

Teoretický rozbor stanovení pracovní třídy a účinnosti výkonového zesilovače

Ing. Tomáš Kavalír, OK1GTH kavalir.t@seznam.cz, <http://ok1gth.nagano.cz>

Uvedený článek je volným pokračováním předchozího článku na téma anodové obvody pro VKV a UKV. Cílem tohoto povídání je stručně seznámit čtenáře se základními postupy výpočtu ohledně pracovní třídy, účinnosti zesilovače a věcí souvisejících s návrhem anodových obvodů tentokrát pro oblast KV elektronkových zesilovačů. Opět bylo použito celé řady zjednodušení, ale uvedené odvozené vztahy je i tak možno úspěšně použít při vlastním návrhu výkonového zesilovače.

Při vlastním teoretickém rozboru musíme začít aproximací převodní charakteristiky daného aktivního prvku. Pro účely odvození a výpočtu tzv. Schulzových koeficientů (koeficienty rozkladu pro poloviční úhel otevření) a pro účely stanovení účinnosti a volby pracovní třídy byla zvolena aproximace převodní charakteristiky po lineárních úsecích. Tato aproximace se pro potřeby výpočtu u zesilovačů osazených elektronkami běžně využívá. Existuje ještě aproximace převodní charakteristiky kvadratickou závislostí a aproximace pomocí exponenciálních funkcí, které jsou výhodnější především pro výpočty zesilovačů osazených unipolárními a bipolárními tranzistory [1].

Koeficienty Fourierovy řady nám určují velikost stejnosměrné složky a především amplitudy první a vyšších harmonických [1]:

$$I_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_2(\omega t) d(\omega t) \quad (1)$$

$$I_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_2(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (2)$$

Dosadíme za $i_2(\omega t)$ a za I_m :

$$i_2(\omega t) = S_0 U_1 (\cos \omega t - \cos \Phi) \quad (3)$$

$$I_m = S_0 U_1 (1 - \cos \Phi) \quad (4)$$

kde S_0 představuje strmost převodní charakteristiky, U_1 maximální hodnotu budícího napětí a Φ nám symbolizuje úhel otevření. Pro jednotlivé složky výstupního proudu pak obdržíme:

$$I_0 = I_m \frac{1}{\pi} \frac{\sin \Phi - \Phi \cos \Phi}{1 - \cos \Phi} \quad (5)$$

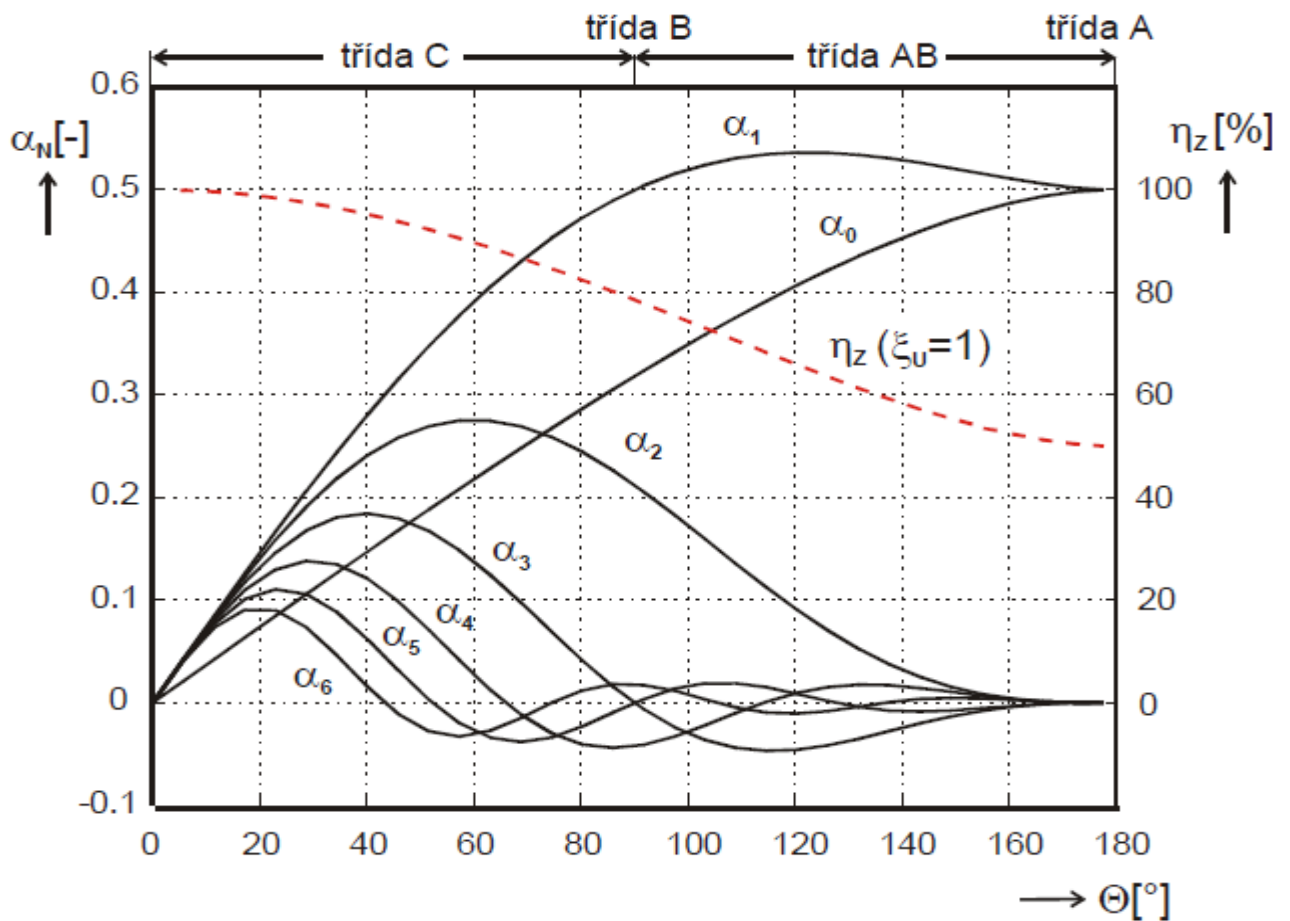
$$I_1 = I_m \frac{1}{\pi} \frac{\Phi - \cos \Phi \sin \Phi}{1 - \cos \Phi} \quad (6)$$

