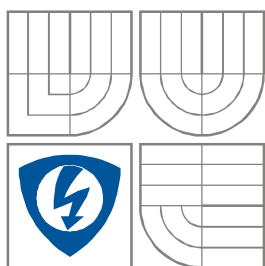


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Inovace programu pro návrh analogových kmitočtových filtrů Innovation of the software for design of the analog frequency filters

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Libor Boleček

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

BRNO, 2008

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Libor Boleček
Bytem: Sídliště 552/3, Štěpánov
Narozen/a (datum a místo): 23. Dubna ve Šternberku

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Inovace programu pro návrh analogových kmitočtových filtrů

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnožení.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 6. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Inovace programu pro návrh analogových kmitočtových filtrů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Petrželovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Anotace

Cílem této bakalářské práce je vytvořit program, který bude sloužit k návrhu příčkových kmitočtových filtrů. K vývoji programu byl použit programovací jazyk c++ a programovací prostředí C++ builder.

Metodika návrhu těchto filtrů vychází z převodu požadovaného filtru na normovanou dolní propust a aplikaci normovaných aproximací.

Vstupem programu jsou uživatelem zadané parametry filtru, kterými jsou mezní frekvence a požadované útlumy v propustném a nepropustném pásmu. Typ požadovaného filtru a preferovaná aproximace.

Výstupními daty programu je obvodová realizace filtru s hodnotami RLC součástek. Uživatel si může zvolit, jestli chce obvod realizovat jako Π nebo T článek. Výstupní data bude možno vytisknout nebo uložit do souboru.

Klíčová slova: kmitočtové filtry, toleranční pásmo, program, návrh

Annotation

The object of this bachelor's project is to create a PC programme for designing crossbar filters. The programme is realized with programming language C++ and Borland C++.

The application uses the method of designing filters which is based on the normalized lowpass filter. This method uses the application of normalized approximation. The user interface of the programme has a wizard character.

Input data are parameters of filters which are ordered by a user. The user orders the marginal frequency and the type of filter.

The output is an electrical circuit with RLC parts values. The user has a choice if he/she wants to realize the circuit as a T or Π type circuit. The output may be printed or saved to a file.

Keywords: frequency filters, tolerance zone, software, design

Boleček, L. *Inovace programu pro návrh analogových kmitočtových filtrů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 51 s., 3.přil.
Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

Obsah

1. Úvod	1
2. Teorie filtrů a jejich návrhu	2
2.1 Kmitočtové filtry jejich dělení a využití	2
2.1.1 Co to je kmitočtový filtr	2
2.1.2 Dělení kmitočtových filtrů	2
2.1.3 Použití kmitočtových filtrů	3
2.2 Základní metodika návrhu filtrů	3
2.2.1 Obecný postup při návrhu filtrů	3
2.2.2 Stanovení základních požadavků na filtr	4
2.3 Návrh filtrů nižších řádů	4
2.4 Filtry vyšších řádů	5
2.4.1 Toleranční pole a transformace na normovanou dolní propust (DP_n)	5
2.4.2 Normalizované typy aproximací	6
2.4.3 Syntéza prototypu DP_n	7
2.4.4 Návrh RLC filtrů z prototypu RLC	8
2.4.5 Optimalizace struktury	9
2.5 Aktivní prvky a funkční bloky ve filtrech	10
2.5.1 Aktivní prvky-zesilovače	10
2.5.2 Funkční prvky	10
2.6 Pásmové propusti s vázanými obvody	11
2.6.1 Postup návrhu PP s vázanými obvody	11
2.6.2 Impedanční transformace PP s vázanými obvody	12
2.6.3 Nuly přenosu pásmových propustí s vázanými obvody	14
2.7 Analýza metodou uzlových napětí	15
2.7.1 Incidenční matice	15
2.7.2 Algoritmus metody MUN vhodný pro PC	15
3. Popis uživatelského prostředí programu Návrh příčkových filtrů (NPF)	17
3.1 Úvodní obrazovka a hlavní menu	17
3.2 Návrh filtru	19
3.2.1 Záložka Typ filtru a aproximace	19
3.2.2 Záložka Vlastnosti: Zadání požadovaných vlastností filtru	20
3.2.3 Záložka Normovaná DP: Koeficienty normované dolní propusti	21
3.2.4 Záložka Realizace: Hodnoty výsledných součástí a schéma obvodu	23
3.2.5 Záložka grafy	24
3.2.6 Záložka Toleranční analýza	24
4. Popis programu a jeho vývoje	26
4.1 Grafické prostředí a použité komponenty	26
4.2 Základní struktura programu	27
4.2.1 Unit1	27
4.2.2 Unit Beseel	31
4.2.3 Unit File	32
4.2.4 Unit Zobrazobvod	33
4.2.5 Unit Zobraz_vazany_obvod	33
4.2.6 Unit funkce_nuly_prenosu	33
4.2.7 Unit funkce_vazane_obvody	33

