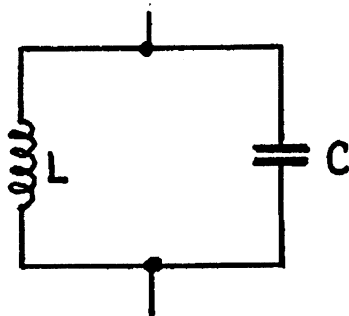


PŘÍSPĚVEK K VÝPOČTU REZONANČNÍCH OBVODŮ

Ing. Miroslav Beran

V rozhlasových přijímačích se nejčastěji setkáváme s **paralelními rezonančními obvody**, složenými s cívky o indukčnosti L a kondenzátoru o kapacitě C (viz obr. 1). Kondenzátor C bývá buď o pevné kapacitě, nebo s kapacitou **proměnnou**. V prvním případě je rezonanční obvod nalaďen na jeden kmitočet, jak je tomu např. u mezifrekvenčních transformátorů. Ve druhém případě je možno



Obr. 1.

pomocí kondenzátoru **měnit** v dosti širokých mezích rezonanční kmitočet., čehož je využíváno ve vstupních částech přijímačů. Je ovšem také možno měnit rezonanční kmitočet proměnnou indukčností. Tohoto způsobu se však v přijímačích používá jen vyjíměčně.

Rezonanční kmitočet f je dán vzorcem

$$f = \frac{159}{\sqrt{LC}} \quad (\text{MHz, } \mu\text{H, pF}) \quad [1]$$

Máme-li např. určit kmitočtový rozsah rezonančního obvodu, složeného z cívky o indukčnosti $200 \mu\text{H}$ a ladicího kondenzátoru o minimální kapacitě (včetně spojů) 50pF a maximální kapacitě 500pF , vypočteme nejdříve maximální kmitočet:

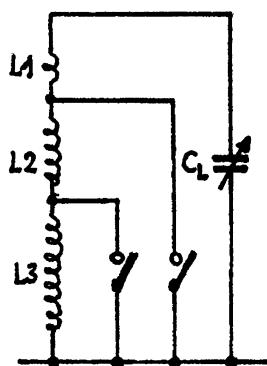
$$f_{\max} = \frac{159}{\sqrt{200 \cdot 50}} = \frac{159}{100} = 1,59 \text{ MHz} = 1590 \text{ kHz}$$

(tj. $300 : 1,59 = 188 \text{ m}$)

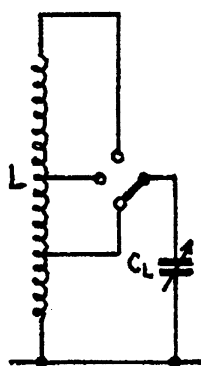
a potom kmitočet minimální:

$$f_{\min} = \frac{159}{\sqrt{200 \cdot 500}} = \frac{159}{316} = 0,5 \text{ MHz} = 500 \text{ kHz}$$

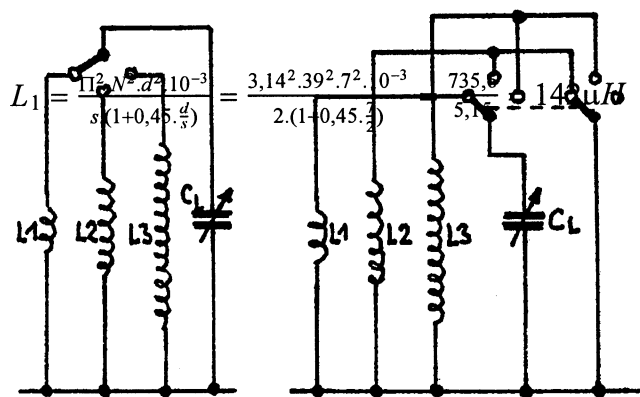
(tj. $300 : 500 = 600 \text{ m}$)



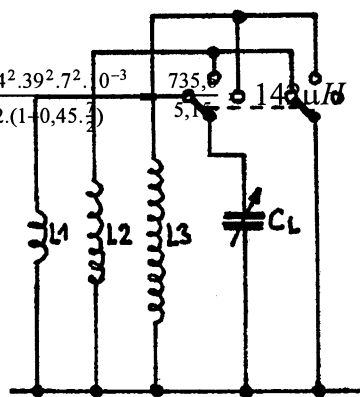
Obr. 2a.



Obr. 2b.



Obr. 3a.



Obr. 3b.