$$I_n = I_m \frac{2}{\pi} \frac{\sin n \Phi \cos \Phi - n \cos n \Phi \sin \Phi}{n(n^2 - 1)(1 - \cos \Phi)} \quad (7)$$

Jak si ukážeme později, je výhodné nahradit funkce úhlu otevření tzv. koeficienty rozkladu α :

$$\alpha_0 = \frac{I_0}{I_m}, \quad \alpha_1 = \frac{I_1}{I_m}, \quad \alpha_n = \frac{I_n}{I_m} \quad (8)$$

Tyto koeficienty rozkladu pro poloviční úhel otevření jsou vyneseny v tzv. Schulzově diagramu:



Obr.8 Schulzův diagram - převzato z Radiové přijímače a vysílače [2].

Z tohoto digramu, případně přímým výpočtem pomocí uvedených rovnic je možné následně určit další podstatné parametry pro konkrétní úhel otevření, potažmo konkrétní pracovní třídu.

Potlačení n -té harmonické b_n je možné vypočítat pomocí tohoto vztahu, který platí za předpokladu, že provozní Q_p se nemění pro harmonické kmitočty:

$$b_n = 20 \log \frac{\alpha_1}{\alpha_n} \left(n - \frac{1}{n}\right) Q_p \quad (9)$$

kde n je konkrétní harmonická, u které chceme znát hodnotu potlačení v dB.

Pro zvolenou pracovní třídu AB, respektive pro úhel otevření 100° a po dosazení do vzorců, případně odečtením konkrétních hodnot přímo ze Schulzova digramu pro daný uhel otevření a pro $Q_p \div 20$:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cong 3, \quad \frac{\alpha_1}{\alpha_3} \cong 20, \quad \frac{\alpha_1}{\alpha_4} \cong 17 \quad (10)$$

což odpovídá potlačení druhé harmonické o cca 39, třetí 60 a čtvrté 62 dB. Hodnoty jsou to velmi přibližné a nerespektují nelineární převodní charakteristiku použité elektronky a v reálu musíme počítat s horšími hodnotami.

Dalším podstatným údajem nutným pro další výpočty je tzv. dynamická impedance elektronky R_d v daném pracovním bodě. Nejjednodušeji můžeme definovat jako poměr okamžité hodnoty napětí první harmonické a okamžité amplitudy anodového proudu:

$$R_d = \frac{U_{an}}{I_n} \quad (11)$$

Rozkmit anodového napětí se může blížit až hodnotám stejnosměrného anodového napětí a definujeme tzv. činitel využití anodového napětí ξ :

$$\xi = \frac{U_{an}}{U_{a0}} \quad (12)$$

který může u velikých elektronek s vysokým výstupní výkonem dosahovat až hodnoty $\xi=0,95$. Vztah pro výpočet dynamického anodového odporu pro první harmonickou nám tak přechází:

$$R_d = \frac{\alpha_0}{\alpha_1} \xi \frac{U_{a0}}{I_{a \max}} \quad (13)$$

Po dosazení a odečtení hodnot koeficientů ze Schulzova diagramu pro daný úhel otevření 100° (třída AB), pro daný činitel využití anodového napětí cca $\xi=0,9$ a pro hodnoty anodového napětí $U_{a0} = 3000$ V při max. anodovém proudu $I_{a \max} = 1$ A nám vychází dynamický anodový odpor cca 1800 Ω . Hodnoty byly zvoleny pro reálný zesilovače osazený například elektronkou GS35b.

Uvedené vztahy se často zjednodušují pro dané pracovní třídy a R_d se tak dá přibližně stanovit [3]:

$$\begin{aligned} \text{Tř.A: } R_d &= 0,8 \frac{U_{a0}}{I_{a \max}} & \text{Tř.AB: } R_d &= 0,6 \frac{U_{a0}}{I_{a \max}} \\ \text{Tř.B: } R_d &= 0,55 \frac{U_{a0}}{I_{a \max}} & \text{Tř.C: } R_d &= 0,5 \frac{U_{a0}}{I_{a \max}} \end{aligned} \quad (14)$$