4.2.8	Unity pro vykreslování grafů	34
4.3	Ošetření výjimek	34
5.	Test správnosti návrhu programem	35
6.	Závěr	48
7.	Literatura	50
	Seznam obrázků	51

1. Úvod

Již z názvu bakalářské práce (Inovace programu pro návrh analogových kmitočtových filtrů) je patrná daná problematika. Úkolem práce bylo vytvořit softwarové vybavení pro návrh kmitočtových filtrů. Cílem programu je navrhnout kmitočtový filtr vyhovující kmitočtové modulové charakteristice zadané uživatelem. Uživatel zadá programu kmitočtovou modulovou charakteristiku v podobě mezních kmitočtů a jim příslušných útlumu a požadovaného typu aproximace (Besselova, Butterworthova, Čebyševova) a program vypočítá filtr, který bude požadavkům vyhovovat. V současné době již podobné programy na trhu existují a některé jsou i volně šiřitelné, ale bohužel jsou to většinou již zastaralé programy, co se uživatelského rozhraní týče. Proto bych ve své práci chtěl z těchto programů z funkčního hlediska vycházet a vylepšit zejména jejich uživatelskou přívětivost.

Jako programovací jazyk pro řešení daného programu byl zvolen jazyk C++ a vývojové prostředí C++ Bulder. K návržení filtr používá program metodu tolerančního pásma a strukturu příčkových filtrů. V případě návrhu pásmové propusti může být také použita struktura vázaných filtru. Výstupem programu je obvodové schéma obvodu požadovaného filtru s vypočítanými hodnotami součástí. Uživatel má k dispozici několik možností jak s vypočítanými hodnotami naložit. V první řadě má možnost exportu hodnot součástí do dokumentu tabulkového editoru nebo si může vytisknout protokol návrhu. Správnost návrhu je možné ověřit zobrazením přenosové frekvenční charakteristiky filtru.

V první části práce je uvedena obecná teorie filtrů (použití, dělení) a metodika návrhu kmitočtových filtrů na základě požadavků kladených na modulovou kmitočtovou charakteristiku. S důrazem zejména na příčkové pasivní filtry, které jsou realizovány jako obvody RLC a na využití struktury vázaných obvodů. Úvodní část obsahuje také krátkou zmínku o aktivních filtrech a o možnosti použití funkčních prvků při návrhu filtru. V další kapitole je popsáno uživatelské prostředí programu, tato kapitola představuje jakousi uživatelskou příručku a návod jak s programem pracovat. Následující kapitola pojednává o metodách, které byly využity při tvorbě programu. Na tomto místě je mimo jiné popsána metoda uzlových napětí, která je využita při výpočtu přenosu filtru, při vykreslování přenosové frekvenční charakteristiky. Poté navazuje kapitola, která obsahuje krátký popis zdrojového kódu programu. Zejména pak jeho funkce jednotlivých unitů. V poslední části jsou uvedeny výsledky experimentální části bakalářské práce. Součástí zadání totiž bylo ověření správné činnosti programu prostřednictvím obvodového simulátoru Pspice.

