

ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕМЕНТИ ОТ МУЛТИЧИПНИ МОДУЛИ

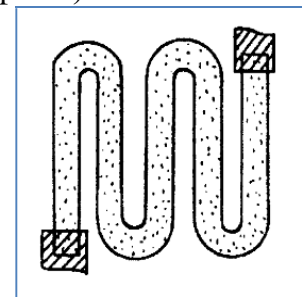
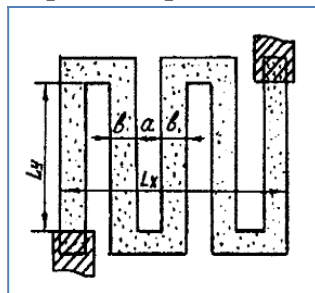
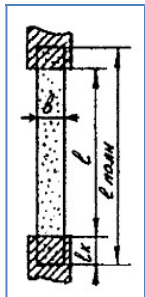
Проектиране на пасивни елементи

Проектиране на слойни резистори

Процесът на проектирането на слойни резистори е свързан с избор на подходяща форма и определяне на техните геометричните размери.

Изборът на форма на резистора се определя от неговото номинално съпротивление R , листовото съпротивление на резистивният материал $\rho_{кв}$, точността γ_R , площта на подложката, мощността, която може да разсее избраният резистивен материал, избраният технологичен процес и др.

Най – често използвани са резисторите с правоъгълна форма (фиг.1).



Фиг. 1. Резистор с правоъгълна форма

Фиг. 2. Резистор тип меандър

Фиг. 3 Змиевиден резистор

Това се дължи на тяхната проста конструкция, еднородното потенциалното поле, липсата на локални зони на претоварване, наличието на възможност за компенсиране на грешките, възникващи от съвместяването на маските и фотошаблоните. Резисторите тип меандър (фиг.2) се използват в случай, когато трябва да се получи по – голямо съпротивление без съществено да се увеличава заеманата площ. Това се обуславя от по – голямата линейна дължина на резистора, вписана в малка площ. Змиевидните резистори (фиг. 3.) превъзхождат тези от тип меандър по отношение на максималната разсейвана мощност.

Определянето на геометричните размери на резистора се извършва на базата на следните изходни данни:

1. $R(\Omega)$ - номинално съпротивление на резистора
2. $\rho_{кв}(\Omega/кв)$ - листово съпротивление
3. $\gamma_R(\%)$ - точност на резистора
4. $P(W)$ - максимална разсейвана мощност
5. $P_o(W/cm^2)$ - специфична разсейвана мощност за резистивният слой

Проектиране на правоъгълни резистори

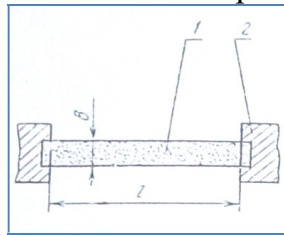
Един от основните параметри на слойните резистори е коефициента на формата - k_ϕ .

$$k_\phi = \frac{R}{\rho_{кв}}$$

При резистори с правоъгълна форма k_ϕ може да бъде изразен със следната зависимост:

$$k_{\phi} = \frac{l}{b}$$

където, както е показано на фиг. 4, величината l представлява дължината на резистора, а величината b съответно неговата широчина.



Фиг. 4. Геометрични размери на правоъгълен резистор

За резистори, при които се получава $k_{\phi} > 1$ водещия размер е ширината и процеса на проектиране започва с нейното определяне:

$$b \geq \max \{b_p, b_{\Delta}, b_{\text{мехн}}\}$$

величината b_p е минималната ширина на резистора, при която се осигурява разсейването на зададената мощност.

Тя се изчислява от израза:

$$b_p = \sqrt{\frac{\rho_{\text{кв}} P}{R P_o}}$$

b_{Δ} е минималната ширина на резистора, която осигурява зададената точност:

$$b_p = \frac{\Delta b + \frac{\Delta l}{k_{\phi}}}{\gamma_{R\Delta}}$$

където $\Delta b, \Delta l$ - осигуряват точността за възпроизвеждане на геометричните размери.

$$\gamma_{R\Delta} = \gamma_R - (\gamma_{\rho_{\text{кв}}} + \gamma_{Rt} + \gamma_{RCC} + \gamma_{RK})$$

$\gamma_{\rho_{\text{кв}}}$ - грешка на листовото съпротивление. Има различна стойност за различните материали

γ_{Rt} - грешка в съпротивлението, породена в резултат на въздействие на температурата.