Pro potřeby další analýzy je potřeba určit tzv. provozní činitel kvality Q_p . Tento činitel nám reprezentuje zatížení rezonančního obvodu reálnou impedancí elektronky a zejména zatlumení obvodu výstupní zátěží (anténou). Často proto volíme tzv. kapacitní vazbu do antény, u které je možné snadněji nastavit provozní Q_p . Toto volíme v rozsahu cca 5-30, kdy nižší hodnoty nám zaručují lepší přenos z hlediska účinnosti, ale menší potlačení harmonických produktů. Naopak vyšší hodnoty Q_p zaručují lepší potlačení, ale zároveň se zvyšují cirkulační proudy a klesá účinnost. V pásmech VKV a UKV je nejnižší možná hodnota Q_p dána především velikostí parazitní kapacity anodové chladiče, anodového obvodu a konstrukce elektronky a pod tuto limitní hodnotu není možné jít. V pásmech KV je tato kapacita v porovnání s pracovním kmitočtem relativně malá a je možné anodový obvod snáze navrhnout s potřebným provozním Q_p . Tento činitel je definován:

$$Q_p = \frac{R_d}{X_a} \quad (15)$$

kde R_d je dynamický anodový odpor a X_a je kapacitní reaktance systému elektronky a rozptylové konstrukční kapacity anodového obvodu. Tuto je možné vypočítat:

$$X_a = \frac{1}{j2\pi f (C_a + C_{roz} \dots)} \quad (16)$$

V případě reálné konstrukce anodového boxu zesilovače pro 144 MHz s elektronkou GS35 při použití anodového obvodu s jednozávitovým rezonátorem je možné uvažovat konstrukční kapacitu elektronky a rozptylové kapacity rezonátoru cca 10-12 pF. Výsledné provozní Q_p se tak při uvažování dynamického odporu elektronky ($R_d \div 1800 \Omega$) pohybuje okolo 20.

Stanovení anodové účinnosti zesilovače

Dalším podstatným bodem návrhu je stanovení anodové účinnosti. Z té je pak možné určit například celkovou účinnost η_c , do které je započítán celý blok zesilovače včetně podpůrných obvodů, žhavení, účinnosti anodového zdroje atd.

$$\eta_c = \frac{P_{out}}{\sum P_p + P_z + \dots P_n} \quad (17)$$

Anodová účinnost je samozřejmě dána především volbou pracovní třídy, tj. úhlem otevření. Nejednodušeji můžeme definovat anodovou účinnost jako poměr výstupního výkonu P_u první harmonické a stejnosměrného příkonu zesilovače P_p :

$$\eta_a = \frac{P_u}{P_p} \quad (18)$$

Stejnoseměrný příkon zesilovače bez uvažování žhavení lze definovat:

$$P_p = \alpha_0 \times I_{amax} \times U_{a0} \quad (19)$$

a výstupní výkon je dán především hodnotou napětí první harmonické a amplitudou první harmonické anodového proudu. Zároveň ve vztahu musíme respektovat činitel využití anodového napětí ξ . Výsledný vztah tak bude definován:

$$P_u = \frac{1}{2} \times \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \times \xi \times P_p \quad (20)$$

Teoretická dosažitelná účinnost pro daný úhel otevření 100° by byla cca 75 %, ale vzhledem k činiteli využití cca $\xi=0,9$ je vypočítaná hodnota cca 66 %. Tato hodnota bude ve výsledné

celkové účinnosti zesilovače ještě snížena započítáním žhavení, energetickému přenosu anodového obvodu atd.

Účinnost přenosu anodového obvodu η_{rez} je definována poměrem tzv. pracovního činitele kvality při zatížení Q_p a činitele kvality naprázdno Q_n a základní vztah po odvození má následující podobu:

$$\eta_{rez} = 1 - \frac{Q_p}{Q_n} \quad (21)$$

Z tohoto vztahu je patrné, že je žádoucí mít co největší poměr mezi činitelem Q_p a Q_n a pokud stanovíme podmínku, že účinnost přenosu anodovým obvodem má být alespoň 95 %, tak nám předchozí vztah nabývá následujícího tvaru a činitel kvality naprázdno musí dosahovat alespoň následující hodnoty:

$$Q_n = \frac{Q_p}{0,05} \quad (\text{tj. alespoň } Q_n = 400 \text{ pro } Q_p = 20) \quad (22)$$

V reálném zařízení elektronkového zesilovače pro VKV a UKV při dodržení podmínek konstrukce vf. techniky a při použití kvalitních materiálů můžeme počítat s nezatíženým činitelem jakosti naprázdno $Q_n = 600 - 1000$. Konkrétní hodnota se změní na reálném anodovém obvodu při minimální anténní vazbě a vypočítá se z rozdílu poklesu amplitudy o – 3 dB oproti provoznímu kmitočtu f_0 .