2. Teorie filtrů a jejich návrhu

2.1 Kmitočtové filtry jejich dělení a využití

2.1.1 Co to je kmitočtový filtr

Kmitočtové filtry jsou lineární elektrické obvody (dvojbrany) používané v mnoha oblastech elektroniky a elektrotechniky. Jejich hlavním úkolem je výběr (selekce) kmitočtových složek procházejícího signálu podle jejich kmitočtu. Filtry obvykle některé kmitočtové složky zpracovávaného signálu propouštějí bez nebo jen s malým útlumem (v případě aktivních filtrů je dokonce zesílí) v určitém pásmu kmitočtů, které nazýváme propustné pásmo. Mimo propustné pásmo jsou harmonické složky naopak silně utlumovány - tzv. nepropustné pásmo (pásmo potlačení, pásmo útlumu). Průchod signálu filtrem vede také obvykle k časovému zpoždění signálu, což je důsledkem fázových posuvů (zpoždění) procházejících harmonických kmitočtových složek signálů. Tyto vlivy můžeme znázornit fázovou kmitočtovou charakteristikou. Jejich vliv je také patrný při znázornění v časové oblasti [1].

2.1.2 Dělení kmitočtových filtrů

Dělení filtrů lze provést z různých hledisek, nejdůležitější dělení je však dle funkce a odpovídajícího tvaru kmitočtových charakteristik:

- 1) Selektivní filtry:
 - dolní propust,
 - horní propust,
 - pásmová propust,
 - pásmová zádrž,
 - všepropustný (fázovací) dvojbran,
- 2) korekční filtry
- 3) Fázovací zpožďovací obvody

Jako další dělení uvedeme dělení dle použitých prvků (realizace)

- 1) realizace diskrétními prvky (odpory, kondenzátory a cívky):
 - pasivní filtry RC (resp. RLC),
 - pasivní filtry LC,
 - aktivní filtry RC,
 - a) se standardními operačními zesilovači,
 - b) se zvláštními typy OZ,
 - c) s ideálními zesilovači napětí,
 - aktivní RC filtry s funkčními bloky:
 - a) s impedančními invertory a gyrátory,
 - b) s impedančními konvertory,
 - c) s proudovými konvejery,

2) realizace v podobě integrovaných obvodů:

- filtry se syntetickými prvky,
- filtry se spínanými kapacitami,
- filtry se syntetickými prvky,
- filtry s povrchovou vlnou,
- filtry s piezoelektrickými rezonátory.

3) realizace číslicovými filtry

Program, který jsem vytvořil, navrhuje přičkové filtry realizované diskrétními prvky (RLC), v bakalářské práci se však krátce zmíním o funkčních prvcích, které je možné použít (kapitola 2.5.2). Zatímco číslicovými filtry se nebudu zabývat vůbec, protože jejich realizace již nemá nic společného s analogovými filtry a probíhá zcela jiným procesem (i když jedna metoda jejich návrhu je vychází z analogových filtrů).

Jako poslední dělení si uvedu (již bez seznamu) dělení dle řádu filtru. Dělení dle řádu filtru je velmi důležité, protože řád filtru určuje strmost změny přenosu napětí. Strmost změny přenosu se dá vyjádřit jako $n \cdot 20 \text{ dB/dek}$. Přičemž n je řád filtru. V obvodovém řešení je řádem filtru dán počet akumulčních prvků obvodu (akumulčními prvky jsou kondenzátory a cívky).