γ_{RCT} - грешка в съпротивлението, която се дължи на стареенето на материала.

γ_{RK} - грешка, дължаща се на преходното контактно съпротивление.

$b_{\text{мехн}}$ - минималната ширина на резистора, която се определя от максималната разделителна способност на използвания метод.

За резистори, при които се получава $k_{\phi} < 1$ водещия размер е дължината на резистора.

Тогава процесът започва с нейното определяне. Определянето и се обуславя от следното условие:

$$l \geq \max \{l_p, l_{\Delta}, l_{\text{мехн}}\},$$

където величината l_p е минималната дължина на резистора, при която се разсейва зададената мощност:

$$l_p = \sqrt{\frac{R P}{\rho_{\text{кв}} P_o}}$$

от друга страна величината l_{Δ} е минималната дължина на резистора, с която се осигурява желаната точност:

$$l_{\Delta} = \frac{\Delta l + k_{\phi} \Delta b}{\gamma_{R\Delta}}$$

$l_{\text{техн}}$ - минималната дължина на резистора, която се определя от максималната разделителна способност на използвания метод.

Проектиране на резистори тип меандър

Процесът на проектирането на меандровидни резистори започва с определянето на оптималният брой Z – образни звена, необходими за реализирането на съответният резистор.

Това се извършва чрез формулата:

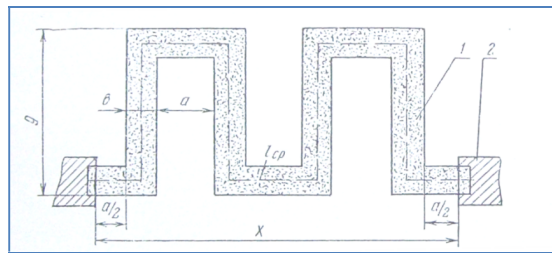
$$n = \sqrt{\frac{a^2}{4(a+b)^2} + \frac{l_{cp}}{a+b}} - \frac{a}{2(a+b)}$$

където a - разстоянието между две успоредни секции, както е показано на фиг. 5.

l_{cp} - дължината на средната линия на меандъра. Стойността на величината a зависи от използваната технология на нанасяне на резистивния слой.

Изразът за изчисляване на n може да бъде опростен за случаите, в които условието $a = b$ е изпълнено. Тогава:

$$n = \sqrt{\frac{K_{\phi}}{2}}$$



Фиг. 5. Геометрични размери на резистор тип меандър

Друг често срещан частен случай е $a = 2b$, тогава:

$$n = \sqrt{\frac{K_{\phi}}{3}}$$

Броят на Z – образни секции на меандъра може да се получи дробен. В този случай се налага закръгляване на n до най – близкото цяло число. Когато това се случи, съпротивлението на меандровидният резистор се увеличава или намалява. За извършване на необходимата компенсация се въвежда величината R_{Δ} . Тази величина оказва влияние на a и b или изменя крайният брой на Z – секциите:

$$\Delta l = \pm \frac{\Delta R}{\rho_{кв}} b$$

Размерът на контура се определя от зависимостта:

$$X = n(a + b)$$

$$Y = (l_{cp} - an) / n$$

като се вземат предвид последните два изрази, площта на контура съответства на зависимостта:

$$S = XY \quad (2.5.1)$$

Понякога меандър, чийто контур има квадратна форма се оказва неудобен за оформяне върху подложката. В такъв случай по формула (2.5.1), единият размер се

задава например Y' , тогава вторият размер се получава X' и броят на Z – образните звена на меандъра се преизчисляват с помощта на следните формули:

$$X' = \frac{S}{Y'}$$
$$n = \frac{X'}{a+b}$$

Ориентировъчното изчисление на меандъра е приемливо и приложимо в случаите, в които електрическото поле се разпределя равномерно по цялото му сечение.