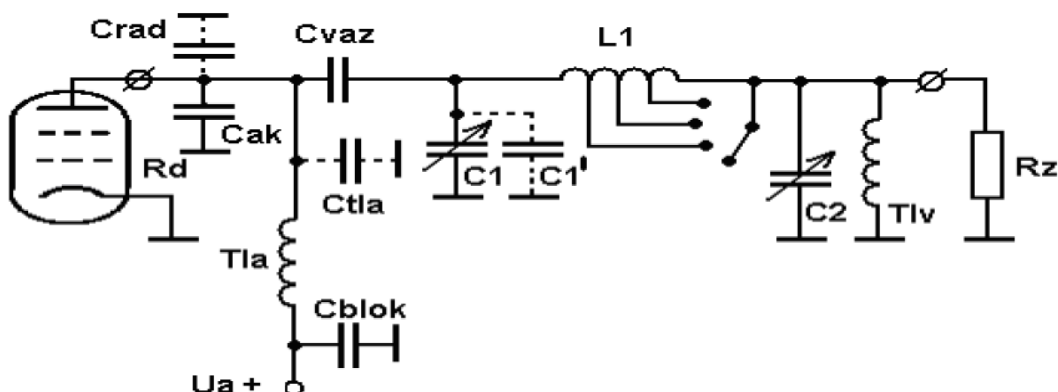
$$Q_n = \frac{f_0}{B_{-3dB}} \quad (23)$$

Teoretický rozbor širokopásmového elektronkového KV zesilovače

Teoretický rozbor ohledně pracovní třídy, účinnosti, výpočet Schulzových koeficientů případně i teorie ohledně volby pracovního činitele kvality Q_p byl proveden v předcházející kapitole. Zde se proto soustředím pouze na zjednodušený teoretický rozbor ohledně výstupního anodového obvodu, který je principiálně naprosto odlišný a používá se jiná topologie. Vzhledem ke kmitočtovému rozsahu, pro který je zesilovač navržen, tak na většinu součástí můžeme pohlížet jako na součástky se soustředěnými parametry. Funkce a použití anodového obvodu je identická jako u anodového obvodu používaného v oblasti VKV a UKV elektronkových zesilovačů. Vzhledem k délce vlny se nepoužívají části vedení, nahrazující prvky L a C, ale různé topologie přizpůsobovacích členů ve formě T a π článků a jejich

modifikací. V tranzistorové technice je možné tento výstupní obvod realizovat například pomocí speciálního širokopásmového transformátoru (tzv. transformátory lineární nebo Ruthrfovy) s jejichž pomocí je možné realizovat tento výstupní obvod s šířkou pásma až přes dvě dekády. V technice elektronkových zesilovačů není toto řešení možné a používají se tak anodové obvody přeladované a aby se dosáhlo potřebné širokopásmovosti, tak navíc dochází k rozdělení na několik segmentů, které se následně přepínají. Tyto anodové obvody komplikují mechanické provedení a obsluhu zesilovače, ale jejich výhodou je při vhodné zvolené topologii a vhodné zvolenému pracovnímu činiteli kvality Q_p lepší potlačení harmonických produktů a není tak ve většině případů nutné zařazovat externí filtrační členy, na rozdíl od tranzistorových širokopásmových zesilovačů. V současnosti existují i moderní elektronkové zesilovače s plně automatickým řízením, kdy jednotlivé laditelné prvky L a C ve formě π článku jsou ovládány krokovými motory a celý koncový stupeň je řízen mikroprocesorem. Je tak možný plně automatický provoz bez zásahu obsluhy, kdy zesilovač po přeladění testuje a nastavuje výstupní anodový obvod na optimální parametry a jednotlivé pozice prvků si následně uloží do paměti. Při dalším přeladování je tak zaručeno, že tato změna je velmi rychlá a pohybuje se do 1 sekundy. Příkladem může být moderní koncový stupeň Acom 2000 s plně automatickým provozem určený pro pásmo 1,8-30 MHz s výstupním výkonem 2000 W, který je osazen dvojicí tetrod 2xGU74b.

V dalším teoretickém rozboru se zaměřím pouze na anodový obvod konfigurace π , který je v oblasti výkonových elektronkových zesilovačů pro oblast KV používán nejčastěji. Pro dodatečné potlačení harmonických produktů se v některých případech tento článek modifikuje na konfiguraci π -L. Na obr.10 je naznačeno základní provedení anodového obvodu včetně naznačení parazitních rozptylových kapacit, které v zapojení musíme uvažovat.



Obr.10 Provedení anodového obvodu ve formě π článku.

Pro potřeby návrhu a realizace π článku byly odvozeny a upraveny vztahy pro výpočet jednotlivých hodnot C1, L1 a C2 pro zvolené provozní Q_p . V platnosti zůstávají i doporučené

hodnoty Q_p , které by se měli pohybovat v intervalu cca 5-30, kdy doporučená hodnota a vhodným kompromisem mezi účinností přenosu a filtrací vyšších harmonických je okolo 12. Při teoretickém rozboru π článku zatíženého impedancí R_z , kdy na vstupu máme dynamický anodový odpor R_d , nám po odvození vyjdou tyto reaktance:

$$X_{C1} = \frac{R_d}{Q_p} \quad (24)$$

$$X_{C2} = \frac{R_z}{\sqrt{\frac{R_r}{R_d} (Q_p^2 + 1) - 1}} \quad (25)$$

$$X_{L1} = \frac{R_d}{Q_p + \frac{1}{Q_p}} \left(1 + \frac{R_z}{Q_p + X_{C2}}\right) \quad (26)$$

vše musí platit za podmínky, že:

$$Q_p^2 \geq \frac{R_d}{R_z} - 1 \quad (27)$$

Po přepočtu na konkrétní hodnoty $C1$, $C2$ a $L1$ pro daný kmitočet nám uvedené vztahy přecházejí na:

$$C1 = \frac{Q_p}{2\pi f R_d} \quad (28)$$

$$C2 = \frac{\sqrt{\frac{R_z}{R_d} (1 + Q_p^2) - 1}}{R_z 2\pi f} \quad (29)$$

$$L1 = \frac{R_d (Q_p + (R_z 2\pi f C2))}{(1 + Q_p^2) 2\pi f} \quad (30)$$

a vše opět musí platit za podmínky, že:

