

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Dolní propust pro koncový zesilující stupeň na kmitočtu  
144.3 MHz  
Low-pass Filter for Power Amplifier on 144.3 MHz**

**2014**

**Marek Vašut**

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Marek Vašut**

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Dolní propust pro koncový zesilující stupeň na kmitočtu 144.3 MHz.  
Low-pass Filter for Power Amplifier on 144.3 MHz

Zásady pro vypracování:

Koncové stupně radioamatérských vysílačů jsou mnohdy konstruovány s větší kmitočtovou šířkou než je požadované radioamatérské pásmo. Provoz takového koncového stupně způsobuje rušení na okolních pásmech. Práce má za cíl navrhnout a sestavit funkční dolní propust na zadaném kmitočtu.

Vypracování práce bude splňovat následující body zadání:

1. Popište základní typy vysokofrekvenčních filtrů.
2. Navrhněte dolnofrekvenční propust pro požadovaný kmitočet.
3. Sestrojte dolní propust na kmitočet 144.3 MHz a výkon 200 W (včetně patřičného odstínění).
4. Ověřte správnost návrhu a konstrukce měřením.

Seznam doporučené odborné literatury:

BALANIS, Constantine. *Antenna Theory : Analysis and design*. 3rd edition. United States : Wiley, 2005. 1117 s. ISBN 0-471-66782-X.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *1. května 2014*



.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Marku Dvorskému, Ph.D. za velmi cenné rady, čas a odbornou pomoc při zpracování bakalářské práce a také své rodině za podporu při studiu.

## **Abstrakt**

Hlavním cílem bakalářské práce je návrh a následné sestavení funkční dolní propusti na kmitočtu 144,3MHz. V práci je uvedena teorie kmitočtových filtrů, kde jsou uvedeny základní typy kmitočtových filtrů, jejich použití v praxi, způsob realizace a řád přenosové funkce. Další část se zabývá návrhem a realizací filtru. Jsou zde popsány cívky, konstrukční kondenzátory, konektory typu „N“ a v neposlední řadě je celá dolní propust schovaná do konstrukční odstíněné krabičky. Výsledná dolní propust bude použita v radioklubu OK2KQM & OK6A, který sídlí na Vysoké škole báňské – Technické univerzity Ostrava.

## **Klíčová slova**

Dolní propust, butterworthova aproximace, toleranční pole

## **Abstract**

The main aim of bachelor work is proposal and create low-pass filter for 144,3MHz. In bachelor work is introduced theory of frequency filters, basic types of frequency filters and use low-pass filters in practice. The next part is designed and realized low-pass filter. There are coils from copper, structural capacitors and connector of type „N“. After that, low-pass filter is inserted to shielded box. Low-pass filter will be used in radio club at VŠB-Technical University of Ostrava.

## **Key words**

Low-pass Filter, butterworth approximation, tolerance zone

**Seznam použitých symbolů**

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$E_p$	$kV \cdot mm^{-1}$	Elektrická pevnost
$U_p$	V	Průrazné napětí
$d$	mm	Tloušťka dielektrika
$C$	F	Kapacita kondenzátoru, obsah průřezu cívky
$\epsilon_0$	$Fm^{-1}$	Permitivita vakua
$\epsilon_r$	-	Relativní permitivita
$\mu_0$	$H \cdot m^{-1}$	Permeabilita prostředí
$S$	mm	Plocha kondenzátoru
$L$	H	Indukčnost cívky
$N$	-	Počet závitů
$l$	mm	Délka cívky
$r$	mm	Poloměr kondenzátoru
$d$	mm	Průměr kondenzátoru

---

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
<b>DP</b>	Dolní propust
<b>DPn</b>	Normovaná dolní propust
<b>F<sub>M</sub></b>	Mezní kmitočet dolní propusti
<b>F<sub>P</sub></b>	Mezní kmitočet potlačení přenosu dolní propusti
<b>F<sub>PN</sub></b>	Normovaný kmitočet potlačení
<b>K<sub>ZVL</sub></b>	Zvlnění přenosu v propustném pásmu
<b>K<sub>POT</sub></b>	Potlačení přenosu v nepropustném pásmu
<b>K<sub>U</sub></b>	Přenos napětí
<b>φ</b>	Fázový posuv

---



## Obsah

Úvod.....	- 10 -
1 Kmitočtové filtry.....	- 11 -
1.1 Použití kmitočtových filtrů.....	- 11 -
1.2 Základní typy filtrů.....	- 11 -
1.2.1 Porovnání pasivních a aktivních filtrů.....	- 13 -
1.2.2 Způsob realizace kmitočtových filtrů.....	- 13 -
1.2.3 Rozdělení podle stavebních prvků.....	- 13 -
1.3 Přenosové vlastnosti filtrů.....	- 14 -
1.4 Řád přenosové funkce filtru.....	- 16 -
1.5 Toleranční pole.....	- 16 -
1.6 Základní typy aproximací.....	- 17 -
1.6.1 Další typy aproximací.....	- 17 -
1.6.2 Průběhy přenosových funkcí základních typů aproximací.....	- 17 -
2 Postup při návrhu dolní propusti.....	- 20 -
2.1 Teoretický návrh filtru.....	- 20 -
2.1.1 Stanovení tolerančního pole.....	- 20 -
2.1.2 Normovaná dolní propust.....	- 21 -
2.1.3 Návrh filtru s Butterworthovou aproximací.....	- 21 -
2.2 Ověření návrhu filtru v simulačním programu SNAP.....	- 23 -
2.3 Praktický návrh filtru.....	- 25 -
2.3.1 Návrh a výroba kondenzátorů.....	- 25 -
2.3.2 Výroba cívek.....	- 28 -
2.3.3 Sestrojení filtru.....	- 28 -
2.3.4 Náklady na výrobu filtru.....	- 29 -
3 Ověření správnosti návrhu a konstrukce měřením.....	- 31 -
Závěr.....	- 34 -
Použitá literatura.....	- 35 -
Seznam příloh.....	- 36 -

## Úvod

Existuje mnoho kmitočtových filtrů, které můžeme vidět v různých oblastech elektrotechniky a elektroniky. Používají se již přes 80 let a to v oblastech jako je například radiotechnika, telekomunikace, audio technika apod. Při realizaci kmitočtových filtrů se používají různé diskrétní prvky, od kterých se odvíjí celková cena. Většinou dáváme přednost profesionální výrobě filtrů, ale jestliže máme vlastní požadavky, musíme si navrhnout a vyrobit filtr podle našich představ z jednotlivých diskrétních prvků.

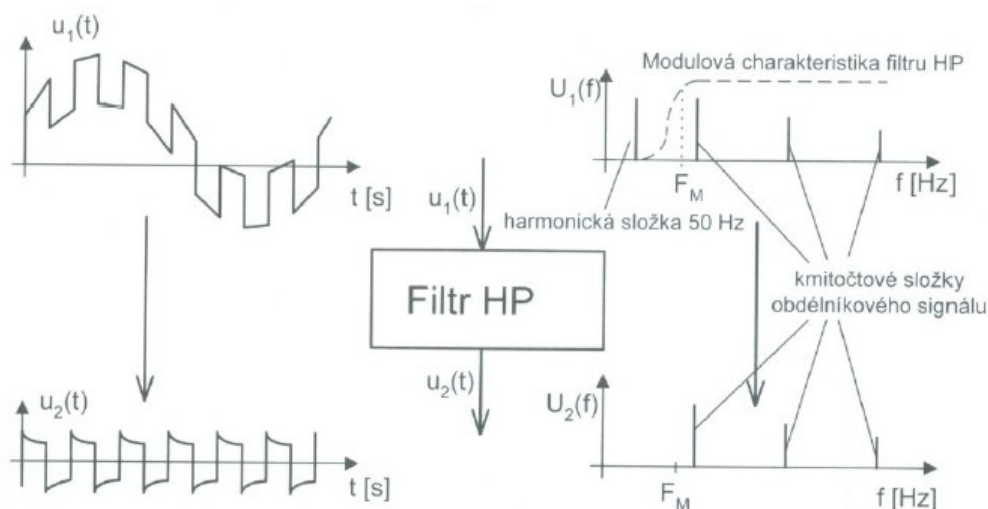
Bakalářská práce podává přehled o návrhu a sestavení funkční dolní propusti na kmitočtu 144.3 MHz (radioamatérské pásmo). Cílem bylo seznámení kmitočtových filtrů, návrh dolnofrekvenční propusti a následné sestrojení filtru.

Práce je rozdělena na několik částí. První část je teoretická. Popisuje použití jednotlivých filtrů, základní typy a způsoby realizace filtrů. Druhá část je zaměřena na teoretický a praktický návrh dolní propusti. Je zde zmíněno stanovení tolerančního pole, výpočet skutečných hodnot diskrétních prvků, volba typu zapojení a jeho sestrojení. Dále se tato část zabývá ověřením návrhu v simulačním programu SNAP, výroba kondenzátorů, cívek a nakonec sestrojení výsledné dolní propusti.

Poslední kapitola je věnována měřením dolní propusti pomocí vektorového analyzátoru, ověření správnosti návrhu a konstrukce měření. Zde budou také zobrazovány grafy a hodnoty.

# 1 Kmitočtové filtry

Kmitočtové filtry jsou lineární elektrické obvody neboli dvojbrany používané v mnoha oblastech radiotechniky, telekomunikací apod. Základní princip spočívá ve výběru (selekcii) kmitočtových složek procházejícího signálu filtrem. Podle typu filtru jsou některé kmitočtové složky propouštěny bez útlumu (jedná se o propustné pásmo) a jiné kmitočtové složky jsou potlačeny (útlum, nepropustné pásmo). Tyto vlastnosti jsou znázorňovány modulovou kmitočtovou charakteristikou. Procházející signál filtrem je obvykle důvodem k časovému zpoždění signálu. Důsledkem je fázový posuv (zpoždění) neboli fázová kmitočtová charakteristika [1].



Obr.1.1: Příklad výběru kmitočtových složek signálu filtrem [1]

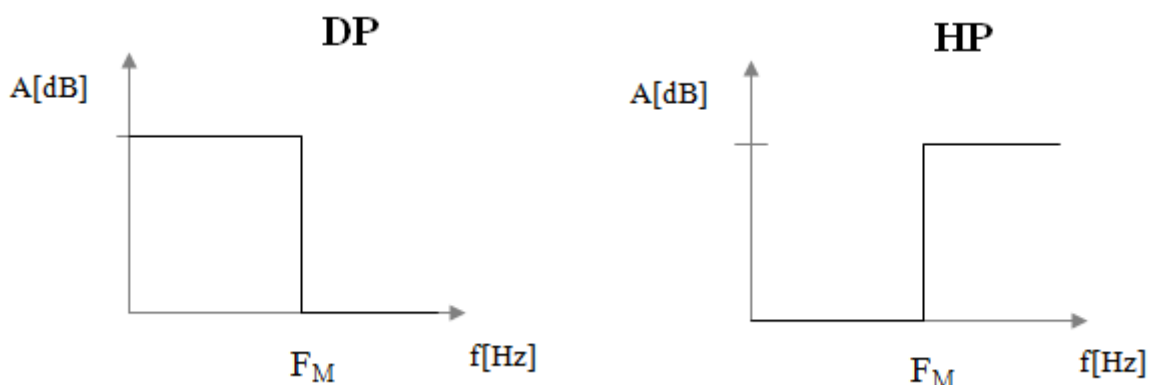
## 1.1 Použití kmitočtových filtrů

Kmitočtové filtry se v oblasti elektrotechniky používají obvykle ve všech případech při zpracování signálu. V radiotechnice se často používají pásmové propusti pro výběr určitého signálu, dolní a horní propusti pro oddělení kmitočtů, které například mohou tvořit kmitočtové výhybky pro reproduktorovou soustavu. Pro akustická měření se používají váhové filtry, kde se měří úroveň akustického signálu (vnímání lidského ucha). Další oblastí je měřicí technika, telekomunikace, regulační technika, audio technika apod. Zpravidla lze říct, že filtry jsou ve velké míře v této oblasti zastoupeny [1].

