторов с ЭК прямоугольной формы (рис. 1.6, а). Это позволит упростить разработку метода расчета, а также провести сравнение конструкций резисторов с различными формами ЭК на основе указанных выше условий эквивалентности по электрическим параметрам.

Рассмотрим топологию ЭК, состоящего из одного трапециевидного элемента (рис. 1.6, б). Для упрощения положим, что ширина трапециевидного элемента b_T равна ширине ЭК прямоугольной формы b_K , т.е.

$$b_T = b_K . \quad (53)$$

Примем также, что размер большего основания трапеции равен длине ЭК прямоугольной формы, т.е.

$$l' = l_K. \quad (54)$$

Исходное (до корректировки) число квадратов $k_{\phi \text{ЭК}}^0$ рассматриваемого ЭК определяется из формулы

$$k_{\phi \text{ЭК}}^0 = \frac{\text{tg} \alpha_1^0}{\ln \left(1 + \frac{b_T}{l_T} \text{tg} \alpha_1^0 \right)}, \quad (55)$$

где величина l_T задается минимальной исходя из технологических требований. Конечное число квадратов $k_{\phi \text{ЭК}}^k$ этого ЭК при корректировке со стороны малого основания трапеции l_T при условии максимальной выборки материала ЭК вплоть до ширины b_p , (рис. 1.6, б), будет примерно равно конечному числу квадратов ЭК прямоугольной формы после корректировки. Однако так как исходный коэффициент формы ЭК (см. рис. 1.6, б) меньше, чем у прямоугольного (см. рис. 1.6, а), то ЭК трапециевидной формы будет обеспечивать большой диапазон корректировки. В то же время из рис. 1.6 видно, что условия корректировки для ЭК трапециевидной и прямоугольной форм в этом случае идентичны. Следовательно, для ЭК трапециевидной формы размер элементарной выборки также можно определить по выражению (19). При точной корректировке выборка материала ЭК производится со стороны большого основания трапеции. В этом случае точность корректировки также превосходит заданную.

Таким образом, рассмотренный ЭК трапециевидной формы эквивалентен по электрическим параметрам ЭК прямоугольной формы, за исключением перекрытия диапазона корректировки. При изменении угла наклона боковой стороны ЭК (рис. 1.6, в) будут изменяться как начальное, так и конечное значения коэффициента формы ЭК. При некотором значении угла $\alpha = \alpha_2^0$ диапазон корректировки ЭК трапециевидной формы станет равным диапазону корректировки ЭК прямоугольной формы, при этом рассматриваемые ЭК будут полностью эквивалентными по электрическим свойствам.

Перейдем теперь к рассмотрению конструкции ЭК трапециевидной формы (см. рис. 1.6, г), для которой примем выполнение условия

$$2(k_{\phi \text{ЭК}}^k - k_{\phi \text{ЭК}}^0) = D / \rho_{KB \min}, \quad (56)$$

где $k_{\phi \text{ЭК}}^0$ — исходное число квадратов каждого трапециевидного элемента; $k_{\phi \text{ЭК}}^k$ — конечное число квадратов каждого из них при корректировке со

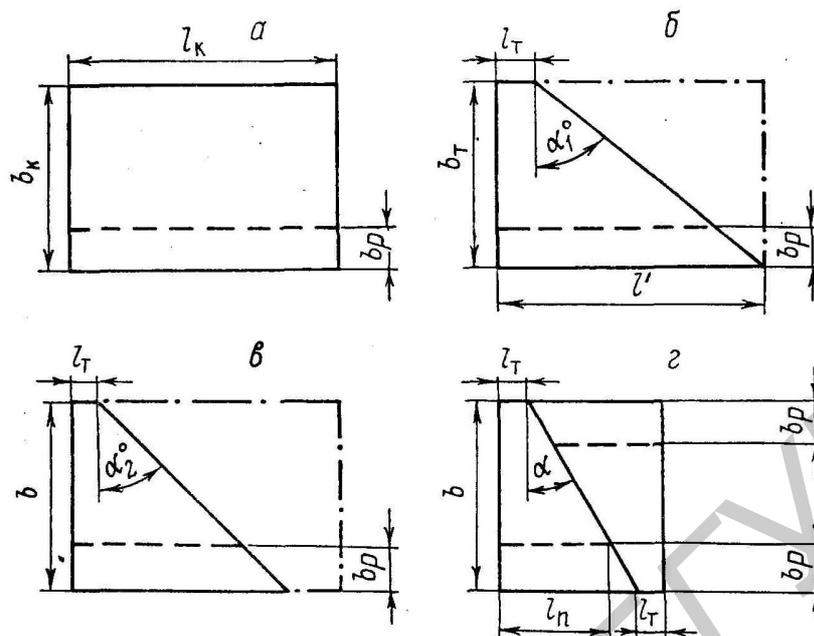


Рис. 1.6. Стадии перехода от ЭК прямоугольной формы к ЭК трапецевидной формы:
 а – ЭК прямоугольной формы;
 б–г — геометрические преобразования ЭК трапецевидной формы

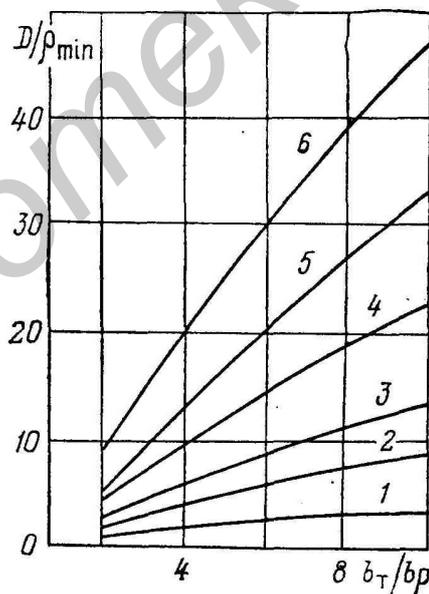


Рис. 1.7. Графики зависимости $\frac{D}{\rho_{min}} = f(b_T/b_p)$ при $l_T = b_p$:
 1 – угол наклона боковой стороны ЭК трапецевидной формы $\alpha=16^\circ$;
 2 – 20° ; 3 – 35° ; 4 – 50° ; 5 – 60° ; 6 – 70°

стороны l_T . Значения $k_{\phi \text{ЭК}}^0$ и $k_{\phi \text{ЭК}}^k$ по аналогии с (55) с учетом обозначений (рис. 1.6, г) можно представить в виде

$$k_{\phi \text{ЭК}}^0 = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\ln(1 + b_T \operatorname{tg} \alpha / l_T)}; \quad (57)$$

$$k_{\phi \text{ЭК}}^k = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\ln(1 + b_P \operatorname{tg} \alpha / l_N)}, \quad (58)$$

где l_N (см. рис. 1.6, г), определяется выражением

$$l_N = \operatorname{tg} \alpha (b_T - b_P) + l_T. \quad (59)$$

Тогда с учетом (57) и (58) условие (56) имеет вид

$$\frac{D}{\rho_{KB \min}} = 2 \operatorname{tg} \alpha \left(\frac{1}{\ln(1 + b_P \operatorname{tg} \alpha / l_N)} - \frac{1}{\ln(1 + b_T \operatorname{tg} \alpha / l_T)} \right). \quad (60)$$

Определением из трансцендентного уравнения (60) значения угла наклона перемычки α завершается расчет топологии ЭК трапециевидной формы, который по электрическим параметрам полностью эквивалентен ЭК прямоугольной формы. При этом необходимо учитывать ограничения, накладываемые предельными значениями угла наклона перемычки α_{max} и α_{min} . На практике принимают значения α_{min} порядка 10° , а α_{max} — $65-70^\circ$. При меньших значениях угла ЭК трапециевидной формы не имеет преимуществ по сравнению с ЭК прямоугольной формы, при больших углах целесообразнее применять конструкцию ЭК с распределенным шунтом.

Зависимость величины текущего сопротивления ЭК трапециевидной формы от числа выбираемых столбцов k и ячеек i определяется выражением

$$R_{\text{ЭК}}(k, i) = \frac{\rho_{KB} (m_T + ai) \operatorname{tg} \alpha}{(m_T + ai) \ln \frac{m_1}{m_T} + 2a \operatorname{tg} \alpha}, \quad (61)$$

где $m_T = l_T + a(k + 1) \operatorname{tg} \alpha$; $m_1 = l_T + b_T \operatorname{tg} \alpha$.