$$Q_p^2 \geq \frac{R_d}{R_z} - 1 \quad (31)$$

Aby výpočet parametrů jednotlivých hodnot byl univerzální a aby bylo možné snáze anodový obvod ve formě π článku pro KV zesilovač následně optimalizovat, vytvořil jsem program pro výpočet a optimalizaci [4] a [5]. Nejprve musíme v programu nadefinovat vstupní parametry, tj. zvolíme zatěžovací impedanci R_z (zpravidla volíme 50Ω), dynamický anodový odpor R_d , dále zvolíme Q_p a kmitočet, pro který chceme výpočet provést. Program následně provede výpočet jednotlivých prvků C_1 , C_2 a L_1 a zároveň nám vypočte a zobrazí optimalizační tabulky, ze kterých následně můžeme odečíst a optimalizovat hodnoty prvků s ohledem na realizovatelnost, případně upravit provozní Q_p . Především na vyšších pásmech totiž v případě vyšších transformovaných poměrů, tj. kdy nám dynamický anodový odpor vychází poměrně vysoký a při dané počáteční kapacitě C_1 , rozptylových kapacitách na straně elektronky a konstrukčních kapacitách, se může ukázat, že daný obvod pro dané Q_p není realizovatelný. V tom případě musíme přistoupit ke změně Q_p , případně návrhu s jinou elektronkou nebo volbou ladícího kondenzátoru s menší počáteční kapacitou atd. V následující tabulce jsou zobrazeny vypočítané hodnoty pro zadané $Q_p=12$ a $R_d = 1200 \Omega$ (pro GU78b).

| subpásmo | C1 (pF) | C2 (pF) | L1 (uH) |
|----------|---------|---------|---------|
| 1,8 MHz | 885 | 3900 | 10 |
| 3,5 MHz | 454 | 2043 | 5,36 |
| 7 MHz | 227 | 1021 | 2,68 |
| 14 MHz | 113 | 510 | 1,34 |
| 21 MHz | 75 | 340 | 0,89 |
| 28 MHz | 57 | 255 | 0,67 |

Tab.1 Vypočítané hodnoty součástek pro výstupní π článek

Na dalších obrázcích jsou zobrazeny vypočítané optimalizační tabulky pro zadaný kmitočet, tj. zde konkrétně 28 MHz. V případě změny kmitočtu program přepočítá všechny hodnoty pro nové zadání.

| Dynamická impedance Rd: [Ω] | Kapacita kondenzátoru C1 v pF pro kmitočet: 28 MHz | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Volba Q obvodu: | | | | | | | | | |
| | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
| 400 | 56,869882 | 85,30482 | 113,7398 | 142,1747 | 170,6096 | 199,0446 | 227,4795 | 255,9145 | 284,3494 | 312,7843 |
| 600 | 37,913254 | 56,869888 | 75,82651 | 94,78314 | 113,7398 | 132,6964 | 151,653 | 170,6096 | 189,5663 | 208,5229 |
| 800 | 28,434941 | 42,65241 | 56,869888 | 71,08735 | 85,30482 | 99,52229 | 113,7398 | 127,9572 | 142,1747 | 156,3922 |
| 1000 | 22,747953 | 34,12193 | 45,49591 | 56,869888 | 68,24386 | 79,61783 | 90,99181 | 102,3658 | 113,7398 | 125,1137 |
| 1200 | 18,956627 | 28,43494 | 37,91325 | 47,39157 | 56,869888 | 66,3482 | 75,82651 | 85,30482 | 94,78314 | 104,2614 |
| 1400 | | 24,37281 | 32,49708 | 40,62134 | 48,74561 | 56,869888 | 64,99415 | 73,11842 | 81,24269 | 89,36696 |
| 1600 | | 21,32621 | 28,43494 | 35,54368 | 42,65241 | 49,76115 | 56,869888 | 63,97862 | 71,08735 | 78,19609 |
| 1800 | | 18,95663 | 25,2755 | 31,59438 | 37,91325 | 44,23213 | 50,55101 | 56,869888 | 63,18876 | 69,50763 |
| 2000 | | 17,06096 | 22,74795 | 28,43494 | 34,12193 | 39,80892 | 45,49591 | 51,18289 | 56,869888 | 62,55687 |
| 2200 | | 15,50997 | 20,67996 | 25,84995 | 31,01994 | 36,18992 | 41,35991 | 46,5299 | 51,69989 | 56,869888 |
| 2400 | | 14,21747 | 18,95663 | 23,69578 | 28,43494 | 33,1741 | 37,91325 | 42,65241 | 47,39157 | 52,13072 |
| 2600 | | 13,12382 | 17,49843 | 21,87303 | 26,24764 | 30,62224 | 34,99685 | 39,37146 | 43,74606 | 48,12067 |
| 2800 | | | 16,24854 | 20,31067 | 24,37281 | 28,43494 | 32,49708 | 36,55921 | 40,62134 | 44,68348 |
| 3000 | | | 15,1653 | 18,95663 | 22,74795 | 26,53928 | 30,3306 | 34,12193 | 37,91325 | 41,70458 |
| 3200 | | | 14,21747 | 17,77184 | 21,32621 | 24,88057 | 28,43494 | 31,98931 | 35,54368 | 39,09804 |
| 3400 | | | 13,38115 | 16,72644 | 20,07172 | 23,41701 | 26,7623 | 30,10758 | 33,45287 | 36,79816 |
| 3600 | | | 12,63775 | 15,79719 | 18,95663 | 22,11607 | 25,2755 | 28,43494 | 31,59438 | 34,75382 |
| 3800 | | | 11,97261 | 14,96576 | 17,95891 | 20,95206 | 23,94521 | 26,93837 | 29,93152 | 32,92467 |
| 4000 | | | 11,37398 | 14,21747 | 17,06096 | 19,90446 | 22,74795 | 25,59145 | 28,43494 | 31,27843 |
| 4200 | | | 10,83236 | 13,54045 | 16,24854 | 18,95663 | 21,66472 | 24,37281 | 27,0809 | 29,78899 |
| 4400 | | | 10,33998 | 12,92497 | 15,50997 | 18,09496 | 20,67996 | 23,26495 | 25,84995 | 28,43494 |