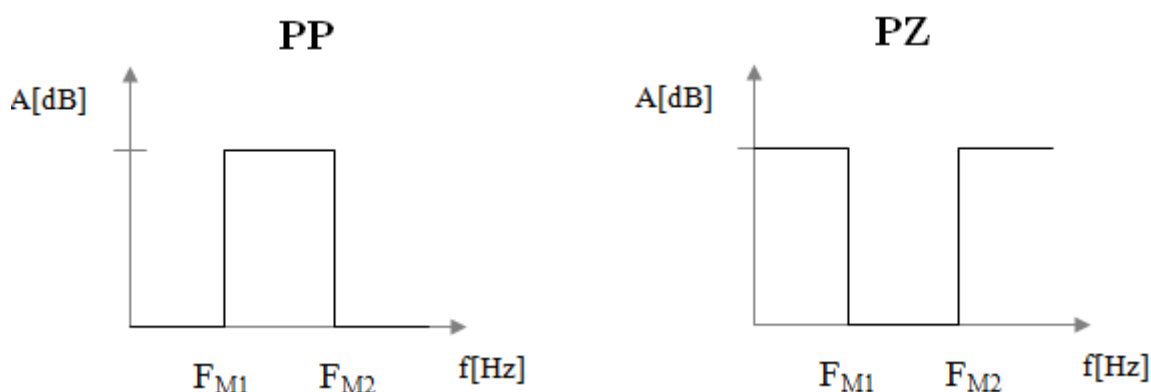
## 1.2 Základní typy filtrů

V úvodu bylo zmíněno několik filtrů, které propouštějí určitou část frekvenčního pásma a jinou část potlačují. Podle způsobu, zda filtr propouští nebo zadržuje část kmitočtového pásma, neboli filtrace kmitočtů rozlišujeme čtyři základní typy filtrů.

- Dolní propust (DP) propouští nízké kmitočty od nuly až po zlomový kmitočet  $F_M$  a od zlomového kmitočtu dál potlačuje vyšší kmitočty
- Horní propust (HP) propouští od zlomového kmitočtu  $F_M$  vyšší kmitočty a potlačuje nízké frekvence od nulového až po zlomový kmitočet. Filtr funguje opačně jako dolní propust.
- Pásmová propust (PP) propouští pouze určitou část kmitočtového pásma mezi dolním a horním zlomovým kmitočtem. Nízké a vysoké kmitočty, které jsou mimo tohoto vymezeného pásma, se potlačují.
- Pásmová zádrž (PZ) pracuje na opačném principu než pásmová propust. Zadržuje kmitočty mezi dolním a horním zlomovým kmitočtem a propouští pouze kmitočty ležící mimo tohoto pásma.



Obr.1.2 Ideální filtr typu dolní a horní propusti



Obr.1.3: Ideální filtr typu pásmová propust a pásmová zádrž

### 1.2.1 Porovnání pasivních a aktivních filtrů

**Pasivní filtry.** Pasivní filtry jsou starší než aktivní filtry a používaly se do doby, než se objevil první tranzistor. Jsou použity pouze diskrétní součástky (kondenzátory, cívky, odpory). Výhodou je jednoduchý návrh pomocí tabelovaných hodnot normovaných dolních propustí a není nutný žádný napájecí zdroj. Nevýhodou je použití filtru pro nízké kmitočty (nižší než desítky kHz), protože hodnoty indukčnosti vycházejí obrovské. To vede k tomu, že cívky jsou velké a zabírají mnoho místa. Nepříjemným faktorem jsou vzájemné indukční vazby, které vznikají mezi cívkami. Použití odstíněných krytů nebo patřičnou polohou cívek (cívky jsou vzájemně kolmé), lze tomuto faktoru předejít. Pracují ve vysokých kmitočtech (až do 200MHz), potom se při vyšších kmitočtech uplatňují parazitní parametry diskrétních prvků. Na vstupu a výstupu musí být zapojeny odpory, jinak jsou kmitočtové charakteristiky jiné než ty požadované [2].

**Aktivní filtry.** Princip aktivních filtrů je znám už několik desetiletí, ale jejich realizace byla možná, až se objevily polovodičové součástky (tranzistory, operační zesilovače). Místo cívek se používají rezistory, kondenzátory a už zmíněné operační zesilovače. Díky vyřazení cívek lze docílit sestavení filtrů malých rozměrů. Aktivní filtry se používají na kmitočtovém pásmu přibližně 0,1 Hz až 100kHz. Uplatnění je tedy na nízkých kmitočtech, kde indukčnosti vycházejí obrovské a bez použití cívek jsou filtry v této oblasti realizovatelné a dosahují malých rozměrů. Dnešní pokrok v technologii umožňuje použití aktivních filtrů na vyšších kmitočtech (v řádu jednotky MHz). Výhodou těchto filtrů je jednodušší změna nastavení hodnot rezistorů. Nevýhodou je složitější návrh, náročnější zapojení a potřeba napájecího zdroje, bez kterého by aktivní prvek nepracoval [2].

### 1.2.2 Způsob realizace kmitočtových filtrů

Kmitočtové filtry lze realizovat libovolnými způsoby. Dělí se orientačně do tří skupin [1]:

- Realizace z diskrétních prvků. Používají se rezistory, kondenzátory, cívky, operační zesilovače). Filtr lze realizovat podle svých představ.
- Realizace v integrovaném obvodu. Jedná se o propojení jednotlivých součástek, které společně tvoří elektrický obvod. Výhodou jsou malé rozměry a nízká cena. Nelze si filtr upravit podle svých nároků a musí se dodržovat podmínky zapojení podle výrobce, což jsou hlavní nevýhody této realizace.
- Realizace s číslicovými filtry. Číslicová interpretace signálu se matematicky upravuje tak, aby výsledný signál měl po zpětném převodu shodné nebo lepší vlastnosti jako po průchodu normálním kmitočtovým filtrem.

### 1.2.3 Rozdělení podle stavebních prvků

- Filtry RC jsou jednoduché a výhodou je malá cena rezistorů a kondenzátorů. Nevýhoda je poměr cena/výkon. Nelze očekávat dobré výsledky. V praxi se používají filtry prvního a druhého řádu.

- Filtry RLC jsou používány v kmitočtové oblasti od 100kHz do 300MHz. Nevýhodou je použití filtru pro vyšší kmitočty, kde se zřetelně uplatňují parazitní parametry diskrétních prvků. Naopak pro nízké kmitočty (řadové jednotky kHz) vycházejí indukčnosti obrovské, což vede k velkým a těžkým cívkám [1].
- Mikrovlnné filtry jsou podobné jako RLC filtry ale s rozdílem, že pracují v oblasti mikrovln (od 300MHz výše), kde se používají vlnovody, koaxiální vedení místo pasivních prvků (R, L, C) [1].
- Filtry ARC patří do skupiny aktivních prvků. Používají rezistory, kondenzátory a operační zesilovače. Cívky se zde neuplatňují z důvodu rozměrů a velkých indukčností. Pracují v kmitočtovém pásmu zhruba od 0,1 Hz do 100 kHz. Výhodou je snadná změna hodnot odporů a kondenzátorů. Naopak hlavní nevýhodou je nutnost napájení aktivních prvků (převážně operační zesilovač) [1].
- Filtry ASC používají přepínané kondenzátory místo rezistorů. Vyrábí se také jako integrované obvody. Mezní kmitočet je určen spínacím kmitočtem a lze je snadno ladit.
- Elektromechanické filtry převádí elektrický signál na mechanický, kde dochází k mechanické rezonanci a zpětného převodu mechanického signálu na elektrický. Dnes jsou nejčastěji používané piezokeramické filtry.

### 1.3 Přenosové vlastnosti filtrů

Na obr. 1.4 je zapojen dvojbran, který je připojen ke zdroji harmonického signálu. Projde-li harmonický signál s amplitudou  $U_1$ , kmitočtem  $f_1$  a fází  $\varphi_1$ , získáme na výstupu filtru signál se stejným kmitočtem, ale se změnou amplitudy a fáze.



Obr.1.4: Zapojení filtru jako dvojbran [1]

Přenos napětí  $K_U$  lze pro daný kmitočet  $f$  vyjádřit komplexním výrazem.

$$K_u = K_u * e^{j\varphi} = \frac{U_2 e^{j\varphi_2}}{U_1 e^{j\varphi_1}} \quad (1.1)$$

Kde tento přenos rozdělíme na reálnou a imaginární část. Častěji se používá vyjádření přenosu pomocí modulu a argumentu.

$$K_u = \frac{U_2}{U_1}, \quad \varphi = \varphi_2 - \varphi_1, \quad (1.2)$$

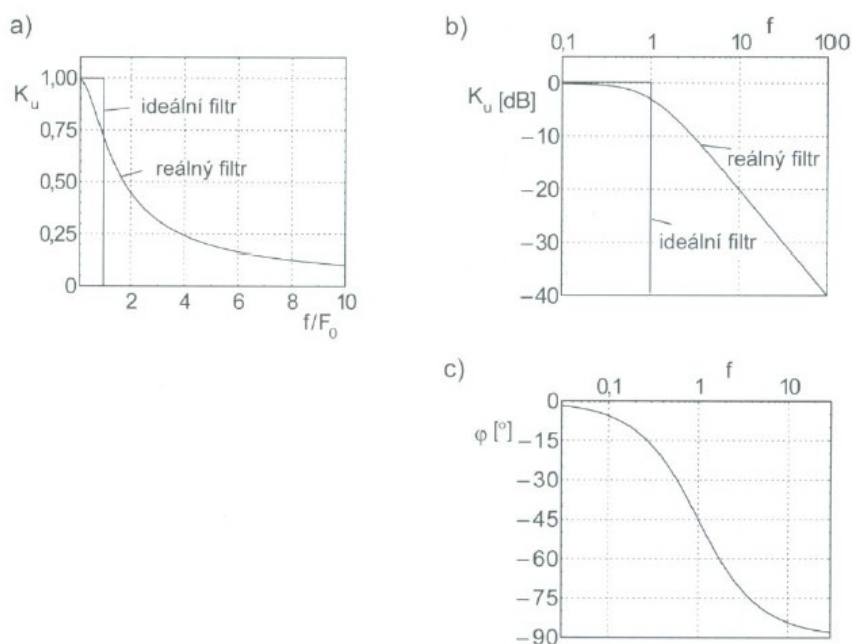
Kde modul  $K_u$  je poměr amplitud výstupního a vstupního signálu a argument  $\varphi$  je rozdíl fází výstupního signálu  $\varphi_2$  a vstupního signálu  $\varphi_1$ .