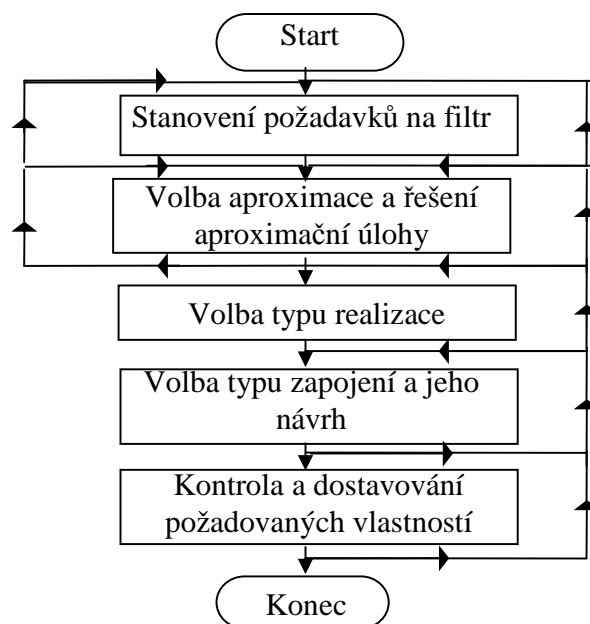
2.1.3 Použití kmitočtových filtrů

Oblast využití kmitočtových filtrů je velmi široká, dá se říci, že kmitočtové filtry patří mezi základní stavební bloky při zpracovávání signálů a práce žádného tvůrčího pracovníka v elektrotechnice se bez nich neobejde. Uvedme si proto, alespoň několik příkladů využití filtrů. V radiotechnice je časté využití filtrů typu pásmové propusti pro výběr přijímaných signálů či využití horních a dolních propustí pro rozdělení kmitočtových pásem v anténních obvodech a předzesilovačích. Obrovský význam mají kmitočtové filtry také v elektroakustice, kde se velmi často používají jako korekční filtry či filtry používané k omezení šumu a v neposlední řadě jako výhybky pro reproduktorové soustavy (pasivní i aktivní). Velký vliv má využití dolní propusti jako antialiasingového filtru využívaného na vstupu A/D převodníků, pro zamezení překládání rušivého spektra do užitečného signálu a na výstupu A/D převodníku jako obdobný rekonstrukční filtr. Velkou oblast využití kmitočtových filtrů tvoří také měřicí technika, ve které nám filtry slouží pro výběr měřeného pásma, zejména u selektivních měření, jakýmžto například kreslení harmonického zkreslení.

2.2 Základní metodika návrhu filtrů

2.2.1 Obecný postup při návrhu filtrů

Postup při návrhu kmitočtového filtru může být značně různorodý. Od jednoduchého využití integrovaných obvodů sériově vyráběných výrobcem pro standardizované úlohy až po velmi komplikovaný návrh při konkrétních a mnohdy složitých požadavcích na funkci filtru vyplývající s vlastností filtrovaného a rušivého signálu. V mé semestrálním projektu a v bakalářské práci na ní navazující se budu zabývat druhým způsobem návrhu a to s využitím PC programu, který naprogramuji. Obecně lze postup při návrhu filtru vyjádřit vývojovým diagramem na obrázku č. 1 [1]. První bod obecného postupu si probereme v následující kapitole a další body potom v další části projektu. Jak je již ze samotného diagramu jasné nemusí jít vždy o přímou posloupnost kroků, ale někdy je také nutné se vrátit se zpět k předchozím krokům, to pokud zjistíme, že původně navržené řešení není prakticky realizovatelné.



Obr. 2.1 Diagram možného postupu při návrhu kmitočtových filtrů

2.2.2 Stanovení základních požadavků na filtr

Tento krok je pro výslednou funkci filtru velmi důležitý a řeší je obvykle jako stanovení základních požadavků na jeho modulovou kmitočtovou charakteristiku. Jako druhé hledisko obvykle uvažujeme fázovou kmitočtovou charakteristiku. Je nutné určit pásmo potlačení, což je kmitočtové pásmo, ve kterém má být přenos filtru potlačen na potřebný přenos (K_{POT}) a volba mezního kmitočtu f_m určující propustné pásmo. Pro propustné pásmo je nutné zvolit povolené odchylky přenosu. Z těchto požadavků se sestaví tzv. toleranční pásmo (viz. Kapitola 2. 4. 1). Když se podívám na tento krok z pohledu mnou programovaného programu tak tyto údaje, které bude uživatel zadávat jako vstupní informace a k nim ještě připojí typ aproximace, který chce použít (více o aproximačních modech v kapitole 4.2).

2.3 Návrh filtrů nižších řádů

U filtrů 1. a 2. řádu, lze jednoznačně popsat vliv parametrů F_o , Q nebo F_n na tvary jejich kmitočtových a časových průběhů a proto můžeme optimálně volit jejich hodnoty tak, aby filtry dosahovali vlastností, které požadujeme. To však nelze u filtrů vyšších řádů. A proto v mém programu sjednotím návrhy filtrů a přesto, že bych mohl návrh těchto filtrů provádět jinak, budu je řešit stejně jako filtry vyšších řádů. A filtrům nižších řádů zvlášť se nebudu věnovat.

Filtry prvního řádu lze realizovat jen dolní a horní propust nikoliv však pásmovou propust a zádrž. Tyto filtry dosahují strmosti 20dB na dekádu neboli 6dB na oktávu.

