5. Mikrovlnné součástky se soustředěnými parametry

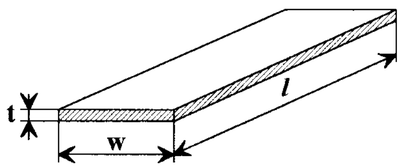
Podmínka: rozměry součástky $< 0,1\lambda_g$.

Výhody:
- větší širokopásmovost obvodů ve srovnání se součáskami s rozloženými parametry
- malé rozměry obvodů, vysoká integrace

Nevýhody:
- nízké Q vzhledem ke ztrátám
- kmitočtové omezení shora

5.1. Induktory

a) **Plochý pásek ve volném prostoru**



Obr. 5.1.1.

Pro výpočet indukčnosti bylo publikováno více vztahů.

Terman udává, [68]:

$$L = 0,2.l.\left[\ln\left(\frac{2l}{w+t}\right) + 0,5 + 0,2235\left(\frac{w+t}{l}\right)\right] \quad \text{[nH; mm]} \qquad (5.1.1)$$

Podle [9] konstanta 0,2235 mění svoji velikost od 0,22313 pro t=0 do 0,22352 pro t=w.

Svačina uvádí, [7]:

$$L = 0,2.l.\left[\ln\left(\frac{2l}{w+t}\right) + \frac{w+t}{3l} + 0,50049\right] \quad \text{[nH; mm]} \qquad (5.1.2)$$

Vlivem pokovení spodní strany substrátu ve vzdálenosti h hodnota indukčnosti klesá. Chaddock, [70] viz [4], uvádí korekční faktor postihující tento vliv, kterým je nutno hodnotu indukčnosti pro volný prostor vynásobit.

$$Kg = 0,57 - 0,145\ln(w/h) \qquad (5.1.3)$$

Parazitní odpor induktoru lze určit podle [4]:

$$R = \frac{K_c.R_s.l}{2(w+t)} \qquad (5.1.4)$$

K_C je korekční faktor pro postižení vlivu zvýšené proudové hustoty v rozích pásku určený vztahem:

$$K_C = 1,4 + 0,217.\ln\left(\frac{w}{5t}\right) \qquad (5.1.5)$$

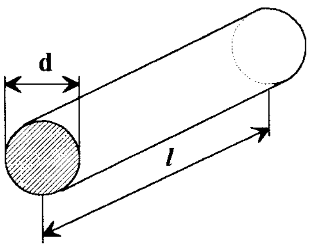
Jiný výraz pro tento faktor uvádí Wadel v [9]:

$$K_C = 1,048312 + 0,21768001.\ln\left(\frac{w}{t}\right) + 0,77176189.e^{-w/t}, \qquad (5.1.6)$$

který vyhovuje pro $1 \le w/t \le 100$.

Použití pro $L \le 2$ nH. $Q \approx 100$.

b) **Vodič kruhového průřezu ve volném prostoru**



Obr. 5.1.2.

Pro výpočet indukčnosti ve volném prostoru uvádí Wadel v [9] s odvoláním na [71]:

$$L = 0,2.l.\left[\ln\left(\frac{4.l}{d}\right) - 1 + \frac{d}{2.l} + \frac{\mu_r.T(x)}{4}\right] \qquad [\text{nH; mm}] \qquad (5.1.7)$$

kde $T(x)$ postihuje vliv skinefektu.

$$T(x) = \sqrt{\frac{0,873011+0.00186128.x}{1-0,278381.x+0,127964.x^2}} \qquad (5.1.8)$$

a

$$x = 0,1.\pi.d.\sqrt{\frac{2.\mu.f}{\sigma}} \qquad [\text{mm, Hz}] \qquad (5.1.9)$$

Vliv přítomnosti zemní plochy ve vzdálenosti h pod vodičem postihuje Terman, [68], vztahem:

$$L = 0,2.l.\left\{\ln\left(\frac{4h}{d}\right) + \ln\left[\frac{l+\sqrt{l^2+d^2/4}}{l+\sqrt{l^2+4h^2}}\right] + \sqrt{1+\frac{4h^2}{l^2}} - \sqrt{1+\frac{d^2}{4l^2}} - 2\frac{h}{l} + \frac{d}{2l}\right\} \quad [\text{nH/mm}] \qquad (5.1.10)$$

Pro osamocený vodič pak uvádí:

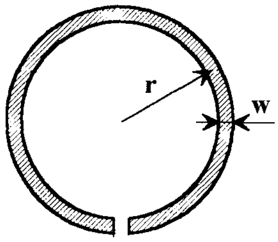
$$L = 0.2.l.\left[\ln\left(\frac{4l}{d}\right) - 1\right] \qquad [\text{nH; mm}] \qquad (5.1.11)$$

Parazitní odpor vodiče:

$$R = R_S . \frac{l}{\pi d} \tag{5.1.12}$$

Pro $L \leq 2 \div 3$ nH a $l/2r \leq 10$ je $Q \approx 100$.

c) **Plochá smyčka**



Obr. 5.1.3.

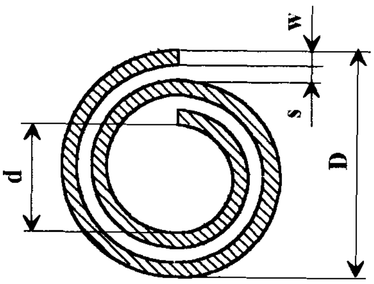
Vztah pro výpočet indukčnosti pro $l >> 2(w + t)$ lze nalézt v [72]:

$$L = 0,2.l.\left[\ln\left(\frac{l}{w+t}\right) - 1,76\right] \qquad \text{[nH; mm]} \tag{5.1.13}$$

kde $l = 2\pi r$.

$$R \approx R_S . \frac{\pi a}{w+t} \tag{5.1.14}$$

d) **Kruhová spirála**



Obr. 5.1.4.