Расчет основной части резистора сводится к определению длины $l_{\text{ОСН}}$ по (18) с использованием вместо произведения $\theta k_{\phi \text{ОПТ}}$ значения $k_{\phi \text{ЭК}}^0$, определенного по (57).

Таким образом, получены выражения, необходимые для расчета топологии резисторов с ЭК трапециевидной формы с оптимальными параметрами. Для снижения трудоемкости расчетов целесообразно по (60) построить расчетные графики при различных значениях отношения b_T/b_P . Рассмотрим такие графики для распространенного в практике случая $l_T - b_P$ (рис.1.7).

Рекомендуемый порядок расчета КР с ЭК трапецевидной формы: по (17) определяется значение b_p ; задается ширина ЭК b_T из диапазона значений $2b_p - 6b_p$ с учетом того, что меньшим значениям b_T соответствует меньшая площадь ЭК, большим – большая стабильность резистора после корректировки; по (2) рассчитывается величина диапазона корректировки D ; по (57) находится исходное число квадратов ЭК $k_{\Phi \text{ЭК}}^0$; по (3) – коэффициент формы исходного технологического сопротивления; по (18) рассчитывается длина $l_{\text{осн}}$ основной части резистора с учетом (57).

1.4. КОРРЕКТИРУЕМЫЙ РЕЗИСТОР Т-ОБРАЗНОЙ ФОРМЫ

Рассмотрим конструкцию резистора (рис. 1.8). Вывод расчетных формул рассмотрим для поперечного вида корректировки, когда выборка материала ЭК производится со стороны расположения его контактных площадок условными квадратными ячейками со стороной a до тех пор, пока не будет достигнут заданный номинал резистора с требуемой точностью.

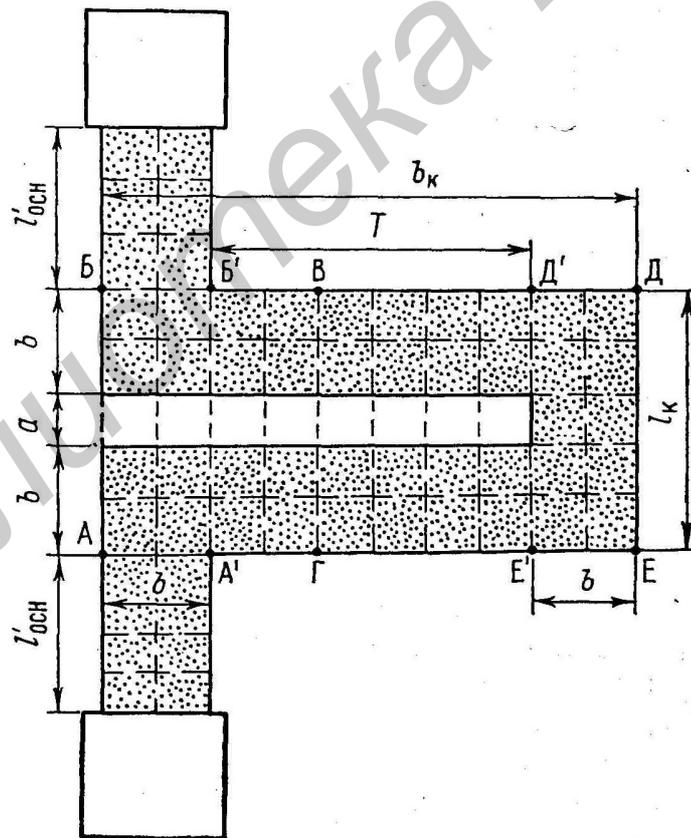


Рис. 1.8. КР Т-образной формы с поперечным видом корректировки

При расчете использованы следующие исходные данные: R – номинал резистора; $\gamma_{R\text{РАСЧ}}$ – относительная погрешность сопротивления резистора; ρ_{KB} – сопротивление резистивной пленки; $\gamma_{R\text{ТЕХН}}$ – относительная технологическая погрешность сопротивления резистора; b_P – минимальная допустимая ширина резистора. Искомыми являются значения T (см. рис. 1.8) и длина основной части резистора $l_{OCH} = 2 l'_{OCH}$.

Положим, что исходное сопротивление ЭК определяется фигурой с контуром $ABVG$ (шунтирующим действием части ЭК с контуром $ГВДЕ$ пренебрегаем), в котором $B'B = A'T = b$. Исходя из рис. 1.8, это сопротивление можно выразить (при текущем значении числа выбираемых ячеек $i = 0$) в виде

$$R_{ЭК}(i)_{i=0} = \rho_{KB} \left[k_{\Phi ЭК}^0 + 2f(v) \right], \quad (62)$$

где

$$k_{\Phi ЭК}^0 = \frac{l_K}{2b} = \frac{2b+a}{2b} \cong 1, \quad (63)$$

так как $a \ll b$;

$$f(v) = \frac{1}{h} \left[\frac{v^2+1}{v} \ln \frac{v+1}{v-1} - 2 \ln \frac{4v}{v^2-1} \right]. \quad (64)$$

Здесь при принятом допущении имеем

$$v = BB/b = 2.$$

С учетом этого значение $f(v)$ из (64):

$$f(v) = 0,235. \quad (65)$$

Тогда, учитывая (63) и (65), из (62) имеем

$$R_{ЭК}(i)_{i=0} \cong 1,5 \rho_{KB}. \quad (66)$$

Величину сопротивления ЭК в предельном случае, соответствующем перекрытию всего диапазона корректировки D , можно выразить через геометрические параметры:

$$R_{ЭК}(i)_{i=i_{\max}} \cong 2 \rho_{KB \min} (T/b + \Delta k_{\phi}), \quad (67)$$

где Δk_{ϕ} – доля сопротивления, вносимая участками изгиба (выраженная через число квадратов). С другой стороны, эта же величина $R_{ЭК}(i)_{i=i_{\max}}$ должна быть равна

$$R_{ЭК}(i)_{i=i_{\max}} = R_{ЭК}(i)_{i=0} + D. \quad (68)$$

Решая (67) и (68) относительно T , с учетом (66) получим

$$T = \left[0,5(D/\rho_{KB \min} + 1,5) - \Delta k_{\phi} \right] b. \quad (69)$$

Значение Δk_{ϕ} определяется одним из известных способов. Из рис. 1.8 следует:

$$b_K = T + 2b; \quad (70)$$

$$l_K = 2b + a \cong 2b. \quad (71)$$

Согласно рис. 1.8 и (63), находим

$$l_{OCH} = 2l'_{OCH} = b(k_{\phi T} - k_{\phi \text{ЭК}}^0) = b(k_{\phi T} - 1). \quad (72)$$

Теперь остается определить значение a . Для этого необходимо представить (62) в общем виде, т.е. при $i \neq 0$. Для всего диапазона значений i это сделать трудно, что объясняется сложной зависимостью $R_{\text{ЭК}}(i)$ при корректировке на участке от AB до $A'B'$ (рис. 1.8). Поэтому мы ограничимся представлением $R_{\text{ЭК}}(i)$ для участка от $A'B'$ до $D'E'$, при этом также пренебрегаем изменением сопротивления на участке изгиба на угол 180° , полагая его постоянным. Тогда $R_{\text{ЭК}}(i)$ можно выразить так:

$$R_{\text{ЭК}}(i) = 2\rho_{KB \min} \frac{a_i}{b} + R_{\text{ЭК}}(i)_{i=0} + \Delta\rho_L, \quad (73)$$

где $\Delta\rho_L$ — суммарное сопротивление всех участков изгиба, которое принимаем соответствующим случаю $i=i_{\max}$. Определив из (73) значение $dR_{\text{ЭК}}(i)/di$, найдем, что

$$\gamma_i = 2 \frac{\rho_{KB \min} a}{R b},$$

откуда

$$a = 0,5\gamma_{R \text{РАСЧ}} b \frac{R}{\rho_{KB \min}}. \quad (74)$$

Рекомендуемый порядок расчета КР Т-образной формы: по (74) находится значение a ; определяется параметр T по (69) с учетом значения Δk_ϕ , которое рассчитывается по известным формулам при аппроксимации участков изгиба радиусным или прямоугольным контуром, при этом ширина всех участков изгиба принимается равной b ; по (70) и (71) определяются значения b_K и l_K ; по (72) — значение l_{OCH} с учетом значения $k_{\phi T}$, рассчитываемого по (3).