Můžeme tedy u přijímače **zjistit předem** jeho vlnové rozsahy prostým výpočtem, aniž bychom ho uváděli do provozu. K tomu se uchylujeme v případech, kdy vlnové rozsahy nejsou známy, nejsou na stupnici vyznačeny. Stačí tedy změřit indukčnosti a kapacitu ladicího kondenzátoru. Mohli bychom to ovšem provést i sacím měřičem kmitočtu, což je někdy dosti obtížné (zvláště u značně zanedbaných či poškozených přijímačů).

U **vícerozsahových přístrojů** je změna vlnového rozsahu provedena buď přepínáním odboček na společné cívce, nebo se do obvodu zapojují cívky samostatně (pomocí přepínače, nebo jsou cívky výměnné). V prvním případě (viz obr. 2) je možné několik variant zapojení, ve druhém (viz obr. 3) se obvykle cívka nezapojeného nižšího kmitočtového rozsahu spojuje živým koncem se zemí (jinak by při přeladování vznikaly sacím účinkem nezapojené cívky rezonanční díry).

Méně obvyklý způsob změny vlnového rozsahu spočívá v **paralelním spojování** dvou i více **cívek** (viz obr. 4). Tohoto způsobu bylo použito např. u přijímačů DKE (2 cívky) či u přijímačů Telefunken T9 (2 a 3 cívky). V tomto případě jde o paralelní spojování indukčností, pro které platí vztah

$$L_v = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (\mu\text{H, } \mu\text{H}) \quad [2]$$

avšak jen za předpokladu, kdy mezi spojovanými indukčnostmi není elektromagnetická vazba (cívky jsou umístěny v samostatných stínících krytech). Jinak je mezi cívkami tzv. **vzájemná indukčnost M**, která je dána vztahem

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 L_2} \quad (\mu\text{H, -, } \mu\text{H, } \mu\text{H}) \quad [3]$$

přičemž k je tzv. **činitel vazby**. Ten nabývá hodnot od $k < 0,01$ až $k > 0,9$. U válcových vzduchových cívek, vinutých v jedné vrstvě na společné kostře (válcí) je $k = 0,2$. Potom **výsledná indukčnost L_v** je dána vztahem

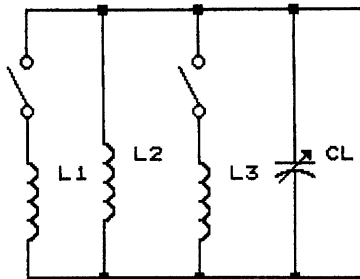
$$L_v = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M} \quad (\mu\text{H, } \mu\text{H}) \quad [4]$$

Znaménko minus ve jmenovateli platí v případě, kdy obě vinutí jsou spojena souhlasným směrem, jinak platí znaménko plus.

Indukčnost jednovrstvové válcové cívky vypočteme ze vzorce

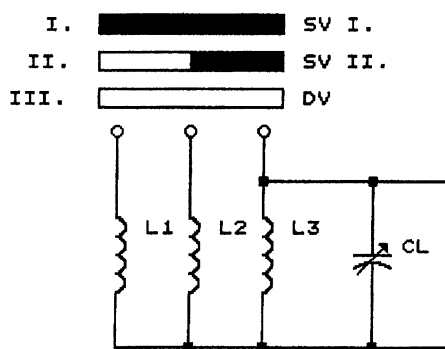
$$L = \frac{\pi^2 \cdot N^2 \cdot d^2 \cdot 10^{-3}}{s \cdot (1 + 0,45 \cdot \frac{d}{s})} \quad (\mu H, \text{ cm}) \quad [5]$$

příčměž N je počet závitů, d - průměr cívky, š - šířka vinutí (délka vinutí).



Obr. 4. Paralelní řazení L

Celou problematiku si ukážeme na konkrétním případě: **Příklad:** V přijímači Telefunken T9 (viz SN36) jsou laděné (mřížkové) cívky vinuty jednovrstvově na válcové pertinaxové kostře o \varnothing 7 cm. Cívka L1 má 39 závitů při šířce vinutí 2 cm, cívka L2 má 82 závitů při šířce 4,2 cm a L3 má 206 závitů při šířce 5,6 cm. Na rozsahu DV je zapojena pouze cívka L3, ke které se na rozsahu SV II připojuje paralelně cívka L2 a při rozsahu SV I ještě cívka L1 (v tomto případě jsou pak všechny tři cívky paralelně spojeny).