Tab.2 Optimalizační tabulka pro 28 MHz – C1 [pF].

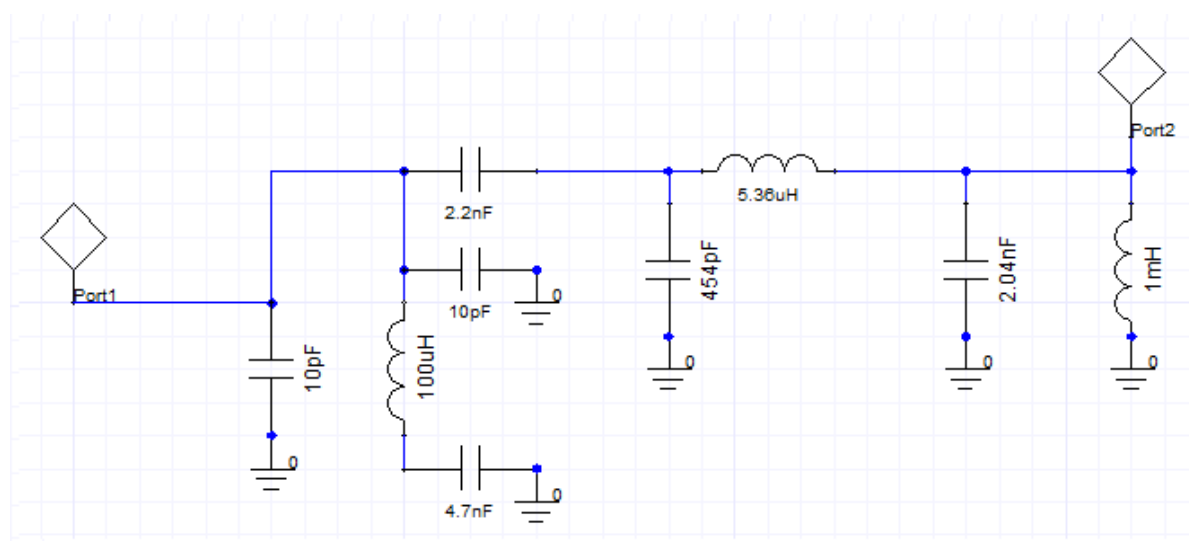
| Dynamická impedance Rd: [Ω] | Kapacita kondenzátoru C2 v pF pro kmitočet: 28 MHz | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Volba Q obvodu: | | | | | | | | | |
| | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
| 400 | 120,6392 | 216,5541 | 303,6021 | 387,8009 | 470,682 | 552,8384 | 634,5517 | 715,9735 | 797,1932 | 878,2669 |
| 600 | 73,4187 | 164,1692 | 239,034 | 309,7538 | 378,6583 | 446,5885 | 513,9309 | 580,89 | 647,5846 | 714,0889 |
| 800 | 28,43494 | 130,3053 | 199,0446 | 262,1572 | 322,9588 | 382,553 | 441,429 | 499,8406 | 557,9338 | 615,7987 |
| 1000 | #NUM! | 104,8629 | 170,6096 | 228,8969 | 284,3494 | 338,3638 | 391,5358 | 444,168 | 496,432 | 548,4333 |
| 1200 | #NUM! | 83,7102 | 148,6615 | 203,7286 | 255,3874 | 305,3724 | 354,3926 | 402,8005 | 450,7932 | 498,4908 |
| 1400 | | 64,48438 | 130,7477 | 183,6516 | 232,5018 | 279,4323 | 325,2753 | 370,4346 | 415,1334 | 459,5062 |
| 1600 | | 44,95959 | 115,5033 | 167,0175 | 213,7354 | 258,2732 | 301,5981 | 344,1685 | 386,234 | 427,9435 |
| 1800 | | 18,95663 | 102,0846 | 152,8332 | 197,913 | 240,5326 | 281,8105 | 322,2627 | 362,1659 | 401,6837 |
| 2000 | | #NUM! | 89,91918 | 140,4582 | 184,2795 | 225,3368 | 264,9184 | 303,6021 | 341,6929 | 379,3694 |
| 2200 | | #NUM! | 78,57703 | 129,4564 | 172,3244 | 212,0956 | 250,251 | 287,4347 | 323,9814 | 360,0852 |
| 2400 | | #NUM! | 67,6887 | 119,517 | 161,6879 | 200,3941 | 237,3367 | 273,232 | 308,4459 | 343,1883 |
| 2600 | | #NUM! | 56,86988 | 110,4101 | 152,108 | 189,9305 | 225,8331 | 260,6105 | 294,6615 | 328,2121 |
| 2800 | | | 45,59735 | 101,9588 | 143,3882 | 180,4795 | 215,4846 | 249,284 | 282,311 | 314,8089 |
| 3000 | | | 32,83384 | 94,02181 | 135,3774 | 171,8688 | 206,0961 | 239,034 | 271,1527 | 302,7131 |
| 3200 | | | 14,21747 | 86,4815 | 127,9572 | 163,9639 | 197,5154 | 229,6903 | 260,9981 | 291,7181 |
| 3400 | | | #NUM! | 79,23459 | 121,0328 | 156,6581 | 189,622 | 221,1182 | 251,6981 | 281,6605 |
| 3600 | | | 72,18469 | 114,5269 | 149,8653 | 182,319 | 213,2094 | 243,1331 | 272,4088 | |
| 3800 | | | #NUM! | 65,23423 | 108,3752 | 143,5153 | 175,5274 | 205,8758 | 235,2054 | 263,8561 |
| 4000 | | | #NUM! | 58,27429 | 102,5236 | 137,5499 | 169,1819 | 199,0446 | 227,8347 | 255,9145 |
| 4200 | | | #NUM! | 51,16785 | 96,9254 | 131,9204 | 163,2284 | 192,6554 | 220,9542 | 248,5106 |
| 4400 | | | #NUM! | 43,71623 | 91,53947 | 126,5856 | 157,6211 | 186,6574 | 214,5078 | 241,5829 |