Filtry s přenosovou funkcí druhého řádu obsahují kromě rezistoru R obvykle nejméně dva akumulární prvky (kondenzátor nebo cívku). Filtry druhého řádu lze realizovat všechny základní typy filtrů, tedy DP, HP, PP a PZ. Tyto filtry dosahují strmosti 40dB na dekádu neboli 12dB na oktávu a používáme je jako základní stavební obvody pro filtry vyšších řádů.

2.4 Filtry vyšších řádů

U filtrů vyšších řádů již nevycházíme z vlivu parametrů F_0 a Q , ale postupujeme jinak. Základní postup návrhu je následující a vychází s takzvaného tolerančního pásma.

Postup návrhu filtru vyšších řádů:

- stanovíme výchozí požadavky formou přípustného tolerančního pole pro modulovou charakteristiku (tolerančnímu poli se budu podrobně věnovat v kapitole 2.4.1) v němž musí ležet modulová charakteristika výsledné přenosové funkce, oslňující naše požadavky,
- protože přenosových funkcí splňujících zadané toleranční pole pro modulovou kmitočtovou ch. Existuje teoreticky nekonečně mnoho, musíme v dalším kroku nalézt takové funkce, které vedou k nejnižšímu řádu.

Druhá fáze návrhu se nazývá aproximační úlohou a jde o matematicky velmi náročný problém. Jeho nejjednodušší řešení spočívá ve výběru z již známých standardizovaných přenosových aproximací. I přes toto zjednodušení je vhodné k rozhodnutí o zvolení nejvhodnější aproximace využít počítačový program, ve kterém si můžeme zkusit navrhnout a poté v jiném simulačním programu (např. Pspice) simulovat filtry různých aproximací a rozhodnout se, která aproximace nám bude nejvíce vyhovovat.

Filtry vyšších řádů vznikají zvyšováním počtu kumulačních prvků v příčkovém článku. Proto se filtry složené ze základních 3 prvků – RLC nazývají příčkové. Právě návrh příčkových RLC filtru je těžištěm celého mého projektu. Tento návrh můžeme rozdělit na 5 základních kroků, které jsou v souladu s vývojovým diagramem obecného postupu na obrázku č. 2. 1. Tyto kroky jsou[1]:

- 1) Přepočítání požadovaných přenosových parametrů požadovaného filtru (zadané většinou kmitočtovým tolerančním polem) na přenosové parametry normované dolní propusti (viz. kapitola 2. 4. 1)
- 2) Určení potřebného řádu filtru a volba aproximační funkce respektující požadavky na tvar modulové frekvenční charakteristiky (viz. kapitola 2. 4 .2).
- 3) Určení struktury (celkové zapojení schématu) filtru a výpočet normovaných hodnot jednotlivých prvků prototypu normované dolní propusti (viz kapitola 2. 4. 3).
- 4) Přepočítání struktury filtru prototypu DP_n na výchozí požadovaný typ filtru a výpočet skutečných hodnot jednotlivých prvků výchozího typu filtru (viz. Kapitola 2. 4. 4).
- 5) Optimalizace struktury a přepočítání jednotlivých hodnot prvků filtru na základě stanovených optimalizačních kritérií (viz. Kapitola 2. 4. 5).

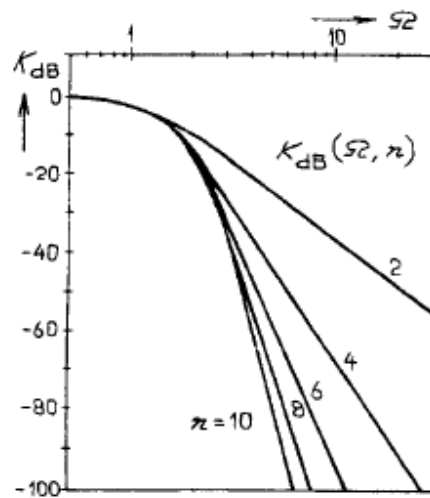
2.4.1 Toleranční pole a transformace na normovanou dolní propust (DP_n)

Při zadávání požadavků na filtry používáme již zmíněné toleranční pásmo. V propustném pásmu definujeme filtr tolerančním rozmezím 0dB až K_{ZVL} a mezním kmitočtem F_m a nepropustné pásmo určuje kmitočet meze potlačení F_p a potřebné potlačení přenosu K_{POT} . Uvedenými požadavky definujeme toleranční pole, ve kterém musí ležet výsledná modulová kmitočtová charakteristika filtru. Toleranční pole typu DP a HP je relativně jednoduché, na rozdíl od tolerančních pásem PP a PZ. Proto se pro zjednodušení používá tzv. normovaná dolní propust. Vyjdeme ze zadaného kmitočtového tolerančního pole požadovaného filtru a transformuje jej na

kmitočtové toleranční pole normované dolní propusti dle kmitočtových transformací uvedených v tabulce č. 1 v příloze.