Nevýhoda je, že modul a argument přenosu lze vypočítat jen pro konkrétní kmitočet harmonického signálu  $\omega$ . Výhodnější je vyjádření přenosových vlastností jako funkce kmitočtů, kde pro každý kmitočet můžeme vypočítat odpovídající přenos.

Přenosová funkce má nejčastější tvar racionální lomené funkce [1].

$$K(j\omega) = \frac{a_m(j\omega)^m + a_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + a_1j\omega + a_0}{b_n(j\omega)^n + b_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_1j\omega + b_0} \quad (1.3)$$

Kde řád polynomu čitatele  $m$  je menší nebo rovno řádu jmenovatele  $n$  ( $m \leq n$ ). Řád jmenovatele  $n$  neboli řád funkce bude na následující straně podrobněji popsána. Funkci lze rozdělit na modulovou a argumentovou část. Pokud obě části vyneseme v závislosti na kmitočtu, značíme je jako modulová charakteristika  $K(\omega)$  a argumentová kmitočtová charakteristika  $\varphi(\omega)$ . Často se můžeme setkat v různých literaturách pod pojmem amplitudová a fázová kmitočtová charakteristika. Na obr. 1.5 vidíme kmitočtové charakteristiky pro ideální a reálný filtr dolní propusti.



Obr.1.5: a) amplitudová kmitočtová charakteristika v lineárním měřítku, b) amplitudová kmitočtová charakteristika v logaritmickém měřítku, c) fázová kmitočtová charakteristika [1]

## 1.4 Řád přenosové funkce filtru

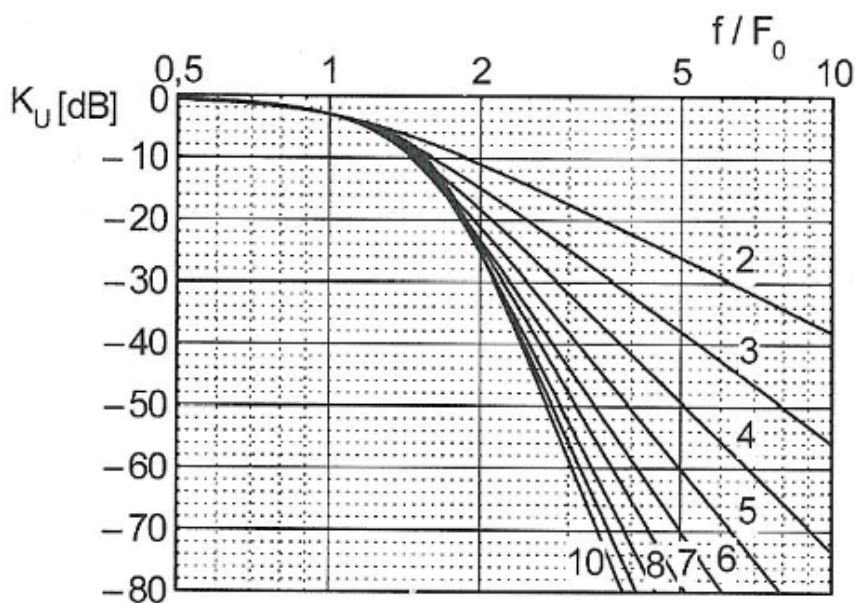
Na předchozí straně byla uvedena přenosová funkce ve tvaru racionální lomené funkce.

$$K(j\omega) = \frac{a_m(j\omega)^m + a_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + a_1j\omega + a_0}{b_n(j\omega)^n + b_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_1j\omega + b_0} \quad (1.4)$$

Nejvyšší mocnina  $n$  je řád funkce, která při realizaci filtru určuje počet diskrétních prvků (kondenzátory, cívky). V našem případě při realizaci naší dolní propusti je řád funkce  $n=7$ , což je součet jednotlivých kondenzátorů a cívek.

Na obr. 1.6 lze vidět filtr typu dolní propust, kde je znázorněna přenosová funkce pro řád  $n=3$ . Čím vyšší řád, tím vyšší je strmost přenosové funkce a charakteristika se blíží k ideálnímu filtru. Zmenšuje se také pásmo, které leží mezi propustným a nepropustným pásmem.

Je zřejmé, že čím větší řád (větší počet kondenzátorů a cívek), tím se zvyšuje jeho cena a nároky na sestavení filtru. Řád přenosové funkce musí být vždy kladné celé číslo a zaokrouhluje se na nejbližší vyšší číslo.



Obr. 1.6: Řády přenosové funkce [1]

## 1.5 Toleranční pole

Při návrhu filtru je důležité znát pojem toleranční pole. Toleranční pole definuje propustné a nepropustné pásmo a uprostřed vymezeného pásma musí ležet výsledná kmitočtová charakteristika. V propustném pásmu se objevují určitá zvlnění, která nesmí přesahovat požadovanou mez. Propustné pásmo určují parametry  $K_{ZVL}$  a mezní kmitočet  $F_M$ . Nepropustné pásmo je určováno kmitočtem meze potlačení  $F_P$  a potřebného potlačení přenosu  $K_{POT}$ .



Parametr  $K_{ZVL}$  se v některé literatuře označuje jako  $K_{MAX}$ ,  $A_{MAX}$  a parametr  $K_{POT}$  jako  $K_{MIN}$ ,  $A_{MIN}$ . Jelikož toto označení není přesné pro náš návrh, budou v této bakalářské práci použity termíny  $K_{ZVL}$  a  $K_{POT}$ .

### 1.6 Základní typy aproximací

Pro zadané toleranční pole je nutné nalézt přenosovou funkci. Jediný problém je, že jde o velmi složitý matematicky problém, který spočívá v nalezení koeficientů přenosové funkce tak, aby splňovala zadané toleranční pole. Existuje mnoho řešení k nalezení těchto koeficientů. V praxi se často používají základní typy aproximací. Nejčastěji používané standardní aproximace jsou následující [1]:

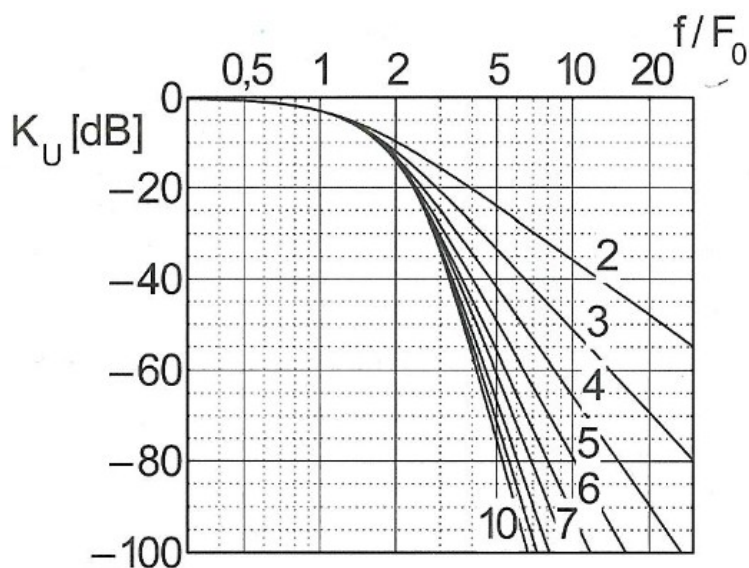
- Besselova aproximace: Často se uvádí jako Thomsonova aproximace.
- Butterworthova aproximace: Patří mezi nepoužívanější aproximace.
- Čebyševova aproximace: V propustném pásmu dochází ke zvlnění. Přenosová funkce je strmější než u Butterworthovy aproximace. Použití pro nízké řády filtru.
- Causerova aproximace: Dosahuje nejstrmějších charakteristik. V propustném pásmu dochází ke zvlnění přenosové funkce.
- Inverzní Čebyševova aproximace: Obdobná strmost charakteristiky jako Čebyševova aproximace. Rozdíl je v propustném pásmu, kde dochází ke zvlnění.

#### 1.6.1 Další typy aproximací

- Gaussova aproximace
- Kasteleinova aproximace
- Legendrova aproximace
- Tranzitivní aproximace TICFU
- Tranzitivní Besselova-Butterworthova aproximace
- Umocněné kosinové aproximace

#### 1.6.2 Průběhy přenosových funkcí základních typů aproximací

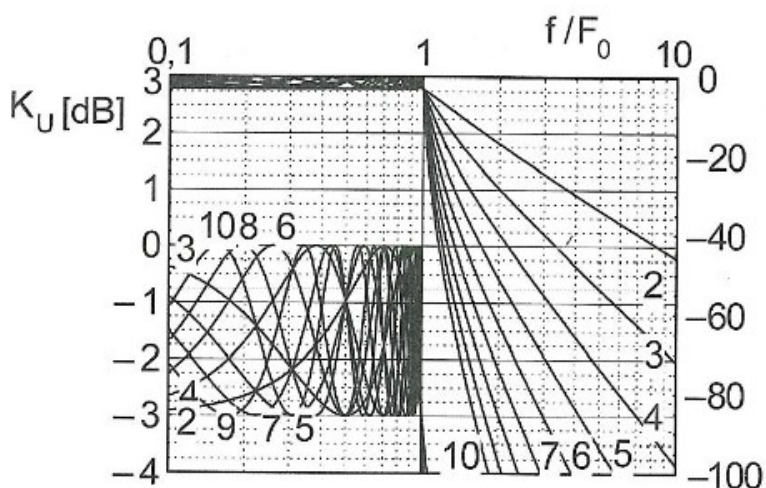
Besselova aproximace (Thomsonova) je v praxi většinou určena pro situace, kde je zapotřebí zachování tvaru průchozího signálu. Výhodné je použití této aproximace pro filtraci kmitočtově a fázově modulovaných signálů. Hlavní nevýhoda je, že má nejmenší strmost přenosové funkce ze všech zde uvedených aproximací. Na obr. 1.7 je zobrazen průběh přenosové funkce této aproximace. Je také dobré znát, že výsledný řád kmitočtového filtru lze určit z toho grafu. Například pro normovaný kmitočet potlačení  $F_{PN} = 10$  a potlačení přenosu  $K_{POT} = 80\text{dB}$  lze odečíst 6 řád přenosové funkce.