Tab.3 Optimalizační tabulka pro 28 MHz – C2 [pF].

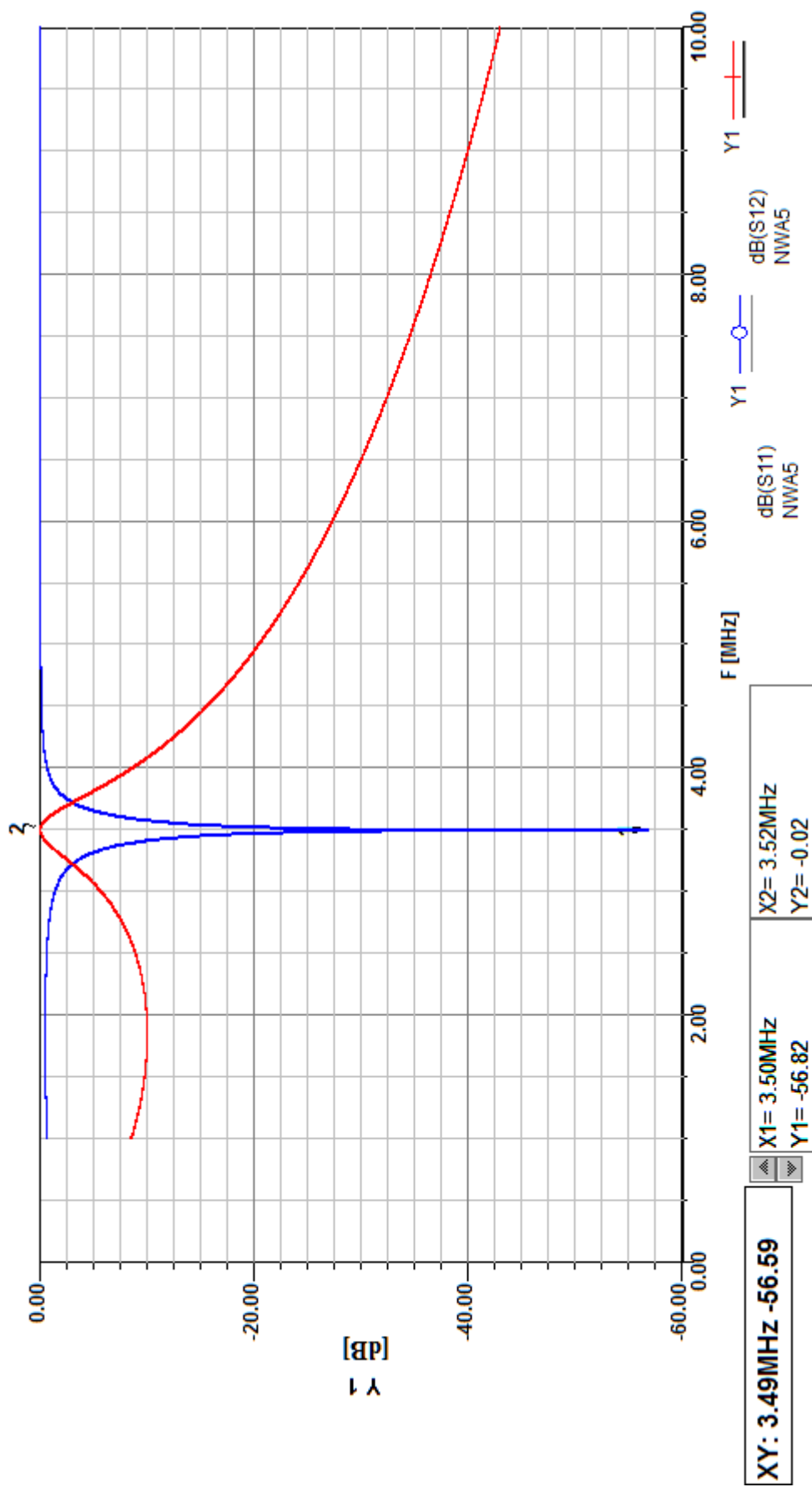
| Dynamická impedance Rd: [Ω] | Indukčnost cívky L v uH pro kmitočet: 28 MHz | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Volba Q obvodu: | | | | | | | | | |
| | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
| 400 | 0,835702 | 0,506933 | 0,358556 | 0,275799 | 0,223485 | 0,187588 | 0,161496 | 0,141705 | 0,126194 | 0,113718 |
| 600 | 1,253552 | 0,760399 | 0,537833 | 0,413699 | 0,335227 | 0,281382 | 0,242244 | 0,212557 | 0,18929 | 0,170577 |
| 800 | 1,671403 | 1,013866 | 0,717111 | 0,551598 | 0,44697 | 0,375176 | 0,322992 | 0,28341 | 0,252387 | 0,227436 |
| 1000 | 2,089254 | 1,267332 | 0,896389 | 0,689498 | 0,558712 | 0,468971 | 0,40374 | 0,354262 | 0,315484 | 0,284295 |
| 1200 | 2,507105 | 1,520799 | 1,075667 | 0,827397 | 0,670454 | 0,562765 | 0,484488 | 0,425114 | 0,378581 | 0,341154 |
| 1400 | | 1,774265 | 1,254944 | 0,965297 | 0,782197 | 0,656559 | 0,565236 | 0,495967 | 0,441678 | 0,398013 |
| 1600 | | 2,027732 | 1,434222 | 1,103196 | 0,893939 | 0,750353 | 0,645984 | 0,566819 | 0,504775 | 0,454872 |
| 1800 | | 2,281198 | 1,6135 | 1,241096 | 1,005681 | 0,844147 | 0,726732 | 0,637672 | 0,567871 | 0,511731 |
| 2000 | | 2,534665 | 1,792778 | 1,378995 | 1,117424 | 0,937941 | 0,80748 | 0,708524 | 0,630968 | 0,56859 |
| 2200 | | 2,788131 | 1,972055 | 1,516895 | 1,229166 | 1,031735 | 0,888228 | 0,779376 | 0,694065 | 0,625449 |
| 2400 | | 3,041598 | 2,151333 | 1,654794 | 1,340909 | 1,125529 | 0,968976 | 0,850229 | 0,757162 | 0,682308 |
| 2600 | | 3,295064 | 2,330611 | 1,792694 | 1,452651 | 1,219323 | 1,049724 | 0,921081 | 0,820259 | 0,739167 |
| 2800 | | | 2,509889 | 1,930593 | 1,564393 | 1,313118 | 1,130472 | 0,991934 | 0,883356 | 0,796026 |