Проектиране на дебелослойни резистори

Отчитайки особеностите на дебелослойната технология, поради високия толеранс на получените съпротивления $>20\%$, изчисление на дебелослойните резистори в зависимост от точността не се извършва. Във връзка с повишаване на надеждността и рандемана, се препоръчва на една подложка да се използват най-много до четири пасти (от едната ѝ страна), т.е. броя на отпечатванията да бъде минимален. Не се препоръчва изготвянето на резистори с коефициент на формата $k_f > 5-6$ и $k_f < 0,2$. Оптимален е вариантът, при който проектираните резистори имат коефициент на формата между 0,6 и 1,2, а за гранични стойности на k_f се приема 0,3 до 3.

Изходни данни за геометричното оразмеряване на дебелослойни резистори са: номинална стойност на съпротивлението R_i, Ω ; разсейваната от резистора мощност P, mW ; относителна грешка на съпротивлението до настройката $\gamma_R, \%$.

Проектиране на слойни кондензатори

Разглеждат се три основни вида кондензатори: кондензатори с трислойна структура, многослойни кондензатори и гребеновидни кондензатори.

В общия случай капацитетът на кондензатора се изчислява с помощта на израза:

$$C = 0,0885 \frac{\varepsilon S(N-1)}{d}$$

където ε - диелектрична проницаемост на материала

S - активната площ на припокриване на кондензатора

N - брой на слоевете

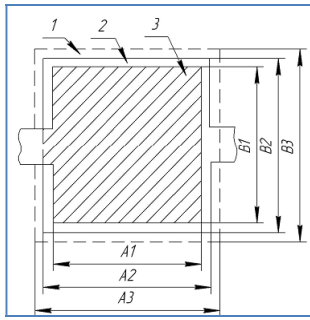
d - дебелина на диелектрика

За трислойна структура израз (2.28) може да се сведе до :

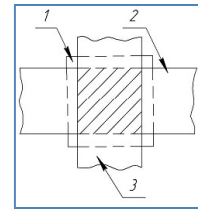
$$C = 0,0885 \frac{\varepsilon \cdot S}{d}$$

Проектирането на кондензатор започва с определянето на активната площ на електродите. На фиг.6 е показана разновидност на кондензатор с трислойна структура, използваща се, когато активната площ е по – голяма от $5mm^2$.

В случая, когато активната площ на кондензатора е в границите $1-5mm^2$ е удачно да се използва конструкцията показана на фиг.7.

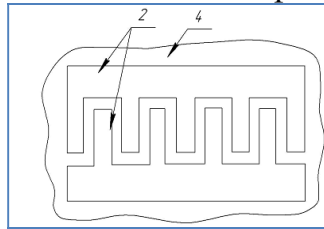


Фиг. 6. Кондензатор с трислойна структура



Фиг. 7 Кондензатор с активната площ 1–5мм²

Гребеновидни кондензатори е удобно да се използват в случаите, когато е необходимо да се получат капацитети в границите на единици или части от pF . Пример за конструкция от този тип е показана на фиг. 8.



Фиг. 8. Гребеновиден кондензатор

Проектирането на слойни кондензатори е свързано с определянето на техните геометрични размери S и d и капацитета C_o . Изходните данни за проектирането на тънкослойни кондензатори са следните: C - номинален капацитет (pF), относителна грешка γ_c (%), работно напрежение U_p (V), работна честота f (MHz).

Проектиране на слойни кондензатори с площ на припокриване по-голяма от 5мм².

При този тип кондензатори проектирането започва с определяне на дебелината на диелектрика. Това става чрез следната зависимост:

$$d \leq \frac{U_p k_3}{E_{пр}}$$

където $E_{пр}$ - пробивно напрежение за избрания диелектричен материал, k_3 - коефициент на запас, който се избира в границите $k_3 = 2 \div 4$ и стойността му зависи от експлоатационните условия на кондензаторите. Колкото са по-тежки експлоатационните условия, толкова по-голяма се избира стойността на k_3 .

Следващата стъпка е определянето на максималната допустима относителна грешка:

$$\gamma_{s_{дон}} = \gamma_c - \gamma_{Co} - \gamma_{Ct} - \gamma_{CCT},$$

където γ_{Co} - грешка, дължаща се на точността на възпроизвеждане на капацитета. Величината γ_{Ct} се нарича температурна капацитивна грешка. Тя се определя от следната зависимост:

$$\gamma_{Ct} = a_c (T - 20^\circ C),$$

където a_c - температурен коефициент на избрания диелектричен материал. T - максимална работна температура на кондензатора.