1.5. КОРРЕКТИРУЕМЫЙ РЕЗИСТОР С ШУНТОМ

Проведем разработку метода расчета (рис.1.9), исходными данными которого, аналогично предыдущим методам, являются следующие: R , ρ_{KB} , $\gamma_{R \text{РАСЧ}}$, b_P , $\gamma_{R \text{ТЕХН}}$, искомыми — b_K , l_K , l_{OCH} .

Вид корректировки такого КР следующий: производится выборка или материала шунта, или резистивного материала вдоль шунта. Выборка проводится элементарными квадратными ячейками, размер стороны которых равен a , последовательно до тех пор, пока не будет достигнут заданный номинал резистора с требуемой точностью (направление корректировки на рис. 1.9 — снизу вверх).

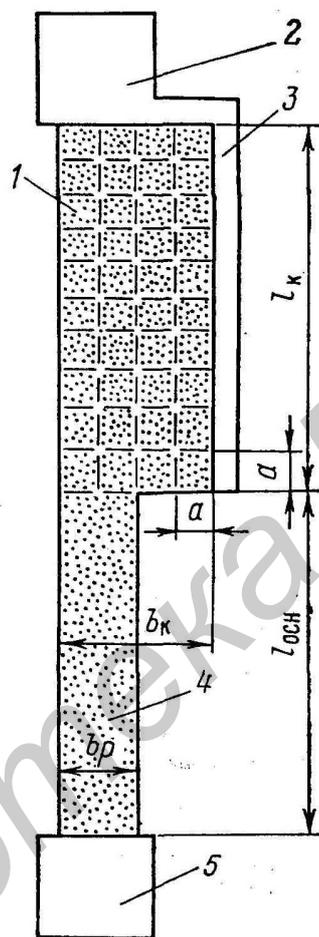


Рис. 1.9. КР с шунтом:

- 1 – резистивная часть ЭК; 2, 5 – контактные площадки;
 3 – шунт; 4 – основная часть резистивной пленки

Как следует из рис. 1.9, шунт закорачивает ЭК резистора. Это означает, что начальное (до корректировки) сопротивление ЭК можно считать равным нулю, т. е. $R_{ЭК}(i)_{i=0} = 0$. Тогда на основании (8) можно записать:

$$R_{ЭК}(i)_{i_{\max}} = D, \quad (75)$$

т.е. сопротивление ЭК в случае перекрытия всего диапазона корректировки равно по величине его значению. Так как

$$R_{ЭК}(i)_{i_{\max}} = \rho_{KB \min} l_K / b_K,$$

то из (75) следует, что

$$l_K = b_K \frac{D}{\rho_{KB \min}}. \quad (76)$$

Если корректировка проводится за счет выборки материала шунта, то

$$b_K = b_P, \quad (77)$$

а если путем выборки резистивного материала, то

$$b_K = b_P + a. \quad (78)$$

Таким образом, с помощью формул (76) – (78) определяют геометрические параметры ЭК. Так как $R_{ЭК}(i)_{i=0} = 0$, то

$$l_{ОСН} = k_{\phi T} b_P. \quad (79)$$

Остается определить требования к параметру a с учетом обеспечения заданной точности γ_R . Для резистора с шунтом увеличение сопротивления на шаг единичной выборки определяется выражением

$$\Delta R_{ЭК} = \rho_{KB \max} \frac{a}{b_P}.$$

Так как

$$\gamma_{R \text{ РАСЧ}} = \frac{\Delta R_{ЭК}}{R},$$

то получаем

$$a = b_P \gamma_{R \text{ РАСЧ}} \frac{R}{\rho_{KB \max}}. \quad (80)$$

Текущая зависимость сопротивления ЭК от числа выбираемых ячеек i определяется выражением

$$\Delta R_{ЭК}(i) = \rho_{KB} \frac{ia}{b_P}.$$

Рекомендуемый порядок расчета топологии КР с распределенным шунтом: по

(2) определяется значение D ; по (80) – значение a ; по (77) или по (80) рассчитывается значение b_K , по (76) – значение l_K ; по (79) находится значение l_{OCH} .

1.6. РЕШЕТЧАТЫЙ КОРРЕКТИРУЕМЫЙ РЕЗИСТОР

Для расчета топологии решетчатых КР использованы принципы расчета топологии КР с непрерывным изменением сопротивления. Отличие состоит только в том, что в этом случае под элементарной выборкой подразумевается не удаление ячейки резистивной пленки со стороной a , а перерезание резистивной или шунтирующей проводниковой перемычки, приводящее к соответствующему повышению величины сопротивления КР.

1.6.1. Резистор с решетчатым ЭК, содержащий проводящие перемычки (продольная корректировка)

Разработку методики расчета проведем с помощью рис. 1.10. Значение ширины h_b элементарного резистивного элемента задается минимальным, обеспечивающим заданную мощность рассеяния, т. е. $h_b = b_p$. Его длина h_l принимается такой, чтобы проводящие перемычки 3 во время корректировки не повреждались корректирующим инструментом. Значение конструктивного размера h_3 задается из соображений учета полного выхода корректирующего инструмента при разрезании резистивного элемента 2, исключая возможность повреждения следующего резистивного элемента по ходу инструмента. Ширина перемычки h_{II} принимается минимальной исходя из возможностей технологии изготовления. Определяется величина сопротивления резистивного элемента 2:

$$r_p = \rho_{KB \min} \frac{h_l}{h_b}. \quad (81)$$

Расчет резистора с данным типом ЭК проводится с помощью формул, приведенных в разделе 1, в которые вместо значения ρ_{KB} необходимо подставлять значение r_p , полученное по (81).

Рекомендуемый порядок расчета: задаются значения конструктивных элементов h_b , h_l , h_{II} , h_3 с учетом изложенных выше соображений; по (81) определяется значение r_p ; с помощью расчета по методике, приведенной в разделе 1, находят число элементарных ячеек k_b и k_l соответственно по ширине и длине ЭК, при этом необходимо в формулах, использованных в разделе 1, вместо значения ρ_{KB} подставить значение r_p ; размеры ЭК определяются по формулам:

$$b_K = k_b h_b + (k_b - 1) h_3; \quad (82)$$

$$l_K = k_l h_l + (k_l - 1) h_{II}. \quad (83)$$

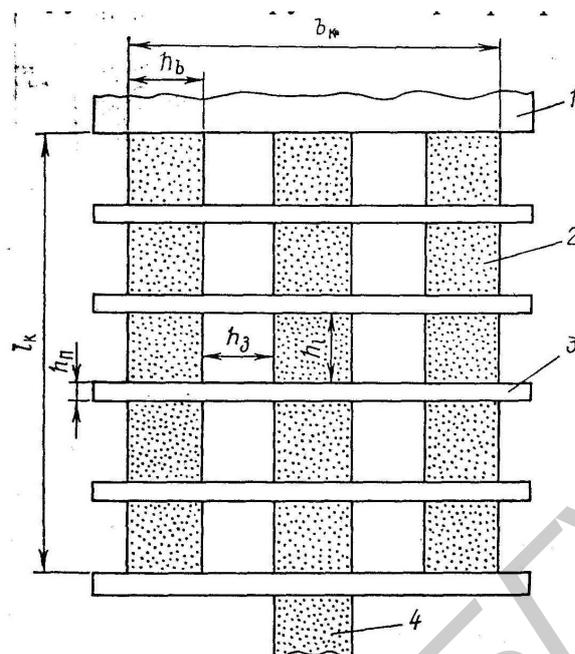


Рис. 1.10. КР с ЭК решетчатой прямоугольной формы с проводниковыми элементами и продольным видом корректировки:

- 1 – контактная площадка; 2 – резистивный элемент ЭК;
- 3 – перемычка; 4 – основная часть резистивной пленки