Obr.1.7: Besselova aproximace pro jednotlivé řády [1]

Čebyševova aproximace dosahuje téměř nejstrmějších charakteristik ze všech typů aproximací. Má dostatečné potlačení přenosu i při nízkém řádu kmitočtového filtru. Je charakteristická tím, že má v propustném pásmu přenosovou funkci zvlněnou (izoextremální). Hlavní nevýhodou je větší nelinearita fázové charakteristiky a odpovídající větší odchylky skupinového zpoždění. Řád přenosové funkce lze určit podle následujícího vztahu [1]:

$$n \geq \frac{\arccos h \left( \sqrt{\frac{K_{PQT} - 1}{10^{\frac{K_{ZVL}}{10}} - 1}} \right)}{\arccos h(F_{Pn})} \quad (1.5)$$

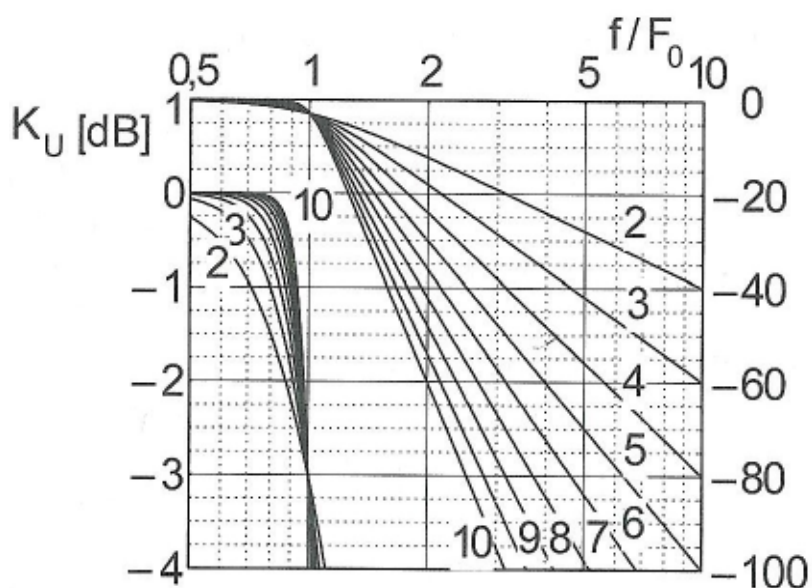


Obr.1.8: Čebyševova aproximace se zvlněním 3dB pro jednotlivé řády [1]

Butterworthova aproximace patří mezi nejpoužívanější ze všech typů standardních aproximací. Požadované zvlnění v propustném pásmu je 3 dB. Označuje se jako monotónní maximálně plochá aproximace. Pro výpočet řádu filtru lze použít následující vztah [1].

$$n \geq \frac{\log \left( \frac{K_{POT}}{K_{ZVL}} \right)}{2 * \log F_{DPn}} \quad (1.6)$$

V simulačním programu SNAP, který bude popsán v další kapitole, byly vyzkoušeny základní typy aproximací. Byla vybrána Butterworthova aproximace, kde strmost charakteristiky byla vyhovující a v propustném pásmu byl velmi hladký průběh.



Obr. 1.9: Butterworthova aproximace pro jednotlivé řády, levá část v grafu zobrazuje přenosové funkce v propustném pásmu ve zvětšeném měřítku [1]

## 2 Postup při návrhu dolní propusti

Koncové stupně radioamatérských vysílačů mají mnohem větší frekvenční šířku než dané radioamatérské pásmo a jeho provoz způsobuje rušení na okolních pásmech. Dolní propust se připojuje mezi vysílač v pásmu 144MHz a anténu.

Úkolem toho filtru je potlačit na výstupu vyšší harmonické složky a tím tak nedochází k rušení dalších pásem (nejbližší radioamatérské pásmo 432MHz). V pásmu 2m (144-146MHz) je možné vysílat pouze s radioamatérskou licenci s přidělenou volací značkou.

### 2.1 Teoretický návrh filtru

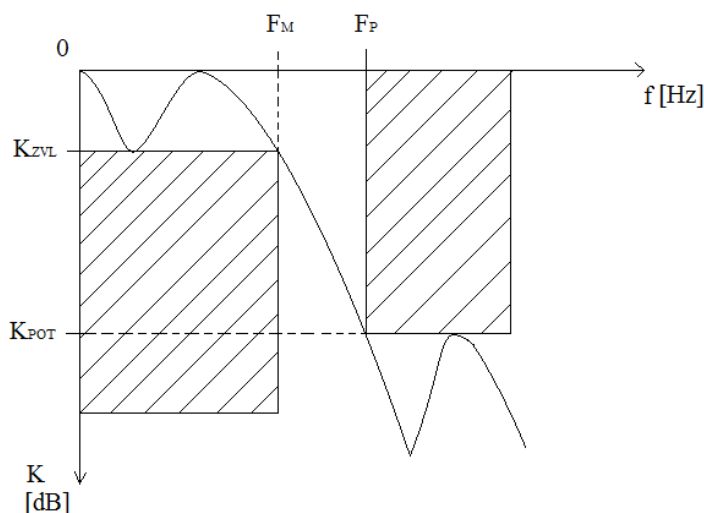
#### 2.1.1 Stanovení tolerančního pole

Úkolem této práce je navrhnout frekvenční filtr typu dolní propust s vybranou Butterworthovou aproximací se zlomovým kmitočtem  $F_M = 144,3$  MHz. Jelikož se  $F_M$  již počítá s útlumem  $-3$  dB, byl posunut zlomový kmitočet na  $F_M = 160$  MHz. Mezní kmitočet pásma potlačení je  $F_P = 320$  MHz. Útlum v propustném pásmu je  $K_{ZVL} = 3$  dB. V nepropustném pásmu je útlum  $K_{POT} = 40$  dB. Odporové zakončení filtru je  $R_1 = 50\Omega$  a  $R_2 = 50\Omega$ .

Propustné pásmo je definováno od 0 dB až do  $K_{ZVL}$  a zlomovým kmitočtem  $F_M$ . V tomto pásmu může docházet ke zvlnění, jak vidíme na obr. 2.1 [1].

Nepropustné pásmo je definováno mezním kmitočtem potlačení  $F_P$  a parametrem  $K_{POT}$ . Hodnota útlumu může být větší ale ne menší než  $K_{POT}$ .

Při stanovení parametrů  $K_{ZVL}$ ,  $K_{POT}$ ,  $F_M$ ,  $F_P$  se určilo dané toleranční pole, které vidíme na obr. 2.1. Kmitočtová charakteristika musí ležet mezi propustným a nepropustným pásmem, tzn. v nevyšrafovaném poli, která splňuje naše požadavky.



Obr.2.1: Toleranční pole přenosové funkce

### 2.1.2 Normovaná dolní propust

V předchozím textu je vidět, jak toleranční pole vypadá. Naší snahou je nalezení přenosové funkce pro toto toleranční pole. Jelikož se jedná o matematicky velmi náročný problém, pro zjednodušení tohoto problému jsou používány standardní přenosové funkce (standardní aproximace) pro normovanou dolní propust ( $DP_n$ ).

Toleranční pole frekvenčního filtru typu dolní propusti se transformuje pomocí vhodných kmitočtových transformací na toleranční pole normované dolní propusti. Při zvoleném řádu a typu aproximace, v našem případě Butterworthova aproximace, určíme z tabulek hodnoty parametrů normované dolní propusti.

Tyto tabulky obsahují pouze numerické hodnoty. Za pomocí kmitočtového a impedančního odnormování je možné z tabulek normovaných hodnot prvků dolních propustí vypočítat pomocí vzorců skutečné hodnoty jednotlivých prvků frekvenčního filtru typu dolní propusti [1]. Pro odnormování se používají tyto vztahy [1].

$$K_L = \frac{R}{2\pi * F_M} \quad K_C = \frac{1}{2\pi * F_M * R} \quad R = R_1 = R_2 * r \quad (2.1)$$

$$L = I * K_L \quad C = C * K_C \quad (2.2)$$

### 2.1.3 Návrh filtru s Butterworthovou aproximací

Postup návrhu byl převzat z [1], [2].

Nejprve se určí normovaný kmitočet potlačení  $F_{PN}$ :

$$F_{Pn} = \frac{F_P}{F_M} = \frac{320}{160} = 2 \quad (2.3)$$

Řád filtru pro  $F_{PN} = 2$  a  $K_{POT} = 40\text{dB}$  lze vypočítat podle vztahu (1.6):

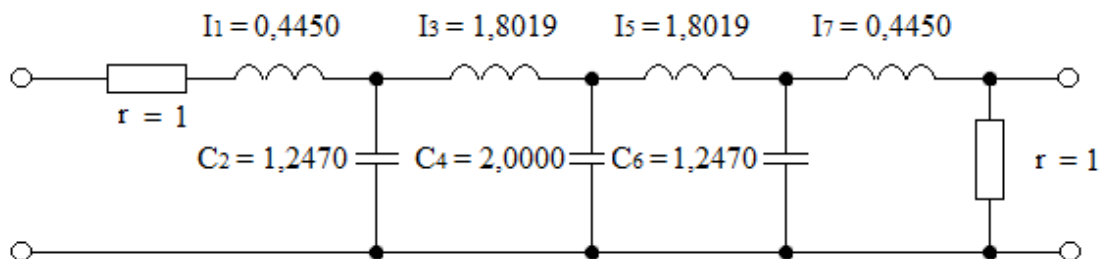
$$n \geq \frac{\log\left(\frac{10^{\frac{K_{POT}}{20}} - 1}{10^{\frac{K_{ZVL}}{20}} - 1}\right)}{2 * \log F_{Pn}} = \frac{\log\left(\frac{10^{\frac{40}{20}} - 1}{10^{\frac{3}{20}} - 1}\right)}{2 * \log 2} = 6,6 = 7$$

Řád filtru po zaokrouhlení je  $n = 7$ . Na následující stránce v tabulce najdeme hodnoty prvků normované dolní propusti 7. řádu. Jelikož jsou použity stejné zakončovací odpory, můžeme použít zapojení T nebo  $\pi$  článku.

Tab.2.1: Tabulka s normovanými hodnotami

Butterworth										
n	I <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	I <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	I <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>
2	1,4142	1,4142								
3	1,0000	2,0000	1,0000							
4	0,7654	1,8478	1,8478	0,7654						
5	0,6180	1,6180	2,0000	1,6180	0,6180					
6	0,5176	1,4142	1,9319	1,9319	1,4142	0,5176				
7	0,4450	1,2470	1,8019	2,0000	1,8019	1,2470	0,4450			
8	0,3902	1,1111	1,6629	1,9616	1,9616	1,6629	1,1111	0,3902		
9	0,3473	1,0000	1,5321	1,8794	2,0000	1,8794	1,5321	1,0000	0,3473	
10	0,3129	0,9080	1,4142	1,7820	1,9754	1,9754	1,7820	1,4142	0,9080	0,3129

pro T článek



Obr.2.2: T článek s normovanými hodnotami 7. řádu

Na obrázku 2.2 je vidět zapojení T článku s normovanými hodnotami, které jsme zvolili z tabulky 2.1. Pro odnormování těchto hodnot je použita následující rovnice (2.1). Podle zadání je  $R_1 = R_2 = 50 \Omega$  a  $F_M = 160 \text{ MHz}$ .

$$R = R_1 = R_2 * r = 50 * 1 = 50 \Omega$$

$$K_L = \frac{R}{2 * \pi * F_M} = \frac{50}{2 * \pi * 160 * 10^6} = 4,9736 * 10^{-8}$$

$$K_C = \frac{1}{2 * \pi * F_M * R} = \frac{1}{2 * \pi * 160 * 10^6 * 50} = 0,1989 * 10^{-10} = 1,9894 * 10^{-11}$$