γ_{CCT} - капацитивна грешка, дължаща се на стареенето на кондензатора.

Проектирането продължава с определянето на $C'o$ и $C''o$:

$$C'_o = 0,0885 \frac{\varepsilon}{d}$$

$$C''_o = C \left(\frac{\gamma_{S_{доп}}}{\Delta A} \right)^2 \frac{k_\phi}{(1 + \kappa_\phi)^2}$$

където ΔA - абсолютна грешка при възпроизвеждане на размера на кондензатора. Коефициента k_ϕ - коефициент на формата на кондензатора. Той се изчислява чрез зависимостта:

$$k_\phi = \frac{A_1}{B_1}$$

Окончателно капацитетът C_o се избира в следните граници:

$$C'_o > C_o < C''_o$$

След избирането на C_o е необходимо преизчисляването на дебелината на кондензатора:

$$d = 0,0885 \frac{\varepsilon}{C_o}$$

Минималната дебелина на диелектрика се ограничава от електрическото поле, а максималната от възможностите на технологията. На базата на вече изчислените величини е необходимо да определим активната площ, покривана от електродите на кондензатора:

$$S = \frac{C}{C_o}$$

От тук определяме и геометричните размери на кондензатора, използвайки следните зависимости:

$$A_1 = \sqrt{Sk_\phi} = \frac{\Delta A}{\gamma_{S_{доп}}} (1 + \kappa_\phi)$$

$$B_1 = \frac{A_1}{\kappa_\phi} = \frac{\Delta A}{\gamma_{S_{доп}}} \frac{1 + \kappa_\phi}{\kappa_\phi}$$

$$A_2 = A_1 + 2(\Delta A + \eta)$$

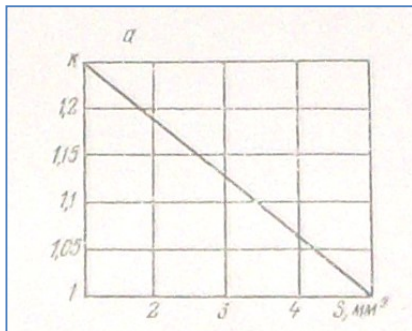
$$A_3 = A_2 + 2(\Delta A + \eta)$$

$$B_2 = B_1 + 2(\Delta A + \eta)$$

$$B_3 = B_2 + 2(\Delta A + \eta)$$

където η е грешката, дължаща се на съвместяването.

Технологични особености при проектирането на слойни кондензатори с размери на припокриване в границите $1 \div 5 \text{ мм}^2$



При проектирането на кондензатори от този тип капацитетът се определя от следната зависимост:

$$C = 0,0885 \frac{S}{kd}$$

Където k - е коригиращ коефициент, който се отчита от графиката показана на фиг. 9.

Фиг. 9. Графика, характеризираща изменението на коригиращия коефициент в зависимост от параметрите на слойния кондензатор

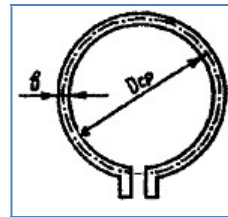
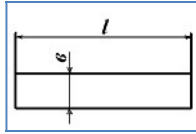
Проектиране на слойни бобини

Съществуват няколко конструктивни варианта за изпълнение на слойни бобини. Електрическите параметри се определят до голяма степен от избраната форма. Пример за слойна бобина с линейна форма е показана на фиг.10.

В този случай индуктивността се определя от формулата:

$$L = 0,002l \left(\ln 2 \frac{l}{b} - 2,451 \right)$$

където съответно b е ширината на слойната индуктивност, а l е нейната дължина. Индуктивност с кръгъл контур е показана на фиг.11.