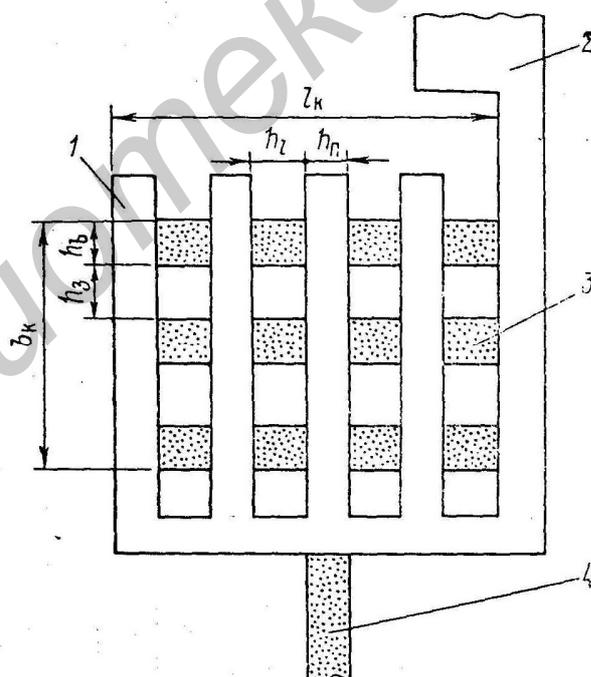


Рис. 1.11. КР с ЭК решетчатой прямоугольной формы с проводниковыми элементами и последовательным видом корректировки:

- 1 – проводниковый элемент; 2 – контактная площадка;
- 3 – резистивный элемент ЭК; 4 – основная часть резистивной пленки

1.6.2. Резистор с решетчатым ЭК, содержащий проводящие перемычки (последовательная корректировка)

Рассмотрим конструкцию ЭК представленного на рис. 1.11 типа. Процесс корректировки осуществляется путем разрезания проводящих перемычек последовательно, одна за другой до достижения номинала R с заданной точностью γ_R . При перекрытии диапазона корректировки D все резистивные элементы ЭК будут соединены последовательно. Обозначение b_K и l_K данного ЭК относительно направления линий тока в нем условно.

При задании параметров h_b , h_l , h_{II} , h_3 и h_3 исходят из тех же соображений, которые изложены в подразд. 1.6.1. Так как ширина h_b задается, то сопротивление r_p элементарного резистивного элемента определяется по (81) и должно отвечать требованию

$$r_p / R \leq \gamma_{R \text{ РАСЧ}}, \quad (84)$$

в противном случае h_b и h_l должны быть скорректированы с учетом этого требования.

Число всех резистивных элементов ЭК

$$N_p = D / r_p, \quad (85)$$

где D определяется по (2). Число резистивных столбцов N_C ЭК задается исходя из конструктивных соображений. Из рис. 1.11 следует, что

$$b_K = (h_3 + h_b)(N_C - 1) + h_b. \quad (86)$$

Число резистивных элементов в столбце определится как N_p / N_C . Тогда

$$l_K = (h_l + h_{II}) \frac{N_p}{N_C} + h_{II}. \quad (87)$$

Так как при данном ЭК $R_{ЭК}^0 = 0$, то величина сопротивления основной части резистора $R = R_T$.

При больших значениях отношениях R/ρ_{KB} и $\gamma_{R \text{ ТЕХН}}$ и малой величине γ_R описанную конструкцию ЭК не рекомендуется применять по следующим причинам: ЭК будет занимать большую площадь, возможно проявление нестабильности за счет большого числа контактных участков на резистивной части ЭК, возрастает время корректировки вследствие необходимости разрезания проводящих перемычек. Поэтому в этом случае рационально конструировать ЭК по другому принципу. Замкнутыми между собой проводящими перемычками всю длину резистивной пленки ЭК разбивают на участки таким образом, чтобы величины сопротивлений этих участков составили геометрическую прогрессию. Соответственно и изменение сопротивления при последовательном разрезании звеньев, замыкаю-

щих перемычки, будет подчиняться геометрической прогрессии. Численное значение знаменателя геометрической прогрессии q_{Γ} удобно взять равным 2.

Относительное значение приращения сопротивления на текущем участке ЭК в этом случае равно

$$\gamma_{R \text{ РАСЧ}} = \frac{r_p}{R} q_{\Gamma}^{N_{p_1}-1},$$

где N_{p_1} — общее число участков, из которых должен состоять ЭК. Значение N_p определяется из условия

$$2\gamma_{R \text{ ТЕХН}} = \frac{\frac{r_p}{R} q_{\Gamma}^{N_{p_1}-1}}{q_{\Gamma} - 1}. \quad (88)$$

Рекомендуемый порядок расчета: задаются значения h_b , h_l , h_{Π} , h_3 и h_3 с учетом вышеизложенных соображений; значение r_p определяется по (81) и проверяется по (84); рассчитывается число N_p по (85) или N_{p_1} по (88); по (86) и (87) определяются b_K и l_K , если найдено N_p и определено N , b_K и l_K находятся с учетом конкретной топологии.

1.7. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПОЛОГИЙ КОРРЕКТИРУЕМЫХ РЕЗИСТОРОВ

Разработанные методы расчета позволяют сравнивать разные типы топологий по таким характеристикам, как занимаемая площадь и относительная стабильность сопротивления КР после корректировки.

1.7.1. Сравнение КР по площади, занимаемой ЭК

Рассмотрим формулы, полученные для расчета длины l_K и ширины b_K ЭК. Согласно (11) и (15), площадь ЭК прямоугольной формы при продольном сплошном виде корректировки

$$S_{\Pi} = \left(1 + \frac{1}{\theta}\right)^2 k_{\Phi \text{ ЭК}} b_K^2.$$

Так как по формуле (14) значения θ должны находиться в пределах 0,2 — 1, то им соответствуют при θ_{\max} и θ_{\min}

$$S_{\Pi \min} = 4b_k^2 k_{\Phi \text{ ОПГ}}; \quad (89)$$

$$S_{\Pi \max} = 7,2b_k^2 k_{\Phi \text{ ОПГ}}. \quad (90)$$

Для этого же резистора, но с локальной выборкой площадь ЭК, согласно (50):

$$S_{Л} = \frac{k_{\Phi \text{ ОПТ}}}{f(k_{Л})} \left(\frac{k_{Л}}{k_{Л} - 1} \right)^2 b_K^2. \quad (91)$$

С учетом обеспечения технологичности примем $k_{Л \text{ ОПТ}} = 1,6$ (рис. 1.4). Тогда из (91) с учетом значения $f(k_{Л})$ по (46) найдем, что

$$S_{Л} = 10,8 b_K^2 k_{\Phi \text{ ОПТ}}.$$

Площадь ЭК трапециевидной формы $S_{ТР}$ (см. рис. 1.6) можно представить следующим образом:

$$S_{ТР} = b_T (2l_T + b_T \text{tg} \alpha). \quad (92)$$

Здесь предельные значения b_T для сравнения $S_{ТР}$ с площадью ЭК прямоугольной формы примем $b_{T \text{ max}} = 6b_P$; $b_{T \text{ min}} = 2b_P$. Площадь ЭК Т-образной формы на основании (70), (74) с учетом (69) можно представить в виде

$$S_T = b_K l_K = 0,5b(5,5 + k_{\Phi \text{ ОПТ}})(2b + a) \quad (93)$$

или, учитывая, что обычно $a \ll b$:

$$S_T = b^2 (k_{\Phi \text{ ОПТ}} + 5,5). \quad (94)$$

Полагая $5,5 = \Phi k_{\Phi \text{ ОПТ}}$, получаем

$$S_T = b^2 k_{\Phi \text{ ОПТ}} (1 + \Phi). \quad (95)$$

Площадь ЭК с шунтом на основании (76) и (77) определяется следующим образом:

$$S_{Ш} = b_k l_k = b^2 k_{\Phi \text{ ОПТ}}.$$

Нормируя значения площадей по $S_{Ш}$, имеем

$$\frac{S_{Л \text{ min}}}{S_{Ш}} = 4; \quad \frac{S_{Л \text{ max}}}{S_{Ш}} = 7,2; \quad \frac{S_{Л}}{S_{Ш}} = 10,8; \quad \frac{S_T}{S_{Ш}} = \Phi + 1.$$

Рассмотрим нормированные отношения площадей (рис.1.12). Наибольшей площадью у ЭК прямоугольной формы при локальной выборке. Площадь ЭК Т-образной формы и ЭК трапециевидной формы меньше площади ЭК прямоугольной формы, за исключением области со значениями $k_{\Phi \text{ ОПТ}} \leq 2$. Наименьшую площадь имеет ЭК с распределенным шунтом.