2.4.2 Normalizované typy aproximací

Existence standardizovaných aproximací je velmi důležitá a užitečná při návrhu filtrů, protože hledání aproximačních funkcí je velmi složitým matematickým úkolem. Aproximace volíme dle průběhu modulové kmitočtové charakteristiky v propustném a nepropustném pásmu. V této kapitole se seznámíme se základními typy standardních aproximací. Pokud požadujeme v propustném pásmu zvlnění 3dB (což je obvyklé) můžeme potřebný řád filtru vyčíst přímo z grafů modulových charakteristik daných aproximací. Modulová charakteristika pro Besseluv filtr je na obr. 2.2 [2]. Pokud však vyžadujeme jiné zvlnění, vypočítáme řád filtru, dle jednoduchých vztahů (uvedených u jednotlivých aproximací).



Obr. 2.2 Modulová charakteristika Besselovi aproximace (využívaná pro určení řádu filtru)

2.4.2.1 Typy standardizovaných aproximací

1) Besselova aproximace

- výhodou je aproximace plochá v propustném pásmu,
- nevýhodou je poměrně malá strmost modulové kmitočtové charakteristiky (vyšší strmosti je možné dosáhnout jen za cenu poměrně vysokých řádů filtru, což je nevýhodné),
- využití při filtraci, u které je záležet na zachování tvaru průchozího signálu,
- pro tuto aproximaci nelze spočítat řád dle vzorce, ale jen odečíst z modulové charakteristiky.

2) Butterworthova aproximace

- patří mezi nejpoužívanější,
- výpočet potřebného řádu filtru [1]

$$n \geq \frac{\log(10^{K_{pot}/10} - 1) / (10^{K_{zvl}/10} - 1)}{2 \cdot \log(F_{pn})} \quad (2.1)$$

3) Čebyševova aproximace

- 2. nejstrmější charakteristika v přechodném pásmu,
- velké potlačení v nepropustném pásmu,
- nevýhodnou čebyševovy aproximace je větší nelinearita fázové charakteristiky,
- vztah pro výpočet řádu Čebyševovi aproximace [1],

$$n \geq \frac{\arccos h \sqrt{(10^{K_{pot}/10} - 1)/(10^{K_{zvl}/10} - 1)}}{\arccos h(F_{pn})}. \quad (2.2)$$

Dalšími typy aproximace jsou Freistelova-Unbehauenova, Inverzní Čebyševova, Caurova, Gaussova či Legenderova.

2.4.2.2 Volba vhodné aproximace

Vhodný výběr aproximace je vzhledem k velkému počtu variant poměrně složitý úkol (který musí uživatel mého programu zvolit sám, ale program mu může pomoci v tom, že mu vypočítá řád funkce, a zároveň uživatel si může rychle vyzkoušet, jak bude vypadat filtr při použití různých aproximací). Pro porovnání a výběr jednotlivých aproximací lze využít zejména dvě kritéria (kritérií je více, ale já zde uvedu jen ty nejdůležitější):

- zvlnění modulové charakteristiky v propustném pásmu,
- strmost modulové ch. v přechodném pásmu a tomu odpovídající nutný minimální řád filtru,
- linearita fázové ch. či odpovídající závislost skupinového zpoždění v propustném pásmu.

2.4.3 Syntéza prototypu DPn

Tento klíčový krok návrhu vychází z výkonových poměrů filtru, které můžeme vyjádřit vztahem číslo 2.3 [1].

$$\frac{P_m}{P_z} = 1 + \frac{P_r}{P_z}, \quad (2.3)$$

kde P_zstřední výkon dodávaný generátorem přes obvod filtru do zátěže,
 P_rodražený střední výkon,
 P_m maximální střední výkon, který je generátor schopen dodat do zátěže.