Фиг.10 Слойна бобина с линейна форма

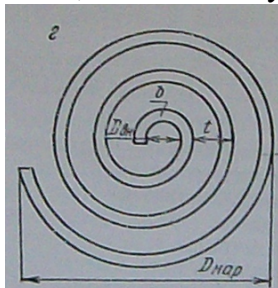
Фиг.11. Слойна бобина с кръгъл контур

В този случай за определяне индуктивността използваме зависимостта:

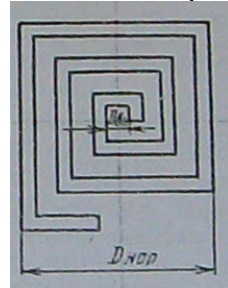
$$L = 2\pi \cdot 10^{-3} D_{CP} \left[\ln \left(\frac{2\pi D_{CP}}{b+h} \right) - 2,45 \right],$$

където D_{CP} е средния диаметър на бобината, b ширина на проводящия слой, а h дебелината на използвания слой.

В мултичипните модули приложение имат спираловидните кръгли или квадратни индуктивности. Такива са показани съответно на фиг.12. и на фиг.13. Проектирането на индуктивности от този вид се свежда до определяне на вътрешния диаметър $D_{Вн}$ и външния диаметър $D_{Нар}$ на спиралата, броя на навивките N , ширина на проводящия слой b , стъпката на спиралата t и дебелината на проводящия слой. Ако е необходимо да се осигури по – голям качествен фактор Q на елемента, то подходяща форма е да се избере кръгла спирала. Ако има изискване заетата площ да бъде минимална, то в този случай правоъгълната спирала е по – добро решение.



Фиг. 12. Спираловидна кръгла индуктивност



Фиг. 13. Спираловидна квадратна индуктивност

След като сме избрали форма е необходимо да се определи $D_{Вн}$. Този диаметър зависи от размера на вътрешните контактни площадки и по принцип се избира 0,5 мм. Външният диаметър $D_{Нар}$ се определя от следната зависимост:

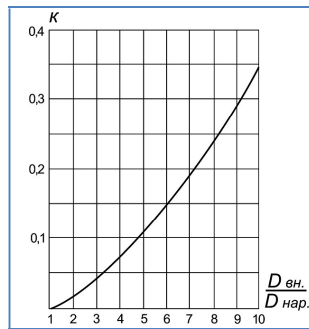
$$\left(\frac{D_{ВН}}{D_{НАР}} \right)_{opt} = 0,4 \text{ - за кръгли спирали}$$

$$\left(\frac{D_{ВН}}{D_{НАР}} \right)_{opt} = 0,362 \text{ - за квадратни спирали}$$

След като величините $D_{Вн}$ и $D_{Нар}$ са известни от графиката, показана на фиг.14. може да се определи стойността на k .

Възможно е да определим стъпката на спиралата, използвайки зависимостта:

$$t = k \sqrt{\frac{D_{вн}^3}{L}}$$



Фиг. 14. Зависимост на коефициента k от отношението $D_{вн}/D_{нар}$
След като имаме t е възможно да се определи броя на навивките N :

$$N = \frac{C}{t} = \frac{D_{нар} - D_{вн}}{2t}$$

Дебелината на проводящия слой се определя от формулата:

$$h = (2 \div 4)y,$$

където y е дълбочината на проникване на електромагнитните вълни в слойния материал:

$$y = k_1 \sqrt{\lambda},$$

където k_1 - коефициент, чиято стойност се определя от избрания материал. Ширината на проводящия слой b_o , при който може да се обезпечи необходимият качествен фактор Q без да се отчита скинефекта може да се определи с помощта на зависимостта:

$$b_o = \frac{\rho t \left(\frac{D_{нар}^2}{D_{вн}^2} - 1 \right) 10^4 Q}{16 f D_{вн} k^2 h},$$

където ρ е специфично съпротивление на материала, $\Omega/\text{см}$; f - работна честота, Mhz . С отчитане на скинефекта е необходимо ширината на проводящия слой да бъде коригирана, използвайки следната зависимост:

$$b = (1,5 \div 2)b_o$$

ЦЕЛ, ЗАДАЧИ И ОПИСАНИЕ НА УПРАЖНЕНИЕТО

Целта на това упражнение е да се придобият и задълбочат практическите навици по проектиране, разпознаване и изследване на отделни елементи и схеми в хибридните микромодули