Skutečné hodnoty kondenzátorů a cívek se vypočítají podle následujících vztahů (2.2):

$$L_1 = I_1 * K_L = 0,4450 * 4,9736 * 10^{-8} = 2,2133 * 10^{-8} = 22,13nH$$

$$C_2 = C_2 * K_C = 1,2470 * 1,9894 * 10^{-11} = 2,4808 * 10^{-11} = 24,81pF$$

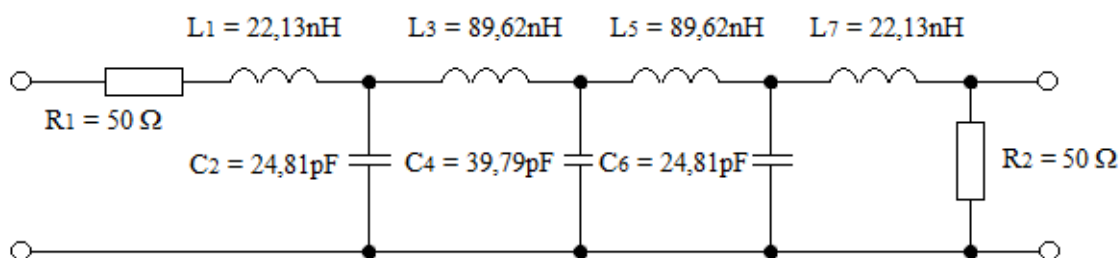
$$L_3 = I_3 * K_L = 1,8019 * 4,9736 * 10^{-8} = 8,9619 * 10^{-8} = 89,62nH$$

$$C_4 = C_4 * K_C = 2,0000 * 1,9894 * 10^{-11} = 3,9788 * 10^{-11} = 39,79pF$$

$$L_5 = I_5 * K_L = 1,8019 * 4,9736 * 10^{-8} = 8,9619 * 10^{-8} = 89,62nH$$

$$C_6 = C_6 * K_C = 1,2470 * 1,9894 * 10^{-11} = 2,4808 * 10^{-11} = 24,81pF$$

$$L_7 = I_7 * K_L = 0,4450 * 4,9736 * 10^{-8} = 2,2133 * 10^{-8} = 22,13nH$$

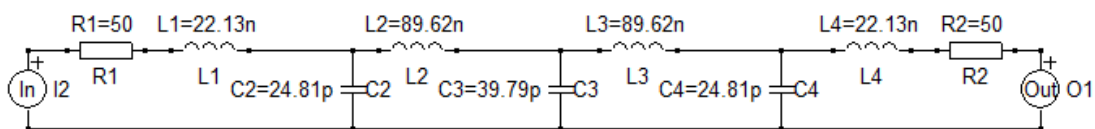


Obr.2.3: Zapojení dolní propusti se skutečnými hodnotami

## 2.2 Ověření návrhu filtru v simulačním programu SNAP

V předchozím textu byl popsán teoretický návrh zapojení dolní propusti a výpočet jednotlivých kondenzátorů a cívek. Existuje mnoho programů pro návrh frekvenčních filtrů jako je Eagleware od firmy GENESYS, SuperFiltrer, Micro-Cap, Electronic Workbench, SNAP, NAF atd. Některé programy jsou komerční, jiné jsou dostupné v demoverzi. Pro ověření a případnou analýzu tohoto filtru s diskretními prvky byl použit počítačový program SNAP (Symbolic Network Analysis Program). Obecně tento simulační program je výhodný v tom, že uživatel při návrhu nic nepočítá a výstup je většinou ve formě grafů. Pro analýzu obvodu se doporučuje postupovat následovně:

- V editoru je nutno zadat schéma zapojení
- Nezapomenout definovat vstupní a výstupní bránu obvodu (In/out)
- Při nastavování hodnot prvků použít desetinnou tečku
- Analýza obvodu se aktivuje v nabídce Analysis/Snap (zkratka F11)



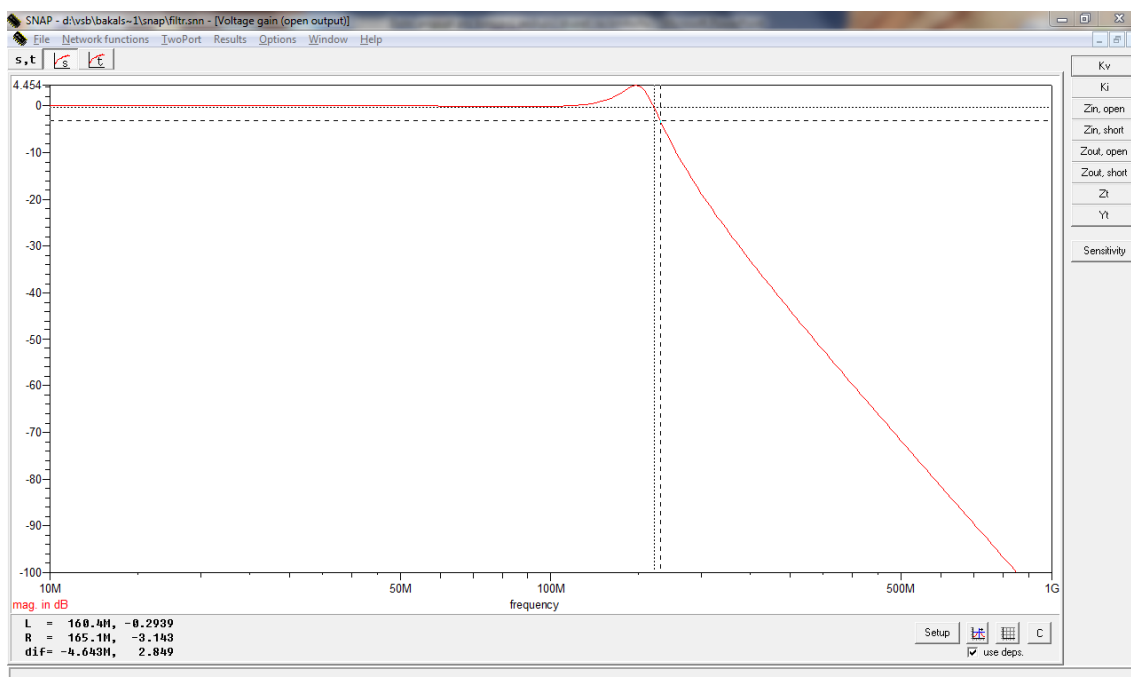
Obr.2.4: Schéma zapojení v editoru

## Postup při návrhu dolní propusti

Na obrázku 2.4 je vidět schéma zapojení T článku s hodnotami jednotlivých prvků. Na vstupu je součástka typu In a na výstupu je součástka Out. V editoru na pravé straně v menu byl seznam všech prvků, které mohly být použity. Pro návrh dolní propusti 7. řádu byly vybrány čtyři cívky a tři kondenzátory. V dalším kroku jsou přiřazeny hodnoty prvků, které byly vypočítány při teoretickém návrhu. V posledním kroku byly všechny prvky spojeny propojovací čarou.

Na obrázku 2.5 lze vidět amplitudovou frekvenční charakteristiku, kde mezní kmitočet je  $F_M = 159$  MHz a pokles o 3dB je při 164 MHz a o 20 dB je při 203 MHz. V propustném pásmu, těsně pod mezním kmitočtem na frekvenci 148 MHz, je mírné zvlnění, které je způsobeno použitou aproximací. Jak už bylo psáno, výhodou tohoto programu je jeho nenáročnost na ovládání, jednoduchá simulace a hlavně si uživatel ověří a vyzkouší, jak filtr vypadá při použití základních typu aproximací. Pokud je výstupní charakteristika pro uživatele nevyhovující, vypočítá znovu řád filtru podle vztahů, které jsou uvedené u jednotlivých aproximací. Vypočítá hodnoty všech prvků, navrhne schéma zapojení a v simulačním programu jednoduše provede analýzu filtru.

Takto je možno porovnávat filtry s různými typy aproximací. Na základě požadavků se dá snadno vybrat, zda je zvlnění v propustném pásmu vhodné nebo strmost charakteristiky je optimální pro návrh filtru. V našem případě je simulace vyhovující. Mírné zvlnění v propustném pásmu se dá upravit změnou kapacit a indukčností jednotlivých diskretních prvků. V dalším kroku bude popsán praktický návrh filtru.



Obr.2.5: Amplitudová kmitočtová charakteristika dolní propusti

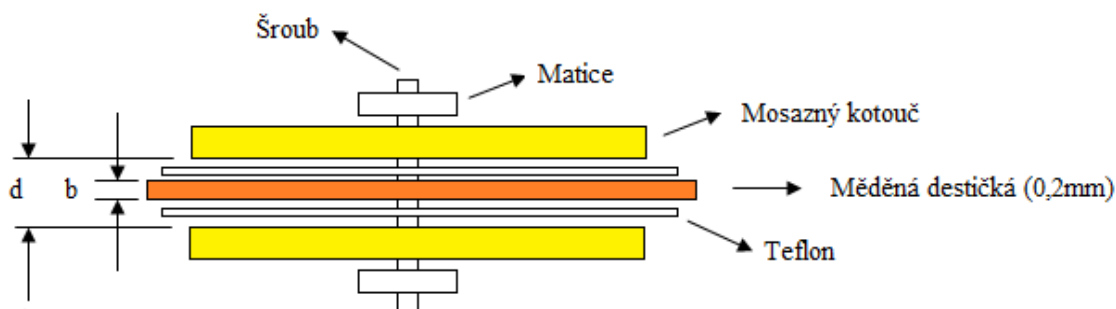


## 2.3 Praktický návrh filtru

Od teoretického návrhu filtru, výpočtu všech diskrétních prvků, volba typu zapojení až po simulace je v následujícím textu popsán praktický postup výroby dolní propusti. První část je věnována konstrukci jednotlivých kondenzátorů a druhá část se zabývá na výrobu potřebných cívek. Ve třetí části se jedná o sestavení celé konstrukce a potřebného odstínění filtru. V poslední části budou uvedeny náklady na jednotlivé součásti při výrobě dolní propusti. V další kapitole bude ověřena správnost návrhu a konstrukce měření.

### 2.3.1 Návrh a výroba kondenzátorů

Pro výrobu byl použit deskový kondenzátor a to z důvodu lepšího uchycení do celé konstrukce. Kondenzátor se skládá ze dvou mosazných kotoučů, které byly vysoustruženy na soustruhu. Mezi kotouče je vložena měděná destička o určité tloušťce. Mezi mosazným kotoučem a mědí je použitý teflon. Pro zpevnění kondenzátoru je použit šroub o průměru 4mm a matice, které jsou z obou stran utaženy.



Obr.2.6: Návrh kondenzátoru

Jak už bylo zmíněno, jako dielektrikum je použit teflon, protože tento materiál lze použít pro průchodí výkon 200W (i více) z důvodu velmi nízkých ztrát v dielektriku a vysoké elektrické pevnosti o hodnotě  $25-30kV * mm^{-1}$ . Při zvětšování intenzity elektrického pole se zvětšuje počet elektronů a jejich pohyblivost. Jestliže se pořád zvyšuje intenzita elektrického pole, dojde v určitém zlomu k průrazu dielektrika. Následovně dané dielektrikum přestane oddělovat dvě místa a vytvoří se vodivý kanál, přes který prochází proud.