Existuje řada publikovaných vztahů pro výpočet indukčnosti. Např. [68], [71], [73], [4] uvádějí vztah, který po přepočtu z tisícin palce (mils) na milimetry má podobu:

$$L = 0,3937\pi n^2 a.\left[\ln\frac{8a}{c} + \frac{1}{24}\left(\frac{c}{a}\right)^2.\left(\ln\frac{8a}{c} + 3,583\right) - \frac{1}{2}\right] \quad \text{[nH; mm]} \tag{5.1.15}$$

kde

$$a = \frac{D+d}{4} \quad \text{tj. střední poloměr spirály} \tag{5.1.16}$$

$$c = \frac{D-d}{2} \tag{5.1.17}$$

Tento vztah zjednodušil Wheeler [74] a získal vztah, který se liší o několik procent od (5.1.15):

$$L = 39,37.\frac{n^2.a^2}{8a+11c} \qquad \text{[nH; mm]} \qquad (5.1.18)$$

Vztah je platný pro $n>1$, $D>1,2d$, $t>3\delta$.
Burkett, [75], ho upravil do podoby:

$$L = 39,37.\frac{0,8.n^2a^2}{6a+10c} \qquad \text{[nH; mm]}, \qquad (5.1.19a)$$

která lépe vyhovuje pro planární induktory na substrátu s pokovenou zemní plochou. Další úpravu (5.1.19a) udělal Svačina [7]:

$$L = 5.\frac{(D+d)^2.n^2}{15D-7d} \qquad \text{[nH; mm]} \qquad (5.1.19b)$$

kde $D = d + 2n(w+s) + w - s$.

Remke a Burdick [76] uvádějí pro cívku bez pokovené spodní plochy substrátu, [9]:

$$L = 2.\Sigma_{k=1}^{n-1}\Sigma_{j=k+1}^{n}\mu\sqrt{at}.\left[\left(\frac{2}{k_1}-1\right)K(k_1)-\frac{2}{k_1}E(k_1)\right]+$$

$$+\Sigma_{k=1}^{n}\mu(2c-w_1)\left[\left(1-\frac{k_2^2}{2}\right)K(k_2)-E(k_2)\right] \qquad (5.1.20)$$

kde

$$k_1 = \sqrt{\frac{4at}{(a+t)^2}}, \quad k_2 = \sqrt{\frac{4c(c-w_1)}{(2c-w_1)^2}}, \qquad (5.1.21)$$

a a c jsou určeny vztahy (5.1.16) a (5.1.17), t je tlouštka pokovení, n je počet závitů cívky a $w_1 = w/2$.
$K(k)$ a $E(k)$ jsou úplné eliptické integrály prvního a druhého druhu, pro které Miller udává rekurzivní rovnice, [77]. Platí jak již bylo dříve uvedeno $K'(k) = K(k')$ a $k' = \sqrt{1-k^2}$ a:

$$K(k) = \frac{\pi}{2.a_N} \qquad (5.1.22)$$

kde

$$a_N = \frac{a_{N-1}+b_{N-1}}{2} \qquad (5.1.23)$$

$$b_N = \sqrt{a_{n-1}.b_{N-1}} \qquad (5.1.24)$$

$$c_N = \frac{a_{N-1}-b_{N-1}}{2} \qquad (5.1.25)$$

a

$$a_0 = 1 \qquad (5.1.26)$$

$$b_0 = \sqrt{1-k^2} \qquad (5.1.27)$$

$$c_0 = k \qquad (5.1.28)$$

Iterace se začne s počátečními hodnotami a_0, b_0 a c_0 a iteruje se dokud se nedosáhne $c_N = 0$ s požadovanou přesností.

Pro integrál druhého druhu pak platí: $E'(k) = E\left(k'\right)$ a:

$$E(k) = F(k).\left(1 - 0,5.\,\Sigma_{n=0}^{N} 2^N c_n^2\right) \tag{5.1.29}$$

kde

$$F(k) = \frac{\pi}{2a_N}, \tag{5.1.30}$$

a pro a_N, b_N , c_N , a_0, b_0, c_0 platí vztahy (5.1.23) až (5.1.28). Iterace se opět začne s počátečními hodnotami a iteruje se pokud se c_N nezmenší pod požadovanou hodnotu.

Pro cívku na substrátu se spodní pokovenou plochou pak Remke a Burdick uvádějí vztah:

$$L = 2.\,\Sigma_{k=1}^{n-1} \Sigma_{j=k+1}^{n} \mu\sqrt{ab}.\left[\left(\frac{2}{k_1} - 1\right)K\left(k_1\right) - \frac{2}{k_1}.E\left(k_1\right)\right] +$$

$$+\Sigma_{k=1}^{n} \mu\left(2c - w_1\right).\left[\left(1 - \frac{k_2^2}{2}\right).K\left(k_2\right) - E\left(k_2\right)\right] -$$

$$-\Sigma_{i=1}^{n} \Sigma_{j=1}^{n} \mu\sqrt{a_R.b_R}.\left[\left(\frac{2}{k_3} - 1\right)K\left(k_3\right) - \frac{2}{k_3}.E\left(k_3\right)\right] \tag{5.1.31}$$

kde

$$a_R = r_i + (i - 0,5).(w + s) \tag{5.1.32}$$

$$b_R = r_i + (j - 0,5).(w + s) \tag{5.1.33}$$

$$k_3 = \sqrt{\frac{4a_R.b_R}{(2h)^2 + (a_R + b_R)^2}} \tag{5.1.34}$$

a h je tloušťka substrátu a n je počet závitů cívky.
Vztahy platí pro kmitočty podstatně menší než je rezonance cívky.