Výpočet indukčnosti jednotlivých cívek provedeme podle vzorce [5].

$$L_1 = \frac{3,14^2 \cdot 39^2 \cdot 7^2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot (1 + 0,45 \cdot \frac{7}{2})} = \frac{735,6}{5,15} = 142 \mu H$$

$$L_2 = \frac{3,14^2 \cdot 82^2 \cdot 7^2 \cdot 10^{-3}}{4,2 \cdot (1 + 0,45 \cdot \frac{7}{4,2})} = \frac{3552}{7,35} = 442 \mu H$$

$$L_3 = \frac{3,14^2 \cdot 206^2 \cdot 7^2 \cdot 10^{-3}}{5,6 \cdot (1 + 0,45 \cdot \frac{7}{5,6})} = \frac{20523}{8,736} = 2349 \mu H$$

Ve skutečnosti bylo naměřeno 142 resp. 445 resp. 2350 μH , což je shoda víc než dobrá. (Poznámka: Násobit výrazem 10^{-3} znamená vlastně dělit tisícem).

Výpočet výsledné indukčnosti pro rozsah II (SV II) při paralelním spojení cívek L2 a L3 začneme výpočtem vzájemné indukčnosti mezi cívkami L2 a L3 podle vzorce [3]:

$$M = k \cdot \sqrt{L_2 \cdot L_3} = 0,2 \cdot \sqrt{442 \cdot 2349} = 203,8 \mu H$$

Potom výslednou indukčnost dvojice L2//L3 vypočteme dle vzorce [4]:

$$L_2/L_3 = \frac{L_2 \cdot L_3 - M^2}{L_2 + L_3 - 2M} = \frac{442 \cdot 2349 - 203,8^2}{442 + 2349 - 2 \cdot 203,8} = 418,2 \mu H$$

(naměřeno 420 μH)

Výpočet výsledné indukčnosti pro rozsah I (SV I) při paralelním spojení všech tří cívek, kdy vlastně k dvojici cívek L2 a L3 přiřadíme ještě cívku L1, provedeme obdobným způsobem. Nejdříve opět vypočteme vzájemnou indukčnost - tentokrát mezi dvojicí L2//L3 a cívkou L1:

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2 // L_3} = 0,2 \cdot \sqrt{142 \cdot 418} = 48,76 \mu H$$

Potom výsledná indukčnost všech tří cívek bude:

$$L_V = \frac{L_1 \cdot L_2 // L_3 - M^2}{L_1 + L_2 // L_3 - 2M} = \frac{56979}{462,5} = 123 \mu H \quad (\text{naměř. } 125 \mu H)$$

Protože cívky jsou spojovány souhlasným směrem, použili jsme ve jmenovateli vzorce [4] znaménko minus.

Můžeme ještě **vypočítat šířku jednotlivých rozsahů** podle vzorce [1]. Ladicí kondenzátor v přijímači T9 má počáteční kapacitu spolu s kapacitami spojů pro rozsah I cca 70pF, pro rozsah II a III cca 60pF. Konečná využitelná kapacita je cca 500pF (s doladovači až 650pF). Pro **rozsah I (SV I)** bude [1]:

$$f_{\max} = \frac{159}{\sqrt{123 \cdot 70}} = 1,73 \text{ MHz} (= \frac{300}{1,73} = 174 \text{ m})$$

$$f_{\min} = \frac{159}{\sqrt{123 \cdot 500}} = 0,64 \text{ MHz} (= \frac{300}{0,64} = 468 \text{ m})$$

Pro **rozsah II (SV II)** bude:

$$f_{\max} = \frac{159}{\sqrt{418 \cdot 60}} = 1 \text{ MHz} (= \frac{300}{1} = 300 \text{ m})$$

$$f_{\min} = \frac{159}{\sqrt{418 \cdot 500}} = 0,35 \text{ MHz} (= \frac{300}{0,35} = 857 \text{ m})$$

Pro **rozsah III (DV)** bude:

$$f_{\max} = \frac{159}{\sqrt{2350 \cdot 60}} = 0,424 \text{ MHz} (= \frac{300}{0,424} = 707 \text{ m})$$

$$f_{\min} = \frac{159}{\sqrt{2350 \cdot 500}} = 0,15 \text{ MHz} (= \frac{300}{0,15} = 2000 \text{ m})$$

Vypočtené hodnoty odpovídají zhruba hodnotám naměřeným na dvou přístrojích T9W.