| 3000 | | | 2,689166 | 2,068493 | 1,676136 | 1,406912 | 1,21122 | 1,062786 | 0,946452 | 0,852885 |
| 3200 | | | 2,868444 | 2,206392 | 1,787878 | 1,500706 | 1,291968 | 1,133638 | 1,009549 | 0,909744 |
| 3400 | | | 3,047722 | 2,344292 | 1,89962 | 1,5945 | 1,372716 | 1,204491 | 1,072646 | 0,966603 |
| 3600 | | | 3,227 | 2,482191 | 2,011363 | 1,688294 | 1,453464 | 1,275343 | 1,135743 | 1,023462 |
| 3800 | | | 3,406277 | 2,620091 | 2,123105 | 1,782088 | 1,534212 | 1,346196 | 1,19884 | 1,080321 |
| 4000 | | | 3,585555 | 2,75799 | 2,234848 | 1,875882 | 1,61496 | 1,417048 | 1,261936 | 1,13718 |
| 4200 | | | 3,764833 | 2,89589 | 2,34659 | 1,969676 | 1,695708 | 1,4879 | 1,325033 | 1,194039 |
| 4400 | | | 3,944111 | 3,033789 | 2,458332 | 2,063471 | 1,776456 | 1,558753 | 1,38813 | 1,250898 |

Tab.4 Optimalizační tabulka pro 28 MHz – L [uH].

Vypočítané hodnoty jsem ověřil simulací a výsledky jsou podle předpokladů. Přesnost výpočtu je dostatečná až do cca 50 MHz.



Obr.11 Schéma anodového obvodu s vypočítanými součástkami pro 3,5 MHz (schéma ze simulátoru).



Obr.12 Výsledek simulace anodového obvodu v pásmu 3,5 MHz (S11 a S12).

Literatura:

- [1] SYROVÁTKA, B. *Výkonová radiotechnika*. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně. 1997. ISBN 80-01-00980-7.
- [2] PROKEŠ, A. *Radiové přijímače a vysílače*. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně. 2008.
- [3] MAŠEK, V. *Přednášky z amatérské radiotechniky*. Učební text. URRS, Praha 1985.
- [4] KAVALÍR, T. *Výstupní PI - článek KV zesilovače jednoduše a bez matematiky*. Radioamatér. 2009. ISSN 1212-9100.
- [5] Program ke stažení na <http://ok1gth.nagano.cz/programy/pi%20clanek.xls>