1.7.2. Сравнение КР по относительной стабильности сопротивления

Исходим из предпосылки, что стабильность обратно пропорциональна длине выборки. При этом полагаем, что значение b одинаково у всех ЭК после корректировки во всем диапазоне D .

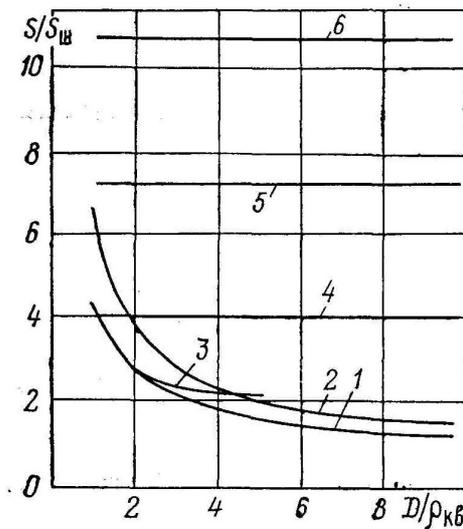


Рис. 1.12. Нормированные зависимости площадей ЭК от отношения диапазона коррективы к удельному сопротивлению резистивной пленки $\frac{D}{\rho_{кв}}$:

$$1 - \frac{S_{TP\max}}{S_{ш}} \text{ при } b=b_{\max} \text{ и } l_T=b_P; 2 - \frac{S_T}{S_{ш}}; 3 - \frac{S_{TP\min}}{S_{ш}} \text{ при } b_{\min};$$

$$4 - \frac{S_{П\min}}{S_{ш}} \text{ при } b_{\min}; 5 - \frac{S_{П\max}}{S_{ш}} \text{ при } b_{\max}; 6 - \frac{S_{л}}{S_{ш}}$$

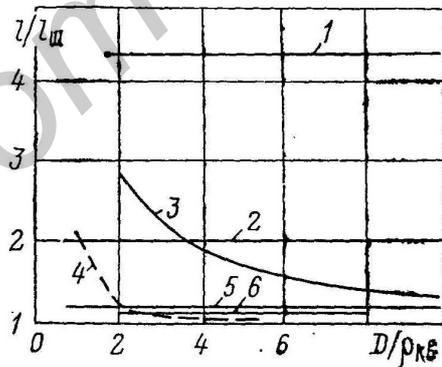


Рис. 1.13. Нормированные зависимости длины выборки ЭК

от отношения $\frac{D}{\rho_{кв}}$:

$$1 - \frac{l_{л}}{l_{ш}}; 2 - \frac{l_{П\max}}{l_{ш}} \text{ при } b_{\min}; 3 - \frac{l_T}{l_{ш}}; 4 - \frac{l_{TP\max}}{l_{ш}} \text{ при } b=b_{\min} \text{ и } l_T=b_P;$$

$$5 - \frac{l_{П\min}}{l_{ш}} \text{ при } b_{\max}; 6 - \frac{l_{TP\min}}{l_{ш}} \text{ при } b_{\max}$$

Для ЭК прямоугольной формы с продольным видом корректировки длина реза $l_{II} = bk_{\phi_{\text{ОПТ}}}(\theta + 1)$ или с учетом θ_{\min} и θ_{\max} $l_{II \min} = 1,2bk_{\phi_{\text{ОПТ}}}$; $l_{II \max} = 2bk_{\phi_{\text{ОПТ}}}$.

Для ЭК прямоугольной формы с локальной выборкой, согласно (47) и (40), длина реза $l_{II} = 3,6b_p k_{\phi_{\text{ОПТ}}}$. Для ЭК трапецевидной формы на основании рис. 1.6 можно записать, что длина реза $l'_{II} \cong 2l_{II} = 2[l_T + tg\alpha(b_T - b_p)]$ или с учетом (15), (14) и при $l_T = b_p l'_{II \min} = 2b_p(1 + tg\alpha)$; $l'_{II \max} = 2b_p(1 + 5tg\alpha)$.

Для ЭК Т-образной формы, согласно (69) и рис. 1.8, длина нарушенного слоя равна удвоенной длине реза:

$$l_T \cong 2(T + b) = b(3,5 + k_{\phi_{\text{ОПТ}}}). \quad (96)$$

Полагая $3,5 = \Phi_e k_{\phi_{\text{ОПТ}}}$, получаем

$$l_T = bk_{\phi_{\text{ОПТ}}}(1 + \Phi_e).$$

Для ЭК с шунтом, согласно (76), длина реза $l_{III} = l_k = bk_{\phi_{\text{ОПТ}}}$.

Нормируя значения длин по l_{III} , получаем:

$$\frac{l_{II \max}}{l_{III}} = 2; \quad \frac{l_{II \min}}{l_{III}} = 1,2; \quad \frac{l_{II}}{l_{III}} = 3,6; \quad \frac{l_T}{l_{III}} = (1 + \Phi_e).$$

Полученные нормированные отношения по длине выборки при корректировке показаны на рис. 1.13, из которого видно, что наибольшую относительную длину выборки имеет ЭК прямоугольной формы при локальном виде выборки. При продольном виде корректировки и ширине, равной b_{\min} он имеет в 2 раза меньшую длину выборки. Остальные ЭК при значениях $k_{\phi_{\text{ЭК}}} > 3$ имеют наименьшие и примерно одинаковые длины выборки, им и следует отдавать предпочтение при изготовлении КР, к стабильности параметров которых предъявляются повышенные требования.

Приведенные в подразделах 1.1—1.5 методы пригодны для расчета топологий КР, имеющих небольшие мощности рассеяния. Эффекты стягивания линий тока в таких КР невелики, и их влияние при выводе расчетных формул не учитывалось.

Вопросы расчета топологии КР с учетом влияния эффектов стягивания линий тока рассмотрены в подразделах 1.8 и 1.9.

1.8. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТА ИЗГИБА РЕЗИСТИВНОЙ ПОЛОСКИ

В резистивном элементе любой конфигурации, отличной от прямоугольной, как правило, имеют место искривление линий тока и их неравномерное распределение по площади. Плотность тока распределяется при этом по площади токопроводящего элемента неравномерно с образованием зон как с пониженной, так и повышенной плотностью тока.

Рассмотрим часто встречающуюся в топологиях ГИС конфигурацию резистивного элемента, имеющего участок излома или изгиба на угол 90° (рис. 1.14). Такие участки имеют резисторы меандров, Т-образной и других форм после корректировки. Перераспределение плотности тока происходит таким образом, что на внешний контур участка излома приходится наименьшая плотность тока j , а на внутренний контур — наибольшая (рис. 1.14, а). В ряде работ показано, что в точке внутреннего угла излома на 90° плотность тока j значительно выше. В результате в этом месте происходит локальный перегрев резистивной пленки, что при определенных условиях может вызвать нестабильность параметров резистора или выход его из строя.

С целью исключения локальных перегревов рекомендуются следующие варианты топологических решений:

- 1) шунтирование проводниковыми элементами участков излома;
- 2) применение топологии только прямоугольной (или полосковой) формы;
- 3) скругление внутреннего угла участка излома.

Однако шунтирование приводит к нестабильности параметров резисторов из-за переходных контактных сопротивлений и увеличению занимаемой резистором площади; второй вариант решения связан во многих случаях с применением для изготовления резисторов на одной подложке нескольких резистивных материалов с различными удельными сопротивлениями, что усложняет и удорожает производство. Поэтому наиболее целесообразно в ряде случаев применение третьего варианта, который мы и рассмотрим (рис. 1.14, б).

Плотность тока на границе участка внутреннего скругления зависит от соотношения радиусов закругления и определяется выражением

$$j_{r_1} = \frac{I}{tr_1 \ln r_2/r_1}, \quad (97)$$

где I — сила тока, протекающего по резистивной пленке; t — толщина пленки; r_1 и r_2 — внутренний и внешний радиусы закругления элементов резистивной пленки.