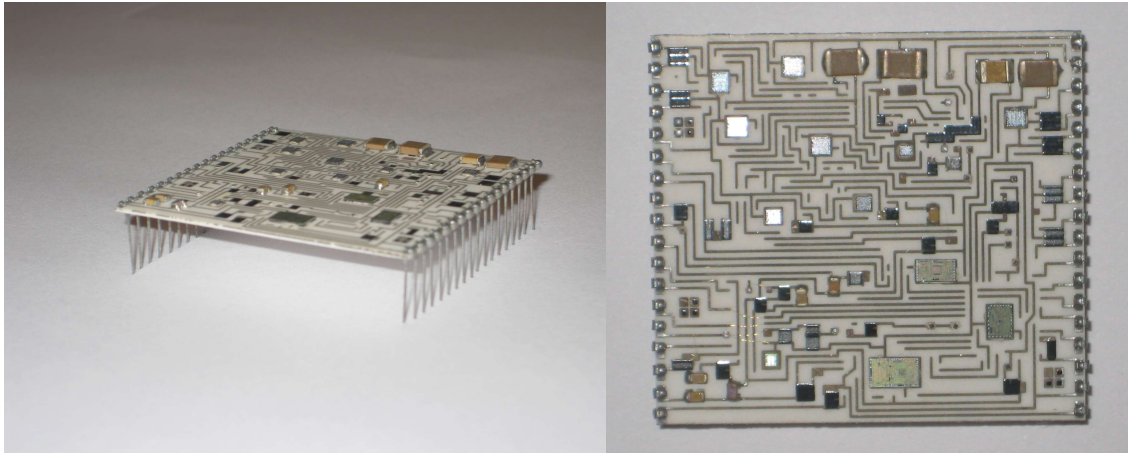
1. Задачи за изпълнение

1. Разгледайте представения Ви образец на мултичипен модул
 - Определете технологията на изготвяне
 - Определете вида на носителя (подложката)
 - Избройте контактните места
 - Избройте асемблираните голи чипове
 - Посочете транзисторите в модула
 - Избройте резисторите в представения образец
 - Измерете съпротивлението на посочени резистори и определете R_S и R_R

2. Представете основните прилики и разлики между хибридни интегрални схеми и мултичипни модули
3. Разгледайте образци на дебелослойна и тънкослойна технология. Посочете кои са видимите характеристики на тези технологии
4. По зададени от ръководителя на упражнението параметри на конкретни резистори и кондензатори извършете топологичното им проектиране при дебелослойна и тънкослойна технологии

Пояснителни бележки

За задача 1 използвайте образца, показан на фигурата.



Хибриден модул с висока степен на интеграции

При изпълнението на задача 4 следвайте представените алгоритми:

Алгоритъм за проектиране на тънкослойни резистори

1. Избира се резистивен слой. Основните параметри, които оказват влияние при избора са α_R , γ_R , γ_{RCT} и стойностите на ρ , d , P_O . При проектиране на група от резистори е подходящо да се извърши предварително изчисление за $\rho_{кв}$:

$$\rho_{кв} = \sqrt{\frac{\sum_1^n R_{Hi}}{\sum_1^n 1/R_{Hi}}}$$

където n е броят на резисторите, R_{Hi} е номиналното съпротивление на i -тия резистор.

Ако отношението: $\frac{R_{max}}{R_{min}} \geq 200$, то в този случай се препоръчва да се използват

два резистивни слоя.

2. Извършва се проверка дали избраният материал обезпечава изискванията по отношение на точността. За тази цел се определя:

$$\gamma_{R\Delta} = \gamma_R - (\gamma_{\rho_{кв}} + \gamma_{Rt} + \gamma_{RCT} + \gamma_{Rk})$$

ако $\gamma_{R\Delta}$ се получи отрицателно, то резистора не може да бъде реализиран с избрания материал. В този случай е необходимо да се избере друг материал с други стойности на $\gamma_{\rho_{кв}}$, γ_{RCT} , γ_{Rt} .

3. Определя се коефициента на формата на резистора K_ϕ . Ако $1 \leq K_\phi \leq 10$ се препоръчва изработването на резистор с правоъгълна форма. В случай, че

$K_\phi > 10$ е необходимо да се изработи резистор със сложна форма. Ако е необходимо да се изработи микромодул, съдържащ комбинация от нискоомни и високоомни резистори, то в този случай се препоръчва да се използват два материала.