Pokud bychom použili přepínání vlnových rozsahů podle obr. 2a, pak na prvním rozsahu se uplatní indukčnost pouze cívky L1, kdežto cívky L2 a L3 jsou zkratovány na zem. Na druhém rozsahu pracují cívky L1 a L2 v sériovém spojení (L3 zkratována na zem). **Výsledná indukčnost sériově spojených cívek L1 a L2**, pokud je mezi nimi vzájemná magnetická vazba, nebude rovna prostému součtu jejich jednotlivých indukčností, ale musíme ještě vzít v úvahu jejich vzájemnou indukčnost M. Obecně platí:

$$L_v = L_1 + L_2 \pm 2M \quad (\mu\text{H}, \mu\text{H}) \quad [6]$$

příčemž znaménko plus před výrazem $2M$ platí v případě, že cívky jsou spojeny souhlasným směrem, jinak bychom použili znaménko minus.

Příklad: V přijímači Telefonen T31 (viz SN39) jsou na rozsahu SV II v sérii vinutí 3-4 a 4-5. Označme je L_1 a L_2 . Měřením jsme zjistili, že indukčnost $L_1 = 60 \mu\text{H}$ a $L_2 = 110 \mu\text{H}$. Jaká bude jejich výsledná indukčnost? Protože vinutí L_1 a L_2 jsou součástí celé SV cívky, vinuté jedním směrem (s odbočkami), je mezi nimi vzájemná indukčnost (činitel vazby odhadneme na 0,43) dle [3]:

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} = 0,43 \cdot \sqrt{60 \cdot 110} = 35 \mu\text{H}$$

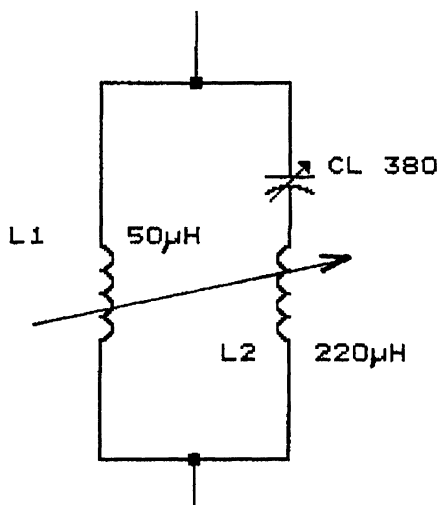
Potom výsledná indukčnost dle [6]:

$$L_v = L_1 + L_2 + 2M = 60 + 110 + 2 \cdot 35 = 170 + 70 = 240 \mu\text{H}$$

Tato hodnota byla skutečně naměřena - viz tabulka v SN39. Kdybychom k těmto cívkám připojili do série vinutí další, jehož indukčnost je $190 \mu\text{H}$, potom při $k = 0,56$ bude:

$$M[3] = 0,56 \cdot \sqrt{240 \cdot 190} = 120 \mu\text{H}$$

$L_v[6] = 240 + 190 + 2 \cdot 120 = 430 + 240 = 670 \mu\text{H}$ což opět odpovídá hodnotám naměřeným.



Zajímavé zapojení rezonančního obvodu je např. u přijímače Modrý bod VII (viz SN38). Je to vlastně **obvod se dvěma rezonančními kmitočty**: paralelním f_p a sériovým f_s . Obě cívky jsou ploché, voštinového typu. L_2 je pevná, L_1 je výklopná souběžně s L_2 . Vazba mezi cívkami je tedy proměnná. Cívky jsou vinuty souhlasným směrem.

Paralelní rezonanční obvod je tvořen celkovou indukčností L_v a kapacitou ladicího kondenzátoru CL . Paralelní kmitočet f_p vypočteme běžným způsobem podle vzorce [1], celkovou indukčnost L_v podle vzorce [6] a vzájemnou indukčnost podle vzorce [3].

V našem případě, kdy L_1 se kryje s L_2 (L_1 není vyklopena) a tudíž vazba cívek je nejtěsnější ($k = 0,4$), bude:

$$M[3] = 0,4 \cdot \sqrt{50 \cdot 220} = 42 \mu\text{H}$$

$$L_v[1] = L_1 + L_2 + 2M = 50 + 220 + 2 \cdot 42 = 354 \mu\text{H}$$

Při **minimální** kapacitě $CL = 32 \text{pF}$ bude:

$$f_{p\max}[1] = \frac{159}{\sqrt{354 \cdot 32}} = 1,5 \text{MHz} = 200 \text{m}$$

kdežto při **maximální** kapacitě $CL = 380 \text{pF}$ plus kapacitě spojů cca 10pF bude:

$$f_{p\min}[1] = \frac{159}{\sqrt{354 \cdot 390}} = 0,428 \text{MHz} = 700 \text{m}$$

Odpovídá tedy vlnový rozsah údají, uvedeném na kupléru přijímače.