Плотность тока в прямолинейном участке резистивной пленки, т. е. до участка изгиба, определяется условием

$$j = I/tb \leq j_{\text{доп}}, \quad (98)$$

где b — ширина пленки. Сравнивая (97) и (98), находим, что плотность тока на участке закругления не будет превышать допустимую при выполнении условия

$$r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \geq b. \quad (99)$$

Откуда находим, что

$$r_2 \geq r_1 e^{b/r_1}. \quad (100)$$

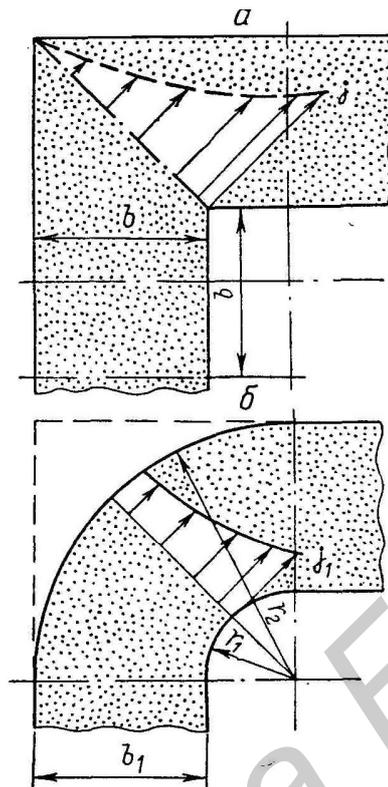


Рис. 1.14. Участок топологии резистивного элемента с углом излома 90° (а) и плавным изгибом 90° (б)

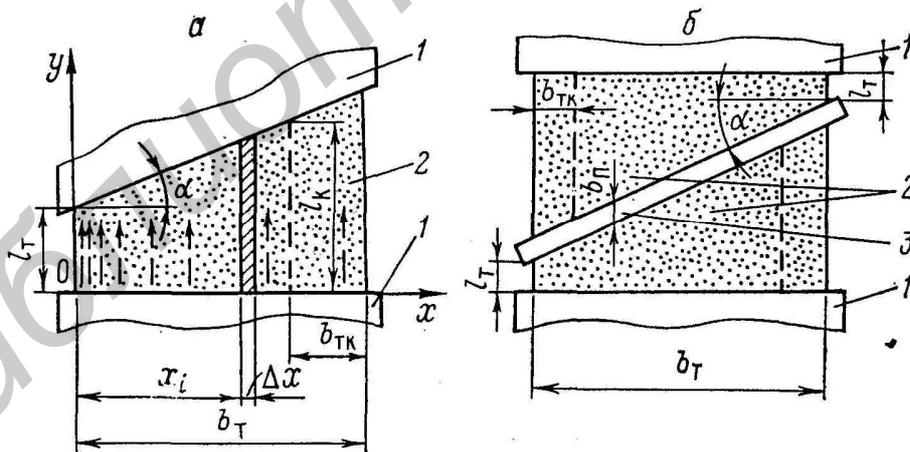


Рис. 1.15. КР с одним (а) и двумя (б) резистивными элементами трапециевидной формы:

- 1 – контактные площадки; 2 – резистивный элемент;
- 3 – перемычка

Требуемые соотношения параметров r_1 и r_2 определяются выражением (100). Величина внутреннего радиуса закругления r_1 , как правило, ограничивается площадью, занимаемой резистором на подложке. Если принять, что размеры резистора будут минимальными при наименьшем значении радиуса r_2 , то, взяв производную от (100) по r_1 , найдем, что r_2 будет минимальным при $r_1=b$. Приняв $r_1=b$ по (100), найдем $r_2 \geq eb \cong 2,7b$. Следовательно, при $r_1=b$ ширина участка изгиба должна быть не менее $b_1=r_2-r_1$.

Таким образом, для обеспечения нормального режима протекания тока на участке изгиба резистивной пленки, т. е. для исключения локальных перегревов при номинальной нагрузке, необходимо увеличивать ширину резистивной полоски на участке изгиба по сравнению с прямолинейными участками. Оптимальными при этом являются значения радиусов закругления $r_1 = b$ и $r_2 = 2,7b$.

1.9. УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ ТОПОЛОГИИ КОРРЕКТИРУЕМОГО РЕЗИСТОРА ТРАПЕЦИЕВИДНОЙ ФОРМЫ

Рассмотрим изображение КР трапециевидной формы, распределение плотности тока в котором показано условными линиями на рис.1.15, а. Разобьем резистивный элемент на большое число элементарных трапеций шириной $\Delta x \rightarrow 0$. Величина тока в каждой из них будет обратно пропорциональна длине трапеции. Поэтому наибольшая плотность тока приходится на кромку малого основания трапеции, наименьшая — на кромку большого основания. Используя известные из теории электрических цепей зависимости, можно получить выражение, определяющее величину плотности тока j_i в любом участке резистивного элемента в зависимости от текущего значения абсциссы x_i (см. рис. 1.15, а):

$$j = \frac{Itg\alpha}{t(l_T + x_i tg\alpha) \ln\left(1 + \frac{b_T tg\alpha}{l_T}\right)}, \quad (101)$$

где I — величина тока; t — толщина пленки.

Так как большая плотность тока соответствует меньшим значениям x_i , полагая $x_i = 0$, находим из (101) величину плотности тока j_0 на кромке малого основания трапеции:

$$j_0 = \frac{Itg\alpha}{tl_T \ln\left(1 + \frac{b_T tg\alpha}{l_T}\right)}. \quad (102)$$

Резистор будет работоспособен при условии $j_0 \leq j_{доп}$. На основании выражений (98) и (102) можно получить

$$b_T \geq \frac{l_T}{\operatorname{tg} \alpha} [\exp(b_0 \operatorname{tg} \alpha / l_T - 1)], \quad (103)$$

где b_0 — ширина резистора прямоугольной формы, определенная по (98).

Выражение (103) определяет ширину резистора трапецевидной формы, при которой обеспечивается нормальный режим его работы. Разделив обе части формулы (103) на b_0 , опустив неравенства, получим

$$\frac{b_T}{b_0} = \frac{e^\beta - 1}{\beta}, \quad (104)$$

где
$$\beta = \frac{b_0}{l_T} \operatorname{tg} \alpha. \quad (105)$$

Анализ зависимости $b_T / b_0 = f(\beta)$ показал, что отношение b_T / b_0 быстро возрастает с увеличением параметра β . Отсюда следует, что при больших углах наклона α ширина резисторов трапецевидной формы будет значительно превосходить ширину эквивалентного по электрическим параметрам резистора прямоугольной формы. Таким образом, для расчета топологии некорректируемого резистора трапецевидной формы, обеспечивающего заданную мощность рассеяния, достаточно использовать выражение (103). Но этого недостаточно для расчета корректируемых резисторов трапецевидной формы. Поэтому рассмотрим возможности использования полученных соотношений для расчета топологии корректируемых резисторов.

Если в исходном (до корректировки) состоянии КР трапецевидной формы имел ширину b_T , то в предельном случае перекрытия всего заданного диапазона корректировки D он будет иметь конечную ширину b_{TK} (рис. 1.15, а). В обоих случаях в КР трапецевидной формы имеет место эффект стягивания линий тока, который необходимо учитывать при расчете параметров b_T и b_{TK} . Для b_T это обеспечивается выполнением условия (103), для b_{TK} — аналогичным выражением, имеющим вид

$$b_{TK} = \frac{l_{TK}}{\operatorname{tg} \alpha} \left[\exp\left(\frac{b_0 \operatorname{tg} \alpha}{l_{TK}}\right) - 1 \right], \quad (106)$$

где l_{TK} определяется, как l_N , но при замене b_P на b_{TK} .

Помимо этого топология КР трапецевидной формы должна обеспечивать также заданный диапазон корректировки D , выражаемый на основании (56) как произведение $\rho_{KB \min} (k_{\phi \text{ЭК}}^k - k_{\phi \text{ЭК}}^0)$. Значение $k_{\phi \text{ЭК}}^0$ определяется по (57), а значение $k_{\phi \text{ЭК}}^k$ — аналогичным по форме выражением, имеющим вид

$$k_{\phi \text{ЭК}}^k = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\ln \left(1 + \frac{b_{TK}}{l_{TK}} \operatorname{tg} \alpha \right)}. \quad (107)$$

Положим, что

$$b_{TK} = cb_0, \quad (108)$$

где c — коэффициент пропорциональности. Тогда из (104) — (108) с учетом (57) можно получить следующие выражения (знак неравенства в (106) опускаем):

$$\beta = f(D) = \left(1 + \frac{l_T \rho_{KB \min}}{b_0 D} \right) \ln \left(\frac{Db_0}{\rho_{KB \min} l_T} + 1 \right); \quad (109)$$

$$c = \frac{e^\beta}{\beta} = \left\{ 1 - \left[\exp \frac{l_T \rho_{KB \min}}{Db_0} \ln \left(\frac{Db_0}{\rho_{KB \min} l_T} + 1 \right) \right]^{-1} \right\}. \quad (110)$$

Таким образом, получены формулы, позволяющие рассчитать топологию КР трапециевидной формы, обеспечивающую заданные мощность рассеяния и диапазон корректировки. Полученные выражения пригодны также для расчета размеров КР, состоящего из двух элементов трапециевидной формы (рис. 1.15, б).