Ztrátový odpor lze určit podle:

$$R = K_C.R_S.\frac{2\pi r_{st5}.n}{2(w+t)} = K_C.R_S.\frac{\pi n(D+d)}{4(w+t)} \tag{5.1.35}$$

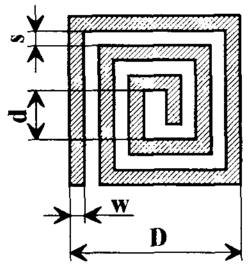
Pro činitel jakosti Q_0 platí:

$$Q_0 = \frac{\omega L}{K_c.R} = \frac{20\omega(w+t)}{K_c.\pi R_s}.\frac{n(D+d)}{15D-7d} \tag{5.1.36}$$

K_C postihuje vliv povrchového jevu a empiricky je cca roven 1,5 [9].

Maximální hodnota Q_0 nastává při $D = 5d$.

e) **Čtvercová spirála**



Obr. 5.1.5.

Pro výpočet indukčnosti lze nalézt řadu vztahů. Např. Young a Sobol [72] dle [58] uvádějí:

$$L = 2{,}41.\sqrt[3]{n^5}.a.\ln\left(\frac{8a}{c}\right) \qquad \text{[nH; mm]} \qquad (5.1.37)$$

kde

$$a = \frac{D+d}{4},\ c = \frac{D-d}{2} \qquad (5.1.38)$$

a n je počet závitů daný vztahem:

$$n = \frac{D}{2}.\frac{1}{w+s} \qquad (5.1.39)$$

Pro $d \to 0$ a $w = s$ lze (5.1.37) upravit na, [78]:

$$L = 0{,}85.\sqrt{S}.n^{5/3} \qquad \text{[nH; mm]} \qquad (5.1.40)$$

kde $S = D^2$ je plocha spirály.

Svačina v [7] uvádí vztah:

$$L = 6.\frac{(D+d)^2.n^2}{15D-7d} \qquad \text{[nH; mm]} \qquad (5.1.41)$$

kde $D = d + 2n(w+s) + w - s$

Maximální činitel jakosti Q_0 nastává při $D = 5d$.

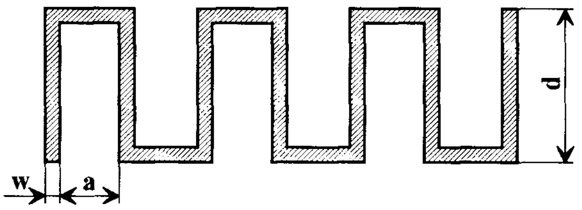
Další vyjádření indukčnosti n-závitové čtvercové spirály lze nalézt v [9] čerpajícím z [79] a [80].

Pro jednozávitovou čtvercovou cívku uvádí Wadel [9] vztah:

$$L = 1{,}84.D.\left\{\log\left[\frac{2D^2}{\left(D+\sqrt{2}\,D\right).(w+t)}\right]\right\} + 0{,}4\left[2\sqrt{2}\,D - D + 0{,}447(w+t)\right] \qquad \text{[nH; mm]}$$

(5.1.42)

f) **Meandrový induktor**



Obr. 5.1.6.

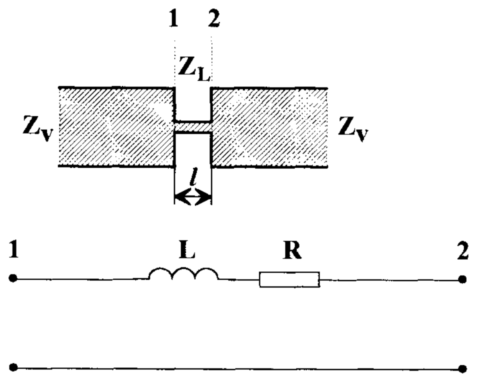
Pro výpočet indukčnosti uvádí Svačina [7]:

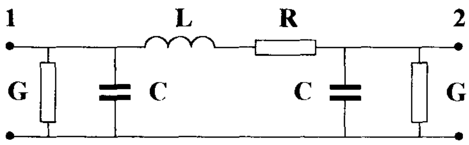
$$L = 0,1.d.\left[4.n.\ln\frac{2(a+w)}{w} - K_n\right] \qquad \text{[nH; mm]} \qquad (5.1.43)$$

kde n je počet úseků délky d. Pro konstantu K_n pak platí:

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_n	2,76	3,92	6,22	7,60	9,7	10,92	13,38	14,92	16,86

g) **Sériový induktor z krátkého úseku vedení**





Obr. 5.1.7.

Předpoklad: $Z_L >> Z_V$, $l << \lambda_g$. Pro indukčnost vzhledem k (2.5.1) platí:

$$L = \frac{Z_L.l}{v_f} = \frac{Z_L.l.\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{c} \qquad (5.1.44)$$

Ztrátový odpor je vzhledem k (2.5.20), (2.5.22) a (2.5.23) určen vztahem:

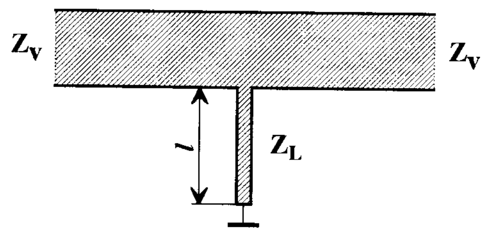
$$R = 2\beta_c.Z_L.l \qquad (5.1.45)$$

$$Q_0 = \frac{\omega L}{R} = \frac{\omega\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{2\beta_c.c} \qquad (5.1.46)$$

Soustředěný charakter prvku platí do $l \leq \lambda_g/25$, [7], tedy do kmitočtu

$$f_{max} = \frac{c}{25.l.\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \tag{5.1.47}$$

h) **Paralelní induktor z krátkého úseku vedení**



Obr. 5.1.8.