Elektrická pevnost  $E_p$  udává velikost průrazného napětí  $U_p$  a tloušťku dielektrika  $d$ . Elektrická pevnost se vypočítá následujícím vztahem [4].

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (2.4)$$

Vypočtené průrazné napětí pro kondenzátor  $C_1$ .

$$U_p = E_p * d$$

$$U_p = 25 * 0,8$$

$$U_p = 20kV$$

Vypočtené průrazné napětí pro kondenzátor  $C_2$ .

$$U_p = E_p * d$$

$$U_p = 25 * 1$$

$$U_p = 25kV$$

Vypočtené průrazné napětí pro kondenzátor  $C_3$ .

$$U_p = E_p * d$$

$$U_p = 25 * 0,8$$

$$U_p = 20kV$$

Po vložení měděné destičky jsou kondenzátory spojeny sériově.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (2.5)$$

Vzdálenost mosazných kotoučů se vypočítá následujícím vztahem:

$$x = \frac{d-b}{2} \quad (2.6)$$

Pro výpočet celkové kapacity je daný tento vztah:

$$C_1 = C_2 = \frac{\epsilon_r * \epsilon_0 * S}{x} \quad (2.7)$$

Z teoretického návrhu dolní propusti vyšel kondenzátor  $C_1 = 24,81pF$ ,  $C_2 = 39,79pF$  a  $C_3 = 24,81pF$ . Při návrhu velikosti kondenzátoru měla měděná destička tloušťku 0,2 mm a použitý teflon měl celkem cca 0,5mm. Permitivita vakua je  $\epsilon_0 = 8,854187818 * 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$  a relativní permitivita teflonu je  $\epsilon_r = 2,1$ . Tloušťka teflonů a měděného plíšku dává dohromady  $d = 0,7 \text{ mm}$ . Hodnota vzdálenosti mosazných kotoučů se vypočítá podle vztahu (2.6).

Podle vztahu (2.7) se vyjádří plocha  $S$ , dosadí se kapacita a hodnota vzdálenosti desek.

$$x = \frac{d-b}{2} = \frac{0,7 - 0,2}{2} = 0,25 \text{ mm} = 0,00025 \text{ m}$$

$$S_1 = \frac{C_1 * x}{\epsilon_r * \epsilon_0} = \frac{24,81 * 10^{-12} * 0,00025}{2,1 * 8,854187818 * 10^{-12}} = 3,3358 * 10^{-4} \text{ m}^2 = 3,3358 \text{ cm}^2$$

$$S_2 = \frac{C_2 * x}{\epsilon_r * \epsilon_0} = \frac{39,79 * 10^{-12} * 0,00025}{2,1 * 8,854187818 * 10^{-12}} = 5,3499 * 10^{-4} \text{ m}^2 = 5,3499 \text{ cm}^2$$

$$S_3 = \frac{C_3 * x}{\epsilon_r * \epsilon_0} = \frac{24,81 * 10^{-12} * 0,00025}{2,1 * 8,854187818 * 10^{-12}} = 3,3358 * 10^{-4} \text{ m}^2 = 3,3358 \text{ cm}^2$$

## Postup při návrhu dolní propusti

Nyní jsou dány plochy jednotlivých kondenzátorů. Podle vzorce (2.8) pro výpočet obsahu kruhu je vypočítán průměr kotouče. Takto budou navrženy všechny potřebné kotouče pro vytvoření kondenzátorů a jejich celkový počet je 6 se středovým otvorem 4mm.

$$S = \pi * r^2 = \pi * \frac{d}{4} \quad (2.8)$$

$$r^2 = \frac{S}{\pi}$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{3,3358}{\pi}} = 1,03 \text{ cm}$$

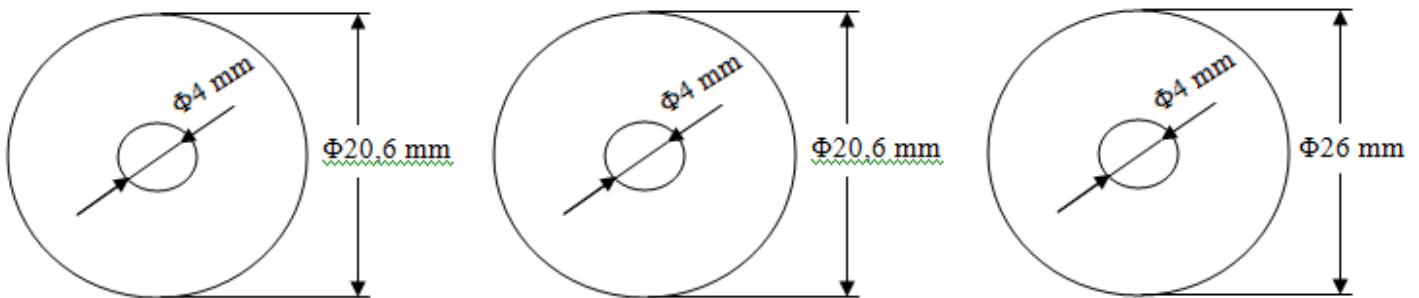
$$d_1 = 2 * r = 2 * 1,03 = 2,06 \text{ cm}$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{S_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{5,3499}{\pi}} = 1,30 \text{ cm}$$

$$d_2 = 2 * r = 2 * 1,30 = 2,6 \text{ cm}$$

$$r_3 = \sqrt{\frac{S_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{3,3358}{\pi}} = 1,03 \text{ cm}$$

$$d_3 = 2 * r = 2 * 1,03 = 2,06 \text{ cm}$$



Obr.2.7: Kondenzátory se středovými otvory



Obr.2.8: Konstrukční kondenzátor  $C_2$

### 2.3.2 Výroba cívek

Cívky se dělí na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční. Jsou konstruovány bez jádra (vzduchové) nebo s jádrem (např. feritové jádro). Cívka může být z pohledu vinutí jednovrstvá nebo vícevrstvá. Více se lze dočíst v [3].

Při výrobě cívek je použit měděný drát CuL o průměru 1,2mm. Tento typ drátu byl použit z důvodů jeho dobrých vlastností. Při použití holého nebo pouze postříbřeného drátu by docházelo k tomu, že by po určité době používání vodič zčernal a potom je jeho povrchová vodivost nízká, ztráty jsou velké a to vede k přehřívání vodiče. Čím více by se vodič zahříval, tím je větší pravděpodobnost, že se může odletovat. Tohle jsou hlavní důvody, proč byl použit lakovaný měděný drát. Indukčnost závisí na počtu závitů, průřezu cívky a délce cívky.

Pro výpočet indukčnosti jednovrstvé vzduchové cívky lze použít následující vztah:

$$L = \mu * \frac{N^2 * S}{l} = K * N^2 \quad (2.9)$$

$\mu$ ..... je permeabilita prostředí [ $H * m^{-1}$ ]

$N$ ..... je počet závitů [-]

$S$ ..... je obsah průřezu cívky [ $m^2$ ]

$l$ ..... je délka cívky (délka cívky musí být větší než průměr cívky)

Všechny vyrobené cívky byly vinuty na trn o průměru 7mm. Při výrobě krajních cívek o délce 6mm a počtu závitů 3 vyšla jejich indukčnost přibližně 78nH. Prostřední dvě cívky mají délku vinutí 2mm o jednom závitě a výsledná indukčnost byla 25nH.

Z teoretického návrhu je znát, že dvě cívky mají indukčnost 22,13nH a zbývající cívky mají hodnotu 89,62nH a tudíž jsou výsledné indukčnosti mírně odlišné. Ve výsledku jsou tyto nepřesnosti zanedbatelné, protože po sestrojení celé dolní propusti budou v závislosti na výsledném grafu jednotlivé indukčnosti měněny roztažením nebo stlačením závitů.

Takto vyrobené cívky byly otestovány na vektorovém analyzátoru VNA, který funguje až do 1,3GHz a má mnoho užitečných funkcí. Přístroj lze použít jako spektrální analyzátor, signálový generátor nebo také jako LCR metr. Jeho obslužný program je zdarma k dispozici na internetu. Na druhou stranu jeho nevýhodou je nutné připojení k počítači, bez kterého by přístroj nefungoval. Více se lze dočíst v [6].

### 2.3.3 Sestrojení filtru

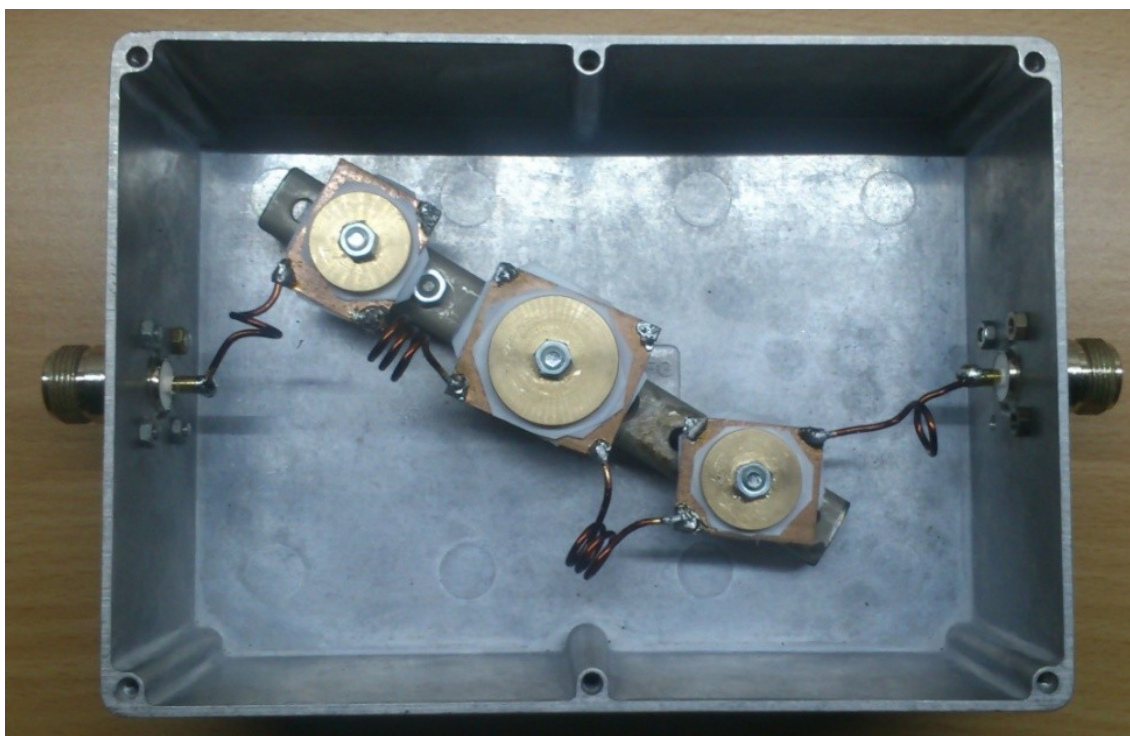
Po otestování cívek na vektorovém analyzátoru byly připraveny k dalšímu postupu. Nejdříve se musel odstranit lak z obou konců cívek a následně byly naletovány k měděným destičkám kondenzátorů. Krajní cívky jsou připojeny ke konektorům typu N, které byly zakoupeny v GM electronic.