Рекомендуемый порядок расчета топологии КР с ЭК трапециевидной формы: по (109) и (100) определяются расчетные параметры β и c ; рассчитываются ширина ЭК b_T по (104) и конечная ширина ЭК b_{TK} по (108); по (105) находится значение угла наклона перемычки α ; по (18) с учетом (3) и (57) определяются параметры основной части резистора.

1.10. ТОПОЛОГИЯ КОРРЕКТИРУЕМОГО РЕЗИСТОРА С УКОРОЧЕННЫМ ШУНТОМ

Рассмотрим топологию КР с шунтом (рис. 1.16, а), расширение диапазона корректировки и повышение стабильности которого достигают использованием укороченных шунта и контакта. Как видно из рисунка, отличие КР в том, что шунт распределен не вдоль всей длины ЭК, а занимает только ее часть, т. е. укорочен, аналогично выполнен и один из контактов. При такой конструкции резистора неравномерность распределения плотности тока в резистивной пленке снижается, так как устраняется поворот линий тока на угол 90° . Длина шунта рассчитывается таким образом, чтобы обеспечивалось расчетное значение заданного коэффициента формы ЭК, а ширина контакта принимается равной b_p .

Геометрические размеры топологии КР с укороченным шунтом определяются по методу расчета топологии ЭК прямоугольной формы (см. раздел 1). Поэтому рассмотрим только метод расчета длины шунта без вывода расчетных формул.

Определяется значение расчетного параметра t_{III} :

$$t_{III} = \frac{b - b_P}{b} = 1 - \frac{b_P}{b}.$$

По найденной величине t_{III} с помощью графиков (рис. 1.16, б) определяется значение t'_{III} с учетом выполнения условия $Q(t_{III}) = Q(t'_{III})$, для чего сначала находится значение $Q(t_{III})$ по величине t_{III} , а затем t'_{III} . Тогда длина шунта $l_{III}^P = t'_{III} b$.

Отметим, что данная топология КР была разработана специально для использования в крупносерийном производстве резисторов, изготавливаемых по толсто- пленочной технологии исходя в первую очередь из требований снижения площади, занимаемой резистором на подложке.

Пример. Пусть $b_P = 0,4$ мм, $b = 1,1$ мм. Тогда $t_{III} = 1 - \frac{0,4}{1,1} = 0,63$. По графику определяем $Q(t_{III}) = 0,4$. Приняв $Q'(t_{III}) = Q(t'_{III}) = 0,4$, по графику находим $t'_{III} = 0,78$. Определяем длину шунта: $l_{III}^P = t'_{III} b = 0,78 \cdot 1,1 = 0,86$ мм.

Порядок определения величины t'_{III} по расчетному значению t_{III} показан на рис. 1.16, б стрелками.

Таким образом, в настоящей главе рассмотрены методы расчета топологии КР с непрерывным изменением сопротивления для ЭК прямоугольной, трапециевидной и Т-образной форм, а также топологии с шунтом. С помощью этих методов можно провести полный расчет топологии КР по исходным электрическим и технологическим параметрам.

Существуют также методы оптимизации топологии КР. Для топологии КР с ЭК прямоугольной и трапециевидной форм с основной частью возможна оптимизация ЭК по минимуму занимаемой площади или по длине корректируемого реза. Оптимизация достигается выбором оптимального числа квадратов ЭК. Для КР с ЭК трапециевидной формы она обеспечивается путем выбора ширины ЭК, а также с помощью разработанных принципов конструирования, заключающихся в выборе числа трапециевидных подэлементов, проводниковых перемычек и их взаимного расположения.

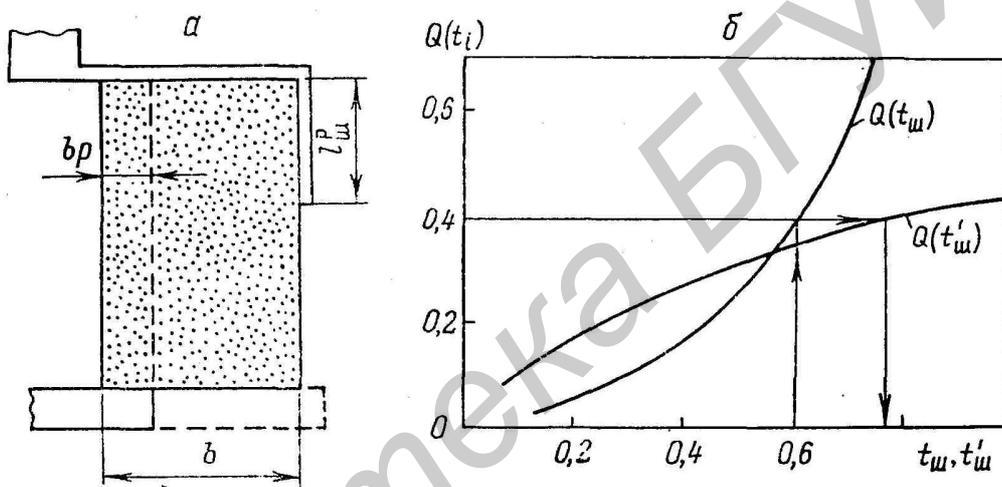


Рис. 1.16. Топология КР с укороченным шунтом (а) и графики для расчета длины шунта (б)

Тема 2

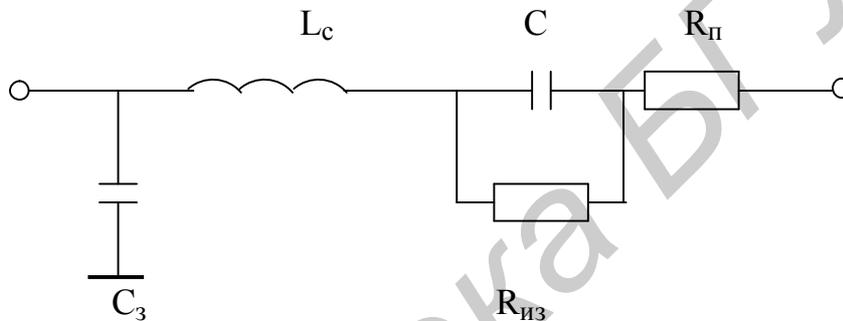
КОНДЕНСАТОРЫ

2.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ

К основным параметрам конденсаторов относятся номинальная ёмкость, рабочее напряжение, погрешность, температурный коэффициент ёмкости, добротность.

В качестве диэлектрика в конденсаторах используют воздух, слюду, керамику, стеклокерамику, эмаль, бумагу, оксидные плёнки (в электролитических конденсаторах) [1].

Рассмотрим модель конденсатора (см. рисунок).



Модель конденсатора постоянной ёмкости:

C – номинальная ёмкость, L – паразитная индуктивность,
 $R_{п}$ – сопротивление потерь, $R_{из}$ – сопротивление изоляции,
 C_3 – ёмкость между выводами конденсатора и корпусом

Сопротивление потерь обусловлено затратами электрической энергии на протекание явления поляризации диэлектрика в переменном электрическом поле. В качестве характеристики потерь в диэлектрике пользуются величиной $\operatorname{tg} \delta$:

$$\operatorname{tg} \delta = R_{п} \omega C, \quad (111)$$

где ω - круговая частота ($\omega = 2\pi f$).

Величина добротности конденсатора вычисляется по формуле

$$Q_c = 1 / \operatorname{tg} \delta. \quad (112)$$

Температурный коэффициент ёмкости конденсатора рассчитывается по формуле

$$\alpha_c = 1 / C_0 dC / dT, \quad (113)$$

где C_0 – величина ёмкости при номинальной температуре [4].