Předpoklad: $Z_L >> Z_V$, $l << \lambda_g$

$$L = \frac{Z_L.l.\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{c} \tag{5.1.48}$$

$$R = 2.\beta_C.Z_L.l \tag{5.1.49}$$

Prvek má soustředěný charakter do $l << \lambda_g/32$, [7], tedy do frekvence:

$$f_{max} = \frac{c}{32.l.\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \tag{5.1.50}$$

Indukčnost zkratu: - prokovená díra
- pásek na hraně substrátu

Pro výpočet možno použít vztahy z kap. 5.1. a) a 5.1. b). Přesnější vztahy odvodil Goldfarb a Pucel , [81]:

$$L_{via} = \frac{\mu_0}{2\pi}\left[h.\ln\left(\frac{h+\sqrt{r^2+h^2}}{r}\right) + 1,5.\left(r - \sqrt{r^2+h^2}\right)\right] \tag{5.1.51}$$

kde h je tlouštka sumstrátu a r je poloměr prokovené díry.

Pro parazitní odpor prokovené díry pak uvádějí:

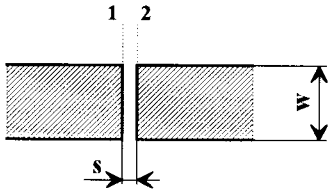
$$R = R_{SS}.\sqrt{1+\frac{f}{f_\delta}} \tag{5.1.52}$$

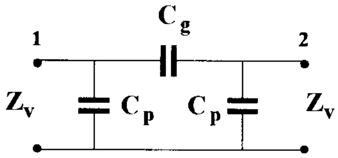
kde

$$f_\delta = \frac{1}{\pi\mu_0\sigma_c.t^2} \tag{5.1.53}$$

5.2. Kapacitory

a) Mezera v mikropásku





Obr. 5.2.1

Pro hodnoty kapacit náhradního obvodu uvádí Gupta v [4]:

$$Cp = 0,5Ce \tag{5.2.1}$$

$$Cg = 0,5.(Co - 0,5Ce) \tag{5.2.2}$$

Pro substrát s $\varepsilon r = 9,6$ a $0,5 \le w/h \le 2$ pak platí:

$$Ce = w.\left(\frac{s}{w}\right)^{m_e}.e^{k_e} \qquad [\mathrm{pF;\ m}] \tag{5.2.3}$$

$$Co = w.\left(\frac{s}{w}\right)^{m_o}.e^{k_o} \qquad [\mathrm{pF;\ m}] \tag{5.2.4}$$

kde

$$me = 0,8675, \qquad ke = 2,043.\left(\frac{w}{h}\right)^{0,12} \qquad \text{pro} \quad 0,1 \le \frac{s}{w} \le 0,3$$

$$me = \frac{1,565}{\left(\frac{w}{h}\right)^{0,16}} - 1, \qquad ke = 1,97 - \frac{0,03}{w/h} \qquad \text{pro} \quad 0,3 \le \frac{s}{w} \le 1$$

$$mo = \frac{w}{h}.\left(0,619.\log\frac{w}{h} - 0,3853\right) \qquad \text{pro} \quad 0,1 \le \frac{s}{w} \le 1$$

$$ko = 4,26 - 1,453.\log\frac{w}{h} \qquad \text{pro} \quad 0,1 \le \frac{s}{w} \le 1$$

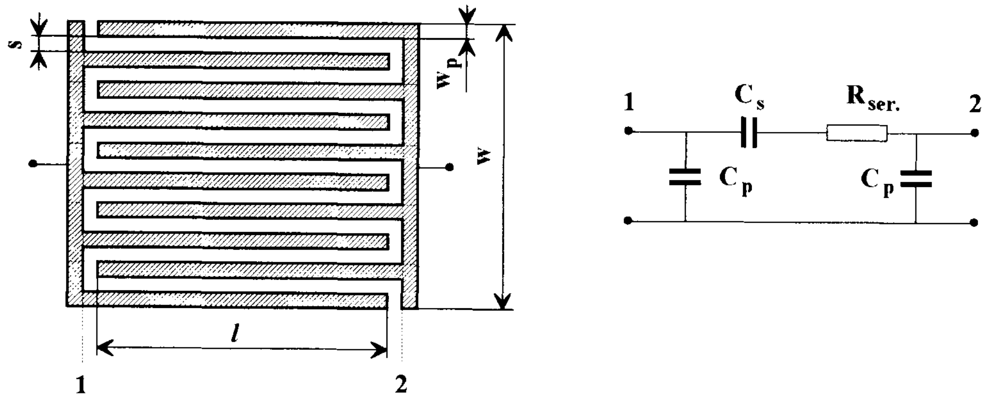
Pro jiné hodnoty εr z intervalu $2,5 \le \varepsilon r \le 15$ pak lze určit Co a Ce podle:

$$Ce(\varepsilon r) = Ce(\varepsilon r = 9,6).\left(\frac{\varepsilon_r}{9,6}\right)^{0,9} \tag{5.2.5}$$

$$Co(\varepsilon r) = Co(\varepsilon r = 9,6).\left(\frac{\varepsilon_r}{9,6}\right)^{0,8} \tag{5.2.6}$$

Další vztahy lze nalézt v [82], frekvenčně závislý model postihující ztráty vyzařováním je popsán v [83].

b) **Interdigitální kapacitor**



Obr. 5.2.2. Interdigitální desetiprstový kapacitor.