Konstrukční kondenzátory jsou upevněny do železné tyče z důvodu vyvýšení těchto kondenzátorů na úroveň konektorů a tím i lepší připojení krajních cívek.

Cívka na levém konci je otočena o 90 stupňů, na pravém konci je úhel otočení podstatně menší z důvodu konstrukčního upevnění. Takto otočené cívky se neovlivňují s vedlejší cívkou a tím dochází k eliminaci vzájemných indukčních vazeb.

Celá konstrukce je upevněna do odstíněné hliníkové krabičky, která byla zakoupena přes internet od společnosti TME Czech Republic.

Filtr je nastaven na co nejnižší průchozí útlum z obou stran. Útlum odrazu vykazuje větší hodnotu jak 35dB a tím je zajištěno velmi dobré přizpůsobení pouze z jedné strany filtru. (PSV 1,01). Z druhé strany je přizpůsobení poměrně horší (PSV 1,12), tudíž je tento filtr doporučen používat z jedné strany s lepší hodnotou PSV. Na obrázku 2.9 je vidět sestavení kmitočtového filtru.



*Obr.2.9: Konstrukční provedení filtru*

### 2.3.4 Náklady na výrobu filtru

V tabulce 2.2 jsou uváděny všechny položky na výrobu filtru. U položek, které nebyly zakoupeny, je cena uváděna jako 0,- Kč. Tyto součástky byly vyrobeny, odmontovány například z různého zařízení nebo byly nalezeny v šuplíku z radioklubu. Jelikož byly použity vlastní součástky, tak celková cena na sestavení filtru nepřevýšila 1000Kč.

Tab.2.2: *Cena součástek*

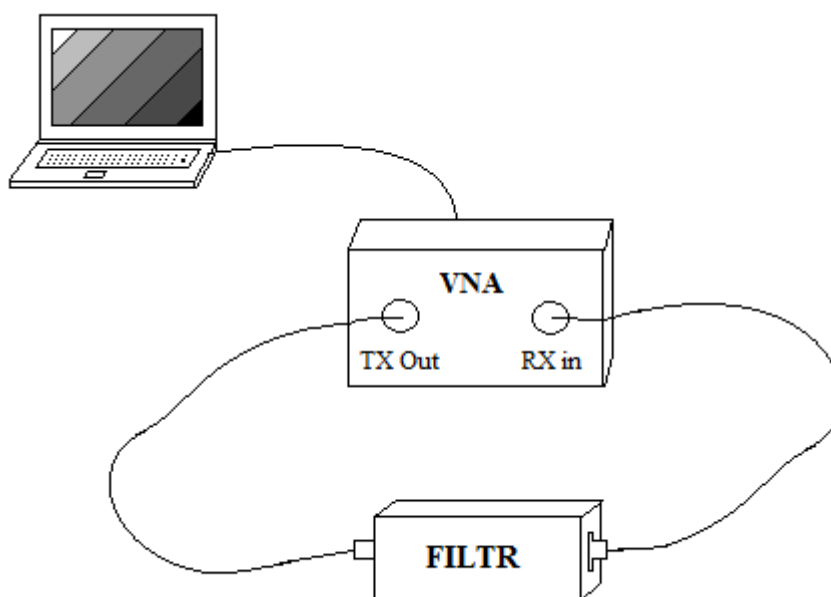
Název položky	Množství	Cena
Mosazné kotouče	6ks	0,- Kč
Měď	1ks	0,- Kč
Teflonová podložka	2ks	70,- Kč
Lakovaný měděný drát CuL	1ks	79,- Kč
Konektory N	2ks	182,- Kč
Hliníková krabice	1ks	473,- Kč
Šrouby a matice	6ks	23,- Kč
Železná tyč	1ks	0,- Kč
<b>CENA CELKEM</b>		<b>827,- Kč</b>

Navržený a sestrojený kmitočtový filtr podle našich představ a požadavků je podstatně levnější než hotový profesionální výrobek například zakoupený v obchodě GES ELECTRONIC, jehož cena se pohybuje okolo 1900Kč. Samozřejmě dražší filtr je poměrně lepší, má lepší přizpůsobení a také je stavěn na větší výkon cca 1kW.

V našem případě je možné použít přídatné chlazení a vyrobený filtr vylepšit tak, aby dokázal snést teoretický výkon cca 500W. Z pohledu poměr cena / výkon by takový kmitočtový filtr už dokázal konkurovat ostatním filtrům.

### 3 Ověření správnosti návrhu a konstrukce měřením

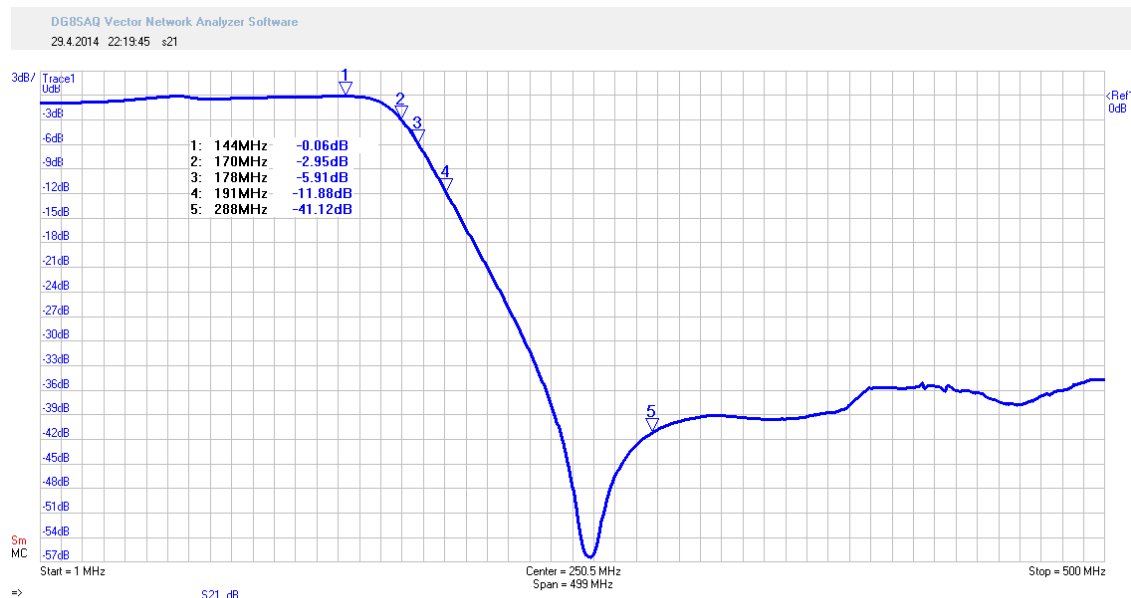
Měření dolní propusti bylo prováděno na vektorovém analyzátoru VNA. První test nedopadl úspěšně. Výsledný graf neodpovídal dolní propusti, a proto byl kmitočtový filtr podroben důkladné analýze. Cívky byly správně připojeny ke kondenzátorům. Konektory byly také v pořádku. Celá konstrukce byla dobře uzemněna, takže chyba byla u kondenzátorů. Postupně byly rozebrány jednotlivé kondenzátory a znovu upevněny ke konstrukci. Bylo zjištěno, že v jednom z kondenzátorů byl použit špatný teflon jako dielektrikum a byl utahován tak moc, až nevykazoval žádnou kapacitu. Při zjištění této chyby byla přidána další vrstva teflonu a znovu byl kondenzátor utahován na výslednou kapacitu. Po opravení této závady byla následně dolní propust měřena úspěšně.



Obr.3.1: Schéma měření

Z počátku měření byl mezní kmitočet posunutý poměrně nízko a docházelo k mírnému zvlnění v propustném pásmu. Roztažením cívek došlo k posunutí zlomového kmitočtu na 144MHz a při změně kapacit jednotlivých kondenzátorů bylo také potlačeno již zmíněné zvlnění. Utahování zbývajících kondenzátorů a nastavování jejich kapacit byl takto filtr doladěn do finální podoby a jeho průběhy lze vidět na grafu (obr.3.2, 3.3, 3.4).

Marker (1) je zlomový kmitočet  $F_0$ , kde byl naměřen útlum 0,06dB v propustném pásmu, (2) je  $F$  při -3dB, (3) je  $F$  při -6dB, (4) je  $F$  při -12dB a (5) je při  $F=2 \cdot F_0$ . Na kmitočtu 432MHz není zaznačen marker, ale útlum vycházel cca 35dB.



Obr.3.2: Výsledná charakteristika měřená vektorovým analyzátozem VNA

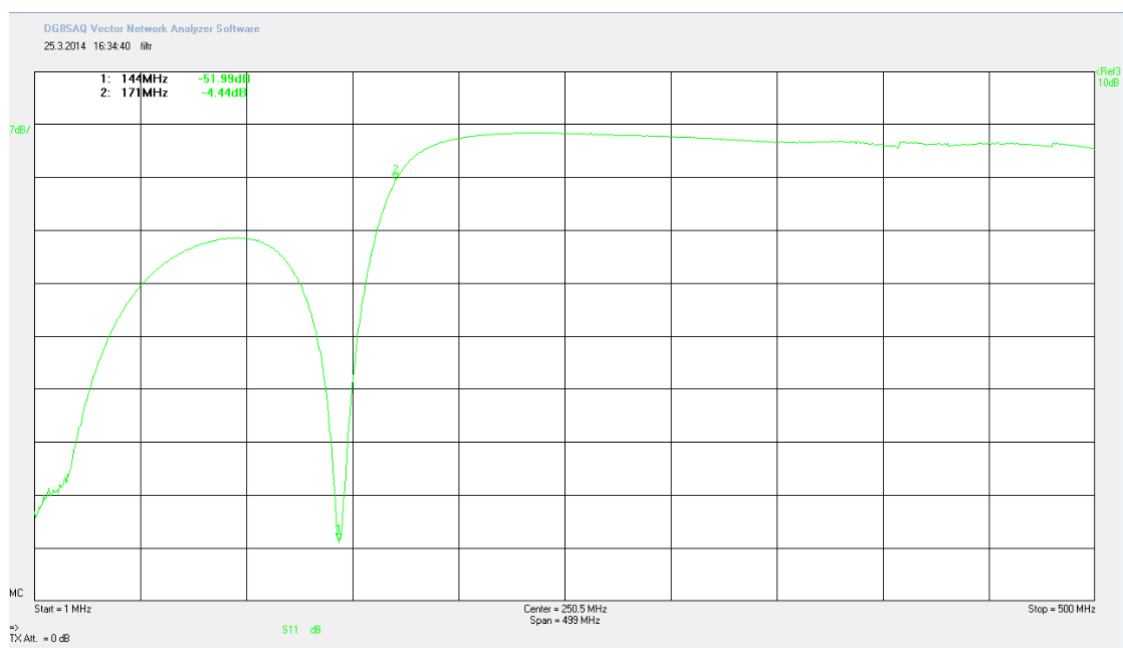
Jedním z nejdůležitějších faktorů je impedanční přizpůsobení, což vlastně znamená, že nedochází k odrazu vln na vstupu a zároveň dochází k maximálnímu přenosu energie ze zdroje do zátěže. Měřením PSV lze otestovat, jak dobře je kmitočtový filtr přizpůsoben. Hodnotu PSV lze získat z rozptylových S-parametrů [10].