2.2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

Задача 1. Между обкладками плоского конденсатора находится лист гетинакса (без воздушных промежутков) толщиной $h = 1$ мм. К конденсатору приложено постоянное напряжение $U = 200$ В. Определить поверхностную плотность заряда на обкладках конденсатора σ_1 и на диэлектрике σ_d , если принять значение его относительной диэлектрической проницаемости (ε) равной шести.

Решение. Из-за поляризации диэлектрика при подключённом источнике постоянного напряжения на обкладках конденсатора удерживается дополнительный заряд. Поэтому $\sigma_1 = \sigma_d + \sigma_0$, где $\sigma_0 = \varepsilon_0 E$ – поверхностная плотность заряда на обкладках конденсатора при отсутствии диэлектрика. Отсюда получим:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \varepsilon_0 \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon U / h = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 200 / 10^{-3} \approx 10^{-5} \text{ Кл / м}^2; \\ \sigma_d &= \varepsilon_0 \varepsilon E - \varepsilon_0 E = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 200 / 10^{-3} \approx 8,85 \cdot 10^{-6} \text{ Кл / м}^2.\end{aligned}$$

Задача 2. В керамическом конденсаторе использован композиционный керамический материал, состоящий из двух компонентов со значениями диэлектрической проницаемости $\varepsilon_1 = 40$ и $\varepsilon_2 = 80$. Компоненты расположены в керамике хаотично. Известно, что $\alpha_{\varepsilon_1} = 2 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$ и $\alpha_{\varepsilon_2} = -1,5 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$. Рассчитать величину диэлектрической проницаемости композиционного диэлектрика конденсатора.

Решение. Воспользуемся для вычисления ε формулой Лихтенеккера:

$$\ln \varepsilon = k_1 \ln \varepsilon_1 + k_2 \ln \varepsilon_2, \quad (114)$$

где k_1 и k_2 – объёмные концентрации двух компонентов соответственно.

Величину температурного коэффициента можно определить, продифференцировав формулу Лихтенеккера. Получим

$$\alpha_\varepsilon = k_1 \alpha_{\varepsilon_1} + k_2 \alpha_{\varepsilon_2}.$$

Далее решаем систему уравнений:

$$\begin{aligned}k_1 \alpha_{\varepsilon_1} + k_2 \alpha_{\varepsilon_1} &= 0, \\ k_1 + k_2 &= 1\end{aligned}$$

и находим

$$k_1 = \alpha_{\varepsilon_2} / (\alpha_{\varepsilon_2} - \alpha_{\varepsilon_1}) = 0,0882; k_2 = 0,118; \varepsilon = 43,4.$$

Задача 3. Для используемого в качестве диэлектрика конденсатора фарфора величина $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ при комнатной температуре. При повышении температуры до 100°C его значение возрастает в два раза. Чему равен $\operatorname{tg} \delta$ этого диэлектрика при 200°C ? Во сколько раз увеличится активная мощность, выделяющаяся в диэлектрике при изменении температуры от 20 до 200°C ? Фактором изменения ϵ керамики с температурой пренебречь.

Решение. Потери в фарфоре обусловлены током сквозной проводимости. Поэтому $\operatorname{tg} \delta$ возрастает с температурой по экспоненциальному закону, а именно:

$$\operatorname{tg} \delta_T = \operatorname{tg} \delta_0 \exp [\alpha(T - T_0)], \quad (115)$$

где $\operatorname{tg} \delta_0$ – значение при 20°C , α – температурный коэффициент $\operatorname{tg} \delta$, который вычисляется из выражения

$$\alpha = (\ln \operatorname{tg} \delta_{100} - \ln \operatorname{tg} \delta_0) / (100 - 20) = 8,66 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}.$$

Тогда $\operatorname{tg} \delta_{200} = 2,38 \cdot 10^{-3}$.

Мощность, выделяемая в диэлектрике (P_a), возрастает с температурой пропорционально значению $\operatorname{tg} \delta$. Поэтому

$$P_{a200} / P_{a0} = \operatorname{tg} \delta_{200} / \operatorname{tg} \delta_0 = 2,38 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-4} = 4,76.$$

Задача 4. Как и почему изменится пробивное напряжение воздуха, используемого в качестве диэлектрика в переменном конденсаторе, если температуру повысить от 20 до 100°C ? Полагается, что конденсатор эксплуатируется при нормальном атмосферном давлении.

Решение. Известно, что пробивное напряжение воздуха вблизи нормального давления ($p_0 = 0,1 \text{ МПа}$) изменяется прямо пропорционально относительной плотности газа d , поскольку изменяется длина свободного пробега частиц, в частности электронов, участвующих при пробое в образовании стримера. Поэтому $U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0} d$, где $U_{\text{пр}0}$ – пробивное напряжение при нормальных условиях. Кроме того, из уравнения Менделеева-Клапейрона следует, что при постоянном давлении плотность газа изменяется обратно пропорционально температуре, а именно:

$$\begin{aligned} PV &= RT \, m/M, \\ m/V &= d = pM / (RT), \end{aligned} \quad (116)$$

где m – масса, M – молярная масса, R – универсальная газовая постоянная. Тогда изменение относительной плотности газа составит

$$d_1 / d_0 = T_0 / T_1 = 293 / 373 = 0,785,$$

т.е. пробивное напряжение воздушного промежутка в конденсаторе уменьшится в 1,27 раза.

2.3. УСЛОВИЯ ЗАДАЧ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 1. В плоском конденсаторе толщина керамического диэлектрика составляет 5 мм, его $\varepsilon = 7$, $\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ при комнатной температуре, а температурный коэффициент $\alpha_{\operatorname{tg} \delta} = 5 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$. Определить допустимое напряжение U между обкладками на рабочей частоте $f = 50$ МГц, если температура, до которой нагревается обкладка в электрическом поле, не превышает 100°C . При расчёте полагать, что коэффициент теплопередачи конденсаторной структуры во внешнюю среду $\vartheta = 30$ Вт/(м 2 ·К), а комнатная температура составляет 20°C .

Ответ: 2,033 кВ.

Задача 2. При изменении температуры от 60 до 127°C удельное сопротивление твёрдого диэлектрика конденсатора уменьшается от $\rho_1 = 10^{13}$ Ом·м до $\rho_2 = 10^{11}$ Ом·м. Определить температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ диэлектрика, полагая, что его значение неизменно в рассматриваемом диапазоне температур. С учётом этого же допущения найти удельное сопротивление диэлектрика при комнатной температуре ρ_0 .

Ответы: $\alpha_\rho = -6,87 \cdot 10^{-2}$ град $^{-1}$; $\rho_0 = 1,56 \cdot 10^{14}$ Ом·см.

Задача 3. Почему диэлектрическая проницаемость непропитанной конденсаторной бумаги ε_δ возрастает при увлажнении? Рассчитайте, как увеличится ε_δ при длительном пребывании в среде с относительной влажностью 98 %, если плотность бумаги $d_\delta = 1000$ кг/м 3 . При расчёте полагать, что ε целлюлозы $\varepsilon_{\text{ц}} = 6,5$, а её плотность $d_{\text{ц}} = 1500$ кг/м 3 , а ε воды $\varepsilon_{\text{в}} = 81$.

Ответ: в 4,6 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурский Л.И., Зеленин В.А., Жебин А.П., Вахрич Г.Л. Структура, топология и свойства плёночных резисторов. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 264 с.
2. Рычина Т.А., Зеленский А.В. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 351 с.
3. Баранов В.В. Устройства функциональной электроники для обработки сигналов и отображения информации. – Мн.: МРТИ, 1988. – 64 с.
4. Парфёнов О.Д. Технология микросхем. – М.: Высш. шк., 1986. – 320 с.
5. Ефимов В.И. и др. Материалы электронной техники. – СПб.: Лань, 1999. – 220 с.

Учебное издание

**Баранов Валентин Владимирович,
Гурский Леонид Ильич**

**ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТЫ
И УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

ПРАКТИКУМ

для студентов специальностей
39 02 02 «Проектирование и производство РЭС»,
39 02 03 «Медицинская электроника»
всех форм обучения

Редактор Н.А. Бебель
Корректор Е.Н. Батурчик
Компьютерная верстка М.В. Шишло

Подписано в печать 29.11.2004.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 2,91.
Уч.-изд. л. 2,5.	Тираж 100 экз.	Заказ 133.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6