Kdybychom cívku **L_1 vyklopili**, čímž by se činitel vazby snížil na cca $k = 0,2$, nastal by posun vlnového rozsahu směrem ke kratším vlnám (vyšším kmitočtům). Byl by 188,6 až 658 m, o čemž se můžeme přesvědčit výpočtem. Toto posunutí vlnového rozsahu vzhledem k malé selektivitě není na závadu.

Rezonanční sériový obvod je tvořen indukčností L_2 a kapacitou ladicího kondenzátoru CL . Tento obvod je vlastně paralelním odlaďovačem (je připojen paralelně k obvodu L_v, CL). Jeho impedance je při rezonanci (vyladění) rovna ohmickému odporu cívky, tedy pro vyladěnou frekvenci f_s je prakticky zkratem, je odladěna.

Sériový kmitočet f_s vypočteme opět podle vzorce [1], a to jak pro minimální, tak i pro maximální kapacitu CL :

$$f_{s\max}[1] = \frac{159}{\sqrt{L_2 \cdot C_{\min}}} = \frac{159}{\sqrt{220 \cdot 32}} = 1,89 \text{MHz} = 159 \text{m}$$

$$f_{s\min}[1] = \frac{159}{\sqrt{L_2 \cdot C_{\max}}} = \frac{159}{\sqrt{220 \cdot 390}} = 0,54 \text{MHz} = 556 \text{m}$$

Je tedy f_s vždy vyšší, než f_p , obecně

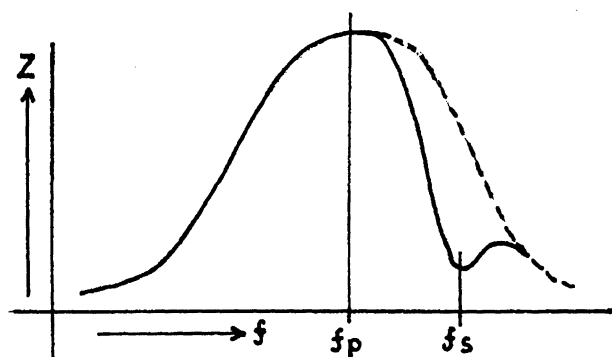
$$\Delta f = f_s - f_p \quad (\text{Hz}, \text{Hz}) \quad [7]$$

V prvním případě (CL_{\min}) je $\Delta f = 1,89 - 1,5 = 0,39 \text{MHz}$, ve druhém (CL_{\max}) je $\Delta f = 0,54 - 0,428 = 0,11 \text{MHz}$. Při vyklopení cívky L_1 je pak rozdíl kmitočtů Δf menší a činí 0,3 MHz resp. 0,084 MHz. Jak vidíme, jsou rozdíly kmitočtů Δf na začátku vlnového rozsahu (při vyšších frekvencích) větší, než na jeho konci, avšak vždy odlaďovaný kmitočet (pásmo) je od přijímaného směrem k vyšším kmitočtům (kratším vlnám).

Jsou tedy **odlaďovány** stanice směrem k **vyšším** kmitočtům oproti stanicím vyladěným, což lépe vyhovovalo tehdejšími jednoduchými přijímačům, které byly citlivější na vyšších kmitočtech. Jinými slovy - rušící stanice více rušila příjem vyladěné stanice, pokud se od ní nacházela směrem k vyšším kmitočtům (kratším vlnám).

Poměrně velké **rozdíly** mezi přijímaným a odlaďovaným kmitočtem (na začátku středovlnného rozsahu cca 0,4 MHz, na konci cca 0,1 MHz) vyhovovaly poměrně ploché rezonanční křivce přijímače a také frekvenčnímu odstupu místních vysílačů, který byl dosti značný. Jinak by se totiž místní stanice na tehdejších primitivních přijímačích nedaly od sebe odladit.

Výsledná **impedance** celého **složeného obvodu** vypadá přibližně takto:



Čárkovaně je naznačen průběh impedance bez sériového obvodu, kdy nedochází k odlaďování rušícího kmitočtu. (Čím vyšší impedance Z, tím silnější příjem a naopak).

Poznámka: Vzorec [1] je upravený **Thomsonův vzorec**, jehož obecný tvar je

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{Hz, H, F})$$

který pro běžné jednotky má tvar

$$f^2 = \frac{25330}{LC} \quad (\text{MHz, } \mu\text{H, pF})$$

a po odmocnění dostaneme výše zmíněný vzorec [1].