Kde:

- $S_{11}$  je koeficient odrazu na vstupu
- $S_{12}$  je koeficient přenosu mezi výstupem a vstupem
- $S_{21}$  je koeficient přenosu mezi vstupem a výstupem
- $S_{22}$  je koeficient odrazu na výstupem

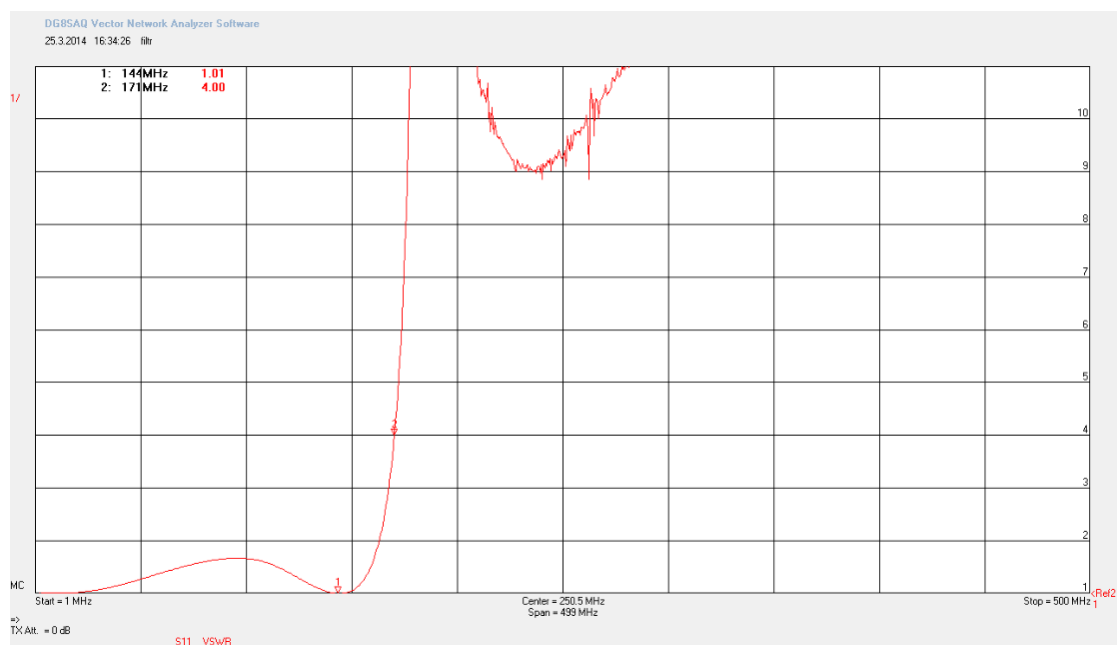
Na obr. 3.3 je uvedeno měření  $S_{11}$  parametru. Průběh je znázorněn zelenou křivkou. Bylo nutné dolní propust doladit na minimální odraz na vstupu, což bylo obtížné nastavit. Jelikož toto nastavení je velice jemné a stačí jenom větší změna kapacit nebo indukčností a celá dolní propust může být jednoduše rozladěna. Pokud není propust dobře nastavena, může docházet k určitým problémům.





Obr.3.3: Nastavení vstupního odrazu

V předchozím textu byly popsány parametry S11, S12, S21, S22. Z parametru S11 lze určit frekvenční průběh PSV. Z počátku měření byl zmenšen krok a na osách X a Y byly zvoleny lepší měřítka. Jsou různé způsoby pro měření PSV a to například použitím přístroje MFJ-259, RigExpert AA-1400 nebo také pomocí PSV metru. V tomto případě byl opět použit vektorový analyzátor VNA. Na obr.3.4 je znázorněn průběh PSV, který je označen červenou křivkou. PSV se téměř blíží k hodnotě jedna na 144MHz, což je vynikající výsledek.



Obr.3.4: PSV měřené vektorovým analyzátořem VNA

## Závěr

Cílem bylo navrhnout a sestavit funkční dolní propust na zadaném kmitočtu. V první kapitole jsou popsány základní typy frekvenčních filtrů, způsoby realizace, základní typy aproximací, porovnání pasivních a aktivních filtrů a jejich použití v praxi.

Druhá část se zabývá teoretickým a praktickým návrhem dolní propusti. Je zde detailní postup pro výpočet diskretních prvků a ověření zapojení pomocí simulačního programu SNAP. Ve druhé polovině druhé části je popsána výroba jednotlivých kondenzátorů a cívek. Dále je zde obrázek konstrukčního provedení kmitočtového filtru a spočítané celkové náklady na výrobu filtru.

Po sestrojení dolní propusti bylo provedeno měření vektorovým analyzátozem VNA. První měření bylo neúspěšné. Chyba nastala v kondenzátoru, u kterého byl stlačen velmi silně teflon. Po přidání další vrstvy teflonu a následné změření kapacity tohoto kondenzátoru byla chyba odstraněna a měření proběhlo úspěšně. Posunutí zlomového kmitočtu a odstranění zvlnění v propustném pásmu byl výsledný kmitočtový filtr doladěn do finální podoby. Podle mého úsudku jsou výsledky měření velmi dobré. Sestrojená dolní propust byla posléze vyzkoušena v radioklubu. Maximální průchozí výkon je dán limitem oteplení vedoucí k odletování cívky a následné poškození kmitočtového filtru. Při výkonu cca 200W (delší než 3 minuty) bylo oteplení cívky pod 100°C, což je bezpečně méně, než tání cínu. Filtr tedy zátěžovou zkouškou prošel úspěšně.

Pro výkony větší než 200W je možno z jedné strany hliníkové krabičky vyvrtat menší otvory pro nasávání vzduchu a z druhé strany použít přídatné chlazení v podobě malého větráčku, který lze použít ze staršího počítače.

Při zpracování této bakalářské práce jsem zjistil mnoho nových informací a naučil se navrhovat kmitočtové filtry. V podstatě celková práce byla pro mě velkým přínosem. Takto sestrojená dolní propust bude používána v radioklubu OK2KQM & OK6A, který sídlí na Vysoké škole báňské – Technické univerzity Ostrava.

## Použitá literatura

- [1] HÁJEK, Karel. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 535 s. ISBN 80-730-0023-7.
- [2] GAJDOŠÍK, Libor. *Návrh analogových filtrů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2013, 239 s. ISBN 978-80-7300-468-2.
- [3] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 342 s. ISBN 80-730-0146-2.
- [4] MARTIN, Tomáš. Dielektrika: Veličiny a vztahy v nauce o dielektrikách. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://dielektrika.kvalitne.cz/zaklad.html>
- [5] DJ9KW, Thomas. High Power Low pass Filter. [online]. [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: [http://www.dj9kw.de/dj9kw/projekte/afu/2m\\_lowpass/lowpass.htm](http://www.dj9kw.de/dj9kw/projekte/afu/2m_lowpass/lowpass.htm)
- [6] OK1TIC, Honza. VNWA - víceúčelový VF měřící přístroj. [online]. [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: [http://ok1tic.nagano.cz/?Moje\\_HAM\\_%E81%E1nky](http://ok1tic.nagano.cz/?Moje_HAM_%E81%E1nky)
- [7] PETRŽÍLKA, Vladimír. Dolní propust. [online]. [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.ok2kkw.com/00003016/dp144/dp144.htm>
- [8] Low Pass Filter LPS144 1kW/144MHz. [online]. [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/en/filtr-dolni-propust-1kw-144mhz-GES08902223.html>
- [9] PETRŽÍLKA, Vladimír. Nebojte se konstrukce cívek pro VKV zařízení. [online]. [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.ok2kkw.com/00000104/civky/civky.htm>
- [10] RF and Microwave Engineering: Fundamentals of Wireless COmmunications. [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.amazon.com/RF-Microwave-Engineering-Fundamentals-Communications/dp/1119951712>

## Seznam příloh

<b>Příloha A:</b>	<b>Univerzální LCR metr .....</b>	<b>xxxvii</b>
<b>Příloha B:</b>	<b>Vektorový analyzátor VNA .....</b>	<b>xxxvii</b>
<b>Příloha C:</b>	<b>Měřicí pracoviště.....</b>	<b>xxxviii</b>
<b>Příloha D:</b>	<b>Obrázek dolní propusti.....</b>	<b>xxxviii</b>

---

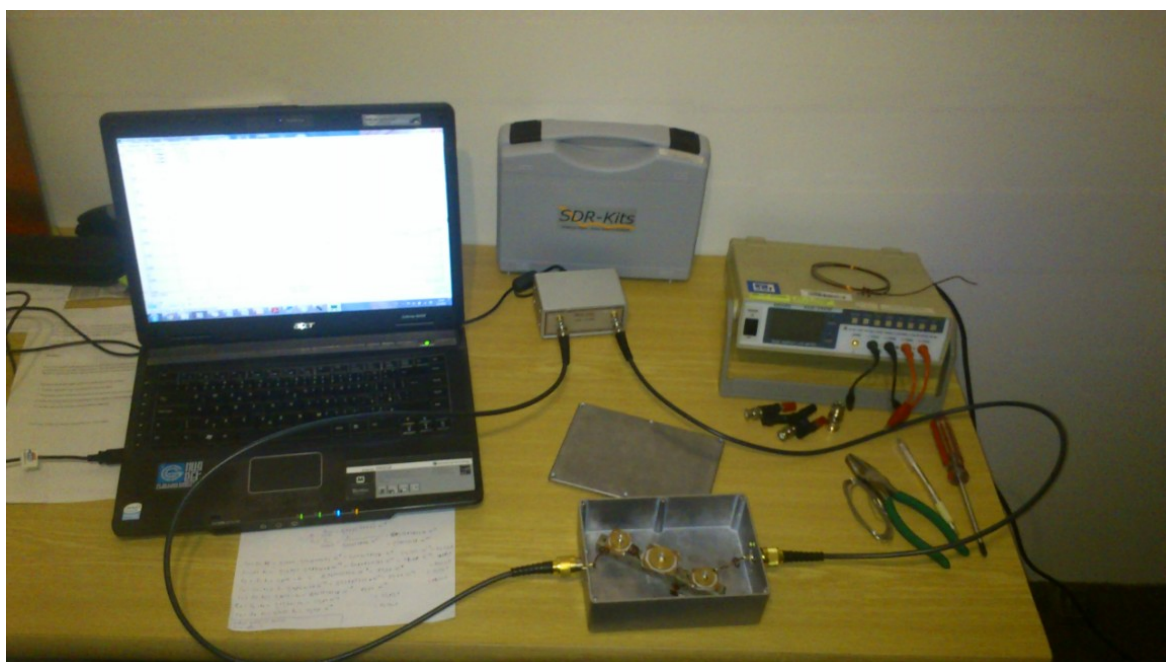
**Příloha A:**     *Univerzální LCR metr*



**Příloha B:**     *Vektorový analyzátor VNA*



**Příloha C: Měřící pracoviště**



**Příloha D: Obrázek dolní propusti**