Strukturu analyzoval Alley, [84]. Pro $w_p = s = x$ odvodil:

$$C_S = \frac{\varepsilon_r + 1}{w} . l . \left[(n-3) . A_1 + A_2 \right] \qquad \text{[pF; mm]} \qquad (5.2.7)$$

$$R_{ser.} = \frac{4 . l . R_s}{3 w_p . n} \qquad (5.2.8)$$

kde n je počet prstů kapacitoru.

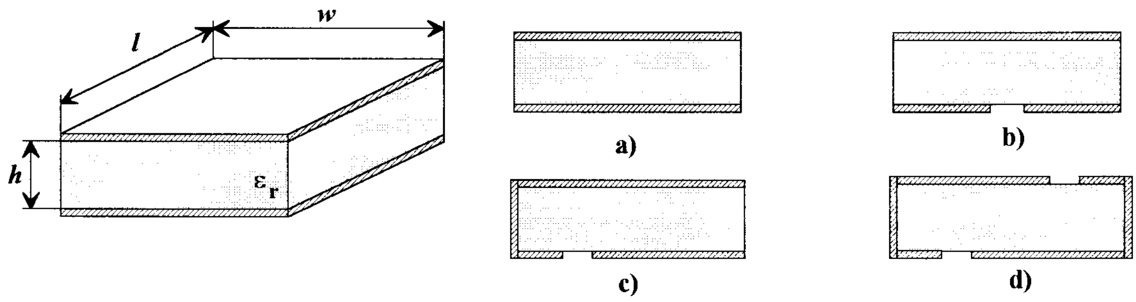
Konstanty A_1 a A_2 udává Alley ve formě grafu. Wadel v [9] aproximuje grafy analytickým výrazem, který je však v důsledku tiskové chyby nesprávný. Opravené aproximace vyhovující grafům v [84] jsou:

$$A_1 = \frac{1}{25{,}4} \cdot \left[0{,}3349057 - 0{,}15287116 . \left(\frac{h}{x} \right)^{-1} \right]^2 \qquad \text{[pF; mm]} \qquad (5.2.9)$$

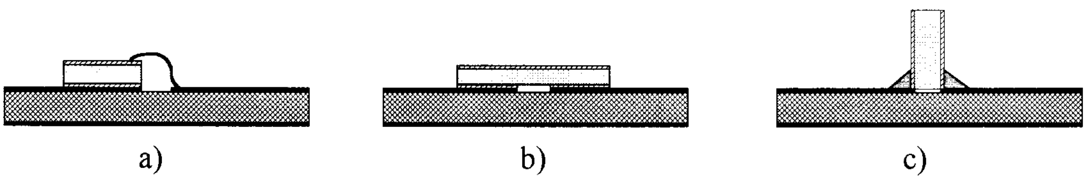
$$A_2 = \frac{1}{25{,}4} \cdot \left[0{,}50133101 - 0{,}22820444 . \left(\frac{h}{x} \right)^{-1} \right]^2 \qquad \text{[pF; mm]} \qquad (5.2.10)$$

Vztahy jsou platné pro $3 \le h/x \le \infty$. Spodní plocha substrátu je pokovená.

c) **Jednovrstvé kondenzátory MIM**



Obr. 5.2.3. Jednovrstvé kondenzátory MIM v různém provedení.



Obr. 5.2.4. Způsoby montáže kondenzátorů MIM.

Obr. 5.2.5. Náhradní obvod.

$$Z_{vst.} = Z_V.\coth\gamma l \qquad (5.2.11)$$

Pro $l << \lambda_g$ je:

$$Z_{vst.} \cong Z_V.\frac{1}{\gamma l} + \frac{1}{3}Z_V.\gamma l = R_1 + R_2 + \frac{1}{j\omega C} \qquad (5.2.12)$$

kde

$$R_1 = \frac{2}{3}.R_S.\frac{l}{w} \quad \text{ztráty ve vodičích} \qquad (5.2.13)$$

$$R_2 = \frac{\mathrm{tg}\delta}{\omega C} \quad \text{ztráty v dielektriku} \qquad (5.2.14)$$

$$C = \varepsilon_r.\varepsilon_0\frac{w.l}{h} \qquad (5.2.15)$$

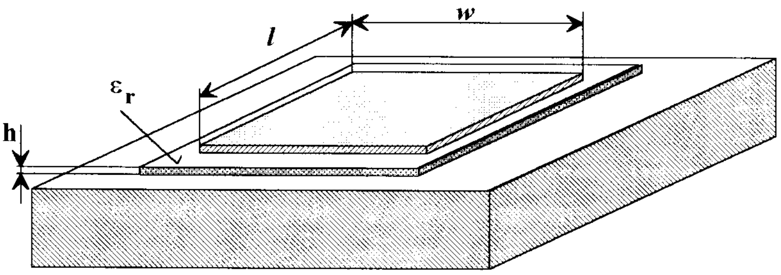
Činitel jakosti

- ztráty ve vodičích $$Q_V = \frac{1}{\omega R_1 C} = \frac{3h}{2\omega\varepsilon_r\varepsilon_0 R_s.l^2} \qquad (5.2.16)$$

- ztráty v dielektriku $$Q_d = \frac{1}{\omega R_2 C} = \frac{1}{\operatorname{tg}\delta} \qquad (5.2.17)$$

- celkově $$Q_C = \frac{1}{\omega(R_1+R_2).C} = \frac{Q_v.Q_d}{Q_v+Q_d} \qquad (5.2.18)$$

d) **Jednovrstvé kondenzátory MIS**



Obr. 5.2.6.