4. По – нататъшното оразмеряване се извършва в зависимост от избраната форма на резистора и разгледаната методология.

Алгоритъм за проектиране на дебелослойни резистори

1. Всички резистори се разполагат в ред на нарастване на номиналните им съпротивления. Намира се 80% от стойността на съпротивлението на всеки резистор. С тези нови стойности продължава по-нататъшното оразмеряване на резисторите. Тази процедура е необходима за да се гарантира, че проектираните резистори ще имат геометрични размери, обуславящи стойност на съпротивлението по-малка от зададената номинална стойност. Това ще даде възможност за настройка на получените резистори с цел постигане на необходимата точност на съпротивлението.
2. Следва разбиване реда от стойности на групи, така че $R_{\max}/R_{\min} \leq 5-6$ за всяка група.
3. Определя се оптималната стойност на листовото съпротивление $R_{S_{opt}}$ за всяка група резистори:

$$R_{S_{opt}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}}$$

където n - брой на резисторите в групата.

4. По така получените стойности на $R_{S_{opt}}$ се избира резистивна паста с R_s максимално близко до $R_{S_{opt}}$.
5. Определя се коефициента на формата на дадения резистор.

$$k_f = \frac{R}{R_{S_{opt}}}$$

6. Пресмята се широчината (при $K_f \geq 1$) или дължината (при $K_f < 1$) на съответния резистор.

$$\text{За } k_f \geq 1 \quad b \geq \max \{b_p, b_{\text{тех}}\},$$

$$\text{За } k_f < 1 \quad l \geq \max \{l_p, l_{\text{тех}}\},$$

където b_p и l_p са съответно минималната ширина и дължина на проектирания резистор осигуряваща разсейването на зададената мощност P .

$$\text{За } k_f \geq 1 \quad b_p \geq \sqrt{\frac{k_p \cdot P \cdot R_s}{P_0 \cdot R}}$$

$$\text{За } k_f < 1 \quad l_p \geq \sqrt{\frac{k_p \cdot P \cdot R}{P_0 \cdot R_s}}$$

където k_p - коефициент на запас по мощност, отчитащ настройката на резистора

$$k_p = 1 + \frac{\gamma_R}{50}$$

7. Определя се съответната дължина или ширина.

За $k_f \geq 1$

$$l = b \cdot k_f$$

За $k_f < 1$

$$b = l / k_f$$

Определянето на пълната дължина става с отчитането на застъпването между контактните площадки и резистивния слой.

Алгоритъм за проектиране на слойни кондензатори

1. Избира се диелектричен материал с определени стойности на ε , E_{PP} , $tg(\delta)$ и K_{CT} .

2. Определя се минимална дебелина на диелектрика:

$$d_{\min} \geq \frac{\eta U_p}{E_{PP}}$$

3. Определя се специфичния капацитет на кондензатора чрез следната зависимост:

$$C_{OU} = 0,0885 \frac{\varepsilon}{d}$$

4. Оценява се относителната капацитивна температурна грешка:

$$\gamma_{C_i} = \alpha_C (T - 20^\circ C)$$

α_C - температурен коефициент на капацитета на диелектричния материал $1/^\circ C$;
 T - максимална работна температура на кондензатора.

$$\gamma_{S_{доп}} = \gamma_C - \gamma_{C_o} - \gamma_{C_i} - \gamma_{C_{CT}}$$

Ако $\gamma_{S_{доп}} \leq 0$, то изготвянето на кондензатора е невъзможно. В този случай избираме друг диелектрик с по-малко $\gamma_{C_{CT}}$.

5. Изчислява се специфичните капацитети C_o' и C_o'' .

6. Избира се минималният специфичен капацитет:

$$C_o \leq \min\{C_o', C_o''\}$$

който осигурява U_p и максималната допустима грешка.

7. В зависимост от зададените стойности на C и C_o се избира подходящ K_ϕ .

8. На базата на изборния K_ϕ се определя площта на припокриване на кондензатора S . Ако стойността на $S < 1 \text{ мм}^2$, се избира диелектрик с по-малко ε или по-голямо d .

9. Определят се размерите на електродите и диелектрика на кондензатора. За определената форма се избира K_ϕ .

10. Процеса на изчисляване продължава в зависимост от избраната форма на кондензатора.