Rozptylové pole na hranách horní elektrody.

$$C = \frac{\varepsilon_r.\varepsilon_0.w.l}{h} + C_{e1} + C_{e2} \qquad (5.2.19)$$

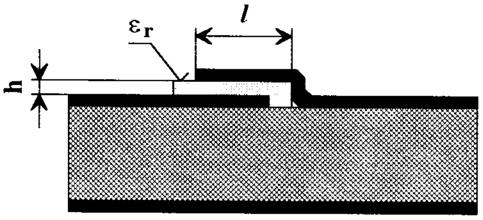
kde C_{e1} a C_{e2} jsou rozptylové kapacity na hranách kondenzátoru určené, [4]:

$$C_{e1} = \left[\frac{1}{v_{f1}.Z_{v1}(w,h,\varepsilon_r)} - \frac{\varepsilon_r.\varepsilon_0.w}{h}\right].l \qquad (5.2.20)$$

$$C_{e2} = \left[\frac{1}{v_{f2}.Z_{v2}(l,h,\varepsilon_r)} - \frac{\varepsilon_r.\varepsilon_0.l}{h}\right].w \qquad (5.2.21)$$

Montáž viz obr. 5.2.4 a).

e) **Tenkovrstvý kapacitor**



Obr. 5.2.7.

Kapacitu lze určit podle (5.2.19) až (5.2.21), případně Hurt uvádí, [85], viz [9]:

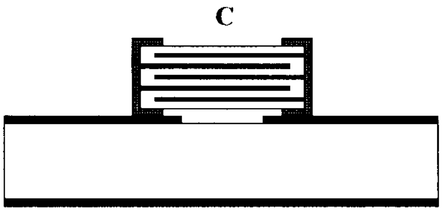
$$C = \frac{\varepsilon_r.\varepsilon_0.(l + \Delta f).(w + \Delta f)}{h} \tag{5.2.22}$$

kde

$$\Delta f = \frac{4h.\ln 2}{\pi} \tag{5.2.23}$$

postihuje rozptylové pole.

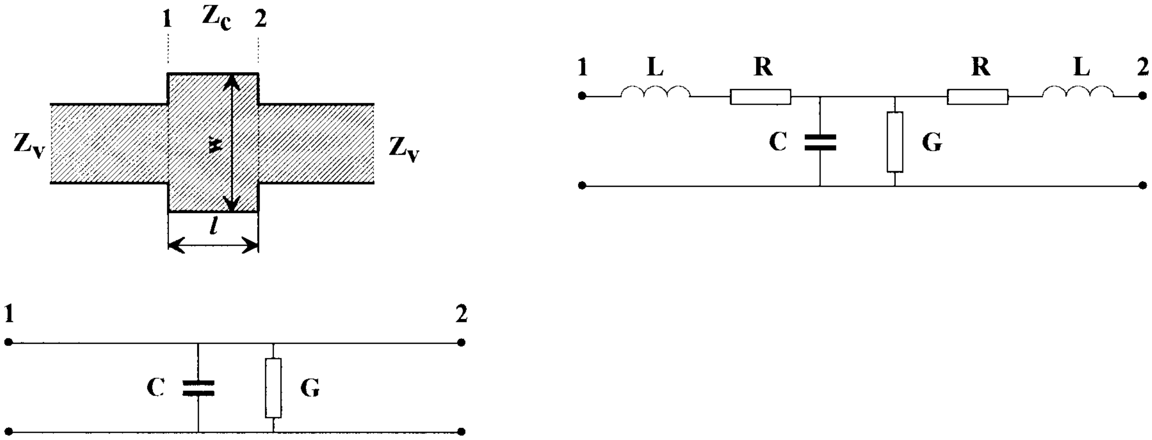
f) **SMD kapacitor**



Obr. 5.2.8.

Mnohavrstvá periodická struktura. Na vyšších kmitočtech má charakter vedení buzeného ze strany mezery v mikropásku. Na vyšších kmitočtech vykazuje mnohonásobné rezonance, první rezonance je paralelní. Možnost horizontální a vertilální montáže.

g) **Kapacitor z krátého úseku vedení**



Obr. 5.2.9.

Předpoklad: $Z_{vC} << Z_v$ a $l << \lambda_g$.

Pro kapacitu vzhledem k (2.5.1) platí:

$$C = \frac{l}{v_f.Z_{vC}} = \frac{l.\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{c.Z_{vC}} \tag{5.2.24}$$

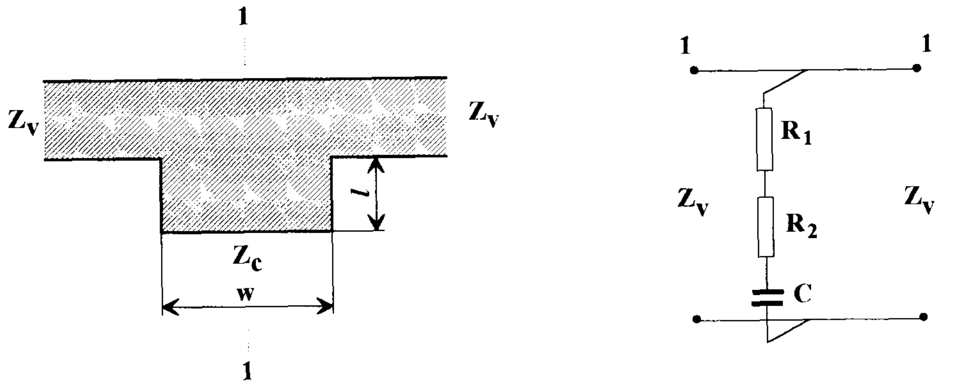
$$G = 2.\beta_d.Y_{vC}.l = \frac{2\beta_d}{Z_{vC}} \qquad (5.2.25)$$

$$Q_0 = \frac{\omega C}{G} = \frac{\omega\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{2\beta_d..c} \qquad (5.2.26)$$

Soustředěnost parametrů platí do $l \leq \lambda_g/25$, [7], tedy do kmitočtu:

$$f\mathrm{max} = \frac{c}{25.l.\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \qquad (5.2.27)$$

h) **Kapacitní pahýl**



Obr. 5.2.10.

Předpoklad: $Z_{vC} << Z_v$ a $l << \lambda_g$. Jedná se o paralelně připojený kondenzátor MIM. Proto, [7]:

$$C = \frac{l}{v_f.Z_{vC}} = \frac{l.\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{c.Z_{vC}} \qquad (5.2.28)$$

Parazitní parametry:

$$R_1 = \frac{2}{3}.\beta_c.Z_{vC}.l \qquad (5.2.29)$$

$$R_2 = \frac{2.\beta_d.l}{\omega^2.C^2.Z_{vC}} \qquad (5.2.30)$$

Činitel jakosti:

- ztráty ve vodičích $$Q_v = \frac{1}{\omega R_1 C} = \frac{3c}{2\omega.\beta_c.\sqrt{\varepsilon_{ef}}.l^2} \qquad (5.2.31)$$

- ztráty v dielektriku $$Q_d = \frac{1}{\omega R_2 C} = \frac{\omega\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{2c.\beta_d} \qquad (5.2.32)$$

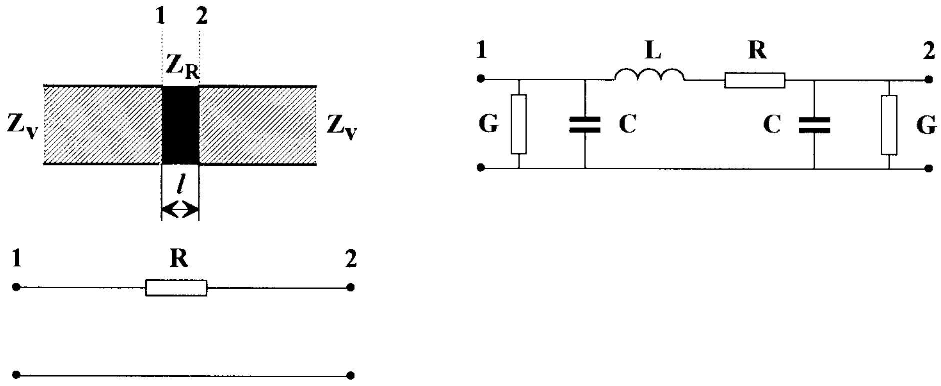
- celkově $$Q_c = \frac{1}{\omega(R_1+R_2).C} = \frac{Q_v.Q_d}{Q_v+Q_d} \qquad (5.2.33)$$

Soustředěnost parametrů platí do $l \leq \lambda_g/7$, tedy do kmitočtu:

$$f\mathrm{max} = \frac{c}{7.l.\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \qquad (5.2.34)$$

5.3. Rezistory

a) Krátký úsek odporového vedení



Obr. 5.3.1.

Předpoklad: $Z_{vR} \approx Z_v$ a $l << \lambda_g$. Potom:

$$R = \frac{1}{\sigma_r} \cdot \frac{l}{w.t_r} = R_{sqr} \cdot \frac{l}{w} \qquad (5.3.1)$$

kde

$$R_{sqr} = \frac{1}{\sigma_r . t_r} \qquad [\Omega/\square] \qquad (5.3.2)$$

je povrchový odpor s rozměrem ohm na čtverec.
Tloušťka odporové vrstvy t_r je cca 0,1 μm.

$$t_r << \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma_r}} \qquad (5.3.3)$$

Parazitní parametry.

$$L = \frac{Z_{vR}.l.\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{c} \qquad (5.3.4)$$

$$C = \frac{l.\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{2c.Z_{vR}} \qquad (5.3.5)$$

$$G = \frac{\beta_d.l.}{Z_{vR}} \qquad (5.3.6)$$

Soustředěnost parametrů platí do, [7], $l << \lambda_g/25$, tedy do kmitočtu:

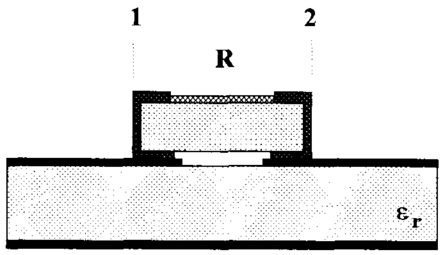
$$f_{\max} = \frac{c}{25.l.\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \qquad (5.3.7)$$

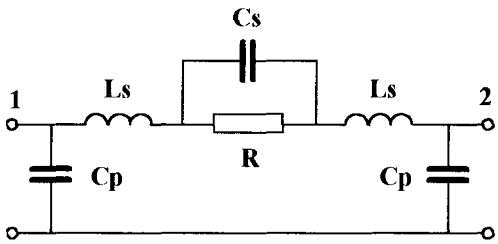
Ztrátový výkon tenkovrstvých rezistorů je cca 0,5 W.

Materiály používané na tenké odporové vrstvy, [7].

Materiál	ρ_V [10^{-6}.Ωm]	R [Ω/□]	TKR [10^{-6}.1/°C]
Cr	13	1,5	3 000
Ti	55-135	10	25 000
Ta	180/220		$-100 \div 500$
NiCr	$60 \div 600$	90	200
Ta_2N	300	90	$-50 \div -110$
Cerment Cr-Si	$10^3 - 10^5$	$50 \div 500$	$-300 \div 100$

b) **SMD odpor**





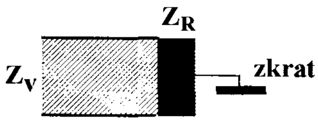
Obr. 5.3.2.

Vysokofrekvenční vlastnosti prvku jsou ovlivněny způsobem montáže. Hoffman [86] odvodil náhradní obvod rezistoru velikosti 0805 pro standardní montáž, obrácenou montáž s odporovou vrstvou směrem k substrátu a montáž s rezistorem položeným na bok kolmo k substrátu. Hodnoty prvků náhradního obvodu jsou platné do 12 GHz pro rozsah hodnot odporu 1 Ω až 1 MΩ.

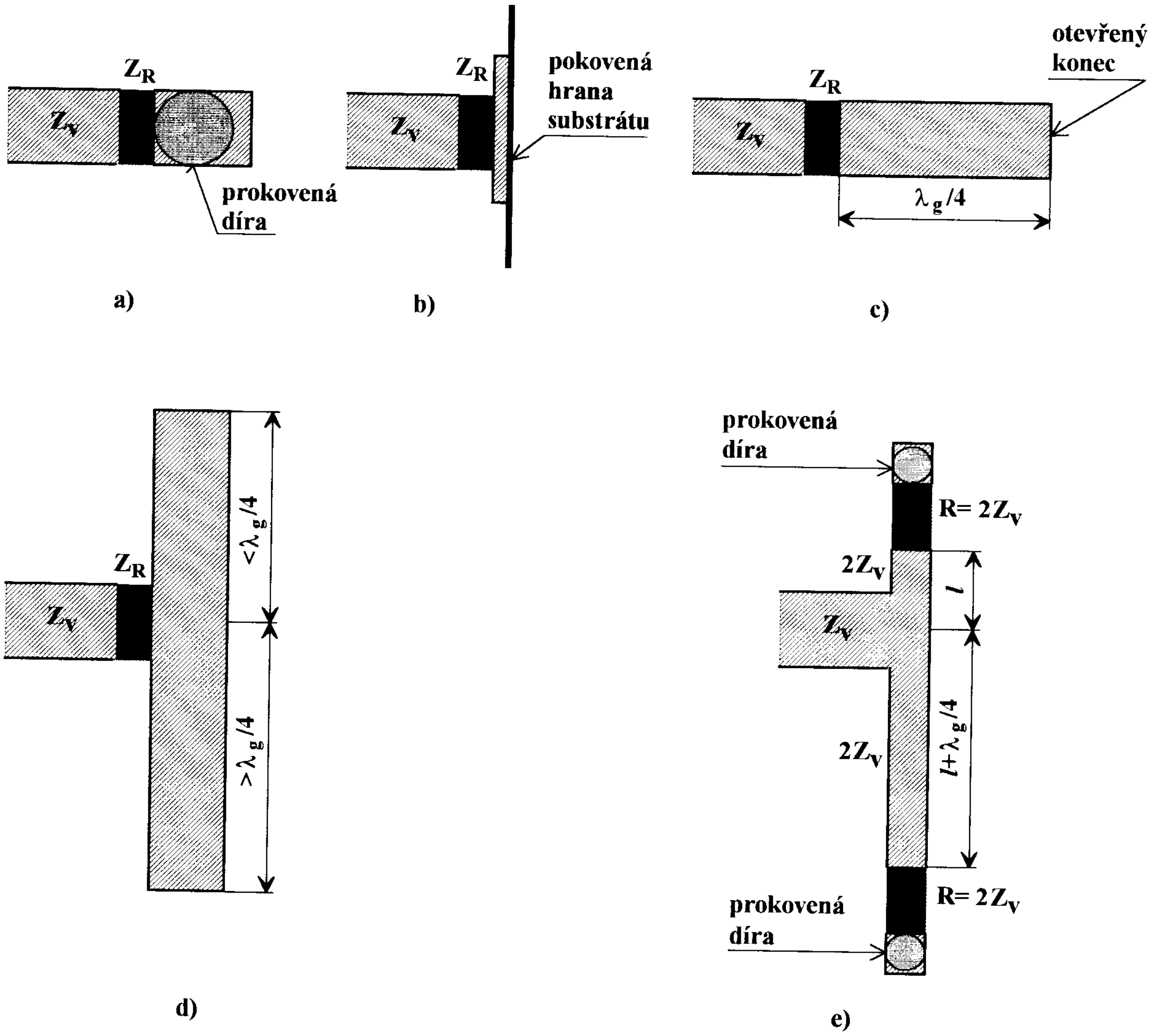
Tab. 5.3.1.

montáž	R [ohm]	Ls [nH]	Cp [pF]	Cs [pF]
standardní	$1 \div 1.10^6$	0,45	0,070	0,055
obrácená	$1 \div 1.10^6$	0,33	0,080	0,055
na boku	$1 \div 1.10^6$	0,48	0,065	0,055

c) **Přizpůsobená zátěž**



Obr. 5.3.3.



Obr. 5.3.4. Různé realizace přizpůsobených zátěží.

Realizace zkratu a přizpůsobené zátěže.

a) prokovená díra

b) zkrat na hraně substrátu

c) zkrat pomocí úseku vedení $\lambda_g/4$

d) realizace širokopásmového zkratu

e) navzájem se kompenzující zbytkové odrazy