Pomocí vyjádření kmitočtové závislosti poměru výkonu odraženého a dodaného do zátěže a několika matematických úpravách, které nejsou pro nás teď příliš důležité, dostaneme charakteristickou rovnici filtru [1]:

$$G_u(p) \cdot G_u(-p) = 4 \cdot \frac{R_1}{R_2} + \varphi(p) \cdot \varphi(-p), \quad (2.4)$$

$$G_u(p) = \frac{1}{K_U(p)} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \cdot G(p), \quad (2.5)$$

kde R_1, R_2zakončovací rezistory (viz. Níže),
 $G_u(p)$provozní činitel přenosu napětí,
 $K_U(p)$napěťový přenos filtru,
 $G(p)$provozní činitel přenosu, který je určen typem aproximace a řádem filtru,

$\varphi(p)$charakteristická funkce filtru,

kteřá je výchozí pro výpočet vlastní struktury z charakteristické rovnice vypočítáme pro zvolené zakončování rezistory R_1 a R_2 charakteristickou funkci filtru pomocí, které vyjádříme poměrnou vstupní impedanci filtru [1]

$$z = \frac{G(p) \pm \varphi(p)}{G(p) \pm \varphi(p)}, \quad (2.6)$$

rozvojem této funkce do řetězového zlomku můžeme získat prvky a hodnoty prototypu normované DP_n ve tvaru příčkového článku (s pravidelně se střídajícími podélnými a příčnými prvky).

Provozní činitel přenosu i přenosová funkce $\varphi(p)$ mají tvar racionálních lomených funkcí a proto řešení uvedených vztahu je v praxi po matematické stránce velice obtížné, proto pro usnadnění návrhu filtrů byli sestaveny tabulky jednotlivých prvků L a C dolních propustí pro nejběžnější aproximace. Tyto rozsáhlé tabulky (katalogy) obsahují soubor normovaných hodnot pro filtry 2 až 20 řádu pro nejpoužívanější hodnoty zakončovacích rezistorů. Mechanismu těchto tabulek budu využívat při tvorbě programu v semestrálním projektu číslo 2. Použité tabulky jsou uvedeny v příloze [1].

2.4.3.1 Volba zakončovacích rezistorů

Tyto rezistory plní v obvodu dvě funkce. První jejich funkcí je to, že R_1 plní úlohu vnitřního odporu zdroje a R_2 tvoří zátěž. Dále také plní funkci tlumících prvků pro LC články. Jsou tedy nezbytnou součástí filtru, a proto se filtry nazývají RLC. V některých případech jsou odpory zadány a my je musíme respektovat. V případě, že je můžeme volit, máme tři základní možnosti.

1. Volíme shodné hodnoty rezistorů $R_1 = R_2$, přičemž tato volba je nejčastější a vede k nejnvýhodnější realizaci filtru.
2. Volíme rozdílné hodnoty R_1 a R_2 , přičemž poměr R_1 a R_2 udává základní útlum přenosu a proto je je velký poměr nevýhodný.
3. Při použití aktivních prvků (např. OZ) dochází k jednomu z limitních stavů $R_1 \rightarrow 0$ či ∞ nebo $R_2 \rightarrow 0$ či ∞ .

2.4.4 Návrh RLC filtrů z prototypu RLC

Ted' když už máme navrženou strukturu pro normovanou DP_n , tak potřebujeme tento filtr transformovat zpět na filtr požadovaného typu a vlastností, které získáme kmitočtovým a impedančním odnormováním. Při transformaci vycházíme z kmitočtových transformací (viz. Tabulka č. 1 v příloze) z kterých jsme vycházeli i při normování. A z impedančních transformací, které využívají transformační koeficienty K_L a K_C , které získáme dle následujících vztahů [1]:

$$K_L = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot F_M}, \quad (2.7)$$

$$K_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F_M \cdot R}, \quad (2.8)$$

kde R je hodnota zakončovacího odporu (při $R_1 = R_2$) a F_M je mezní kmitočet filtru.

2.4.4.1 Návrh dolní propusti (DP) ze znalosti DP_n

Při transformaci z normované dolní propusti na původní požadovanou jsou skutečné hodnoty LC prvků dány vztahy [1]:

$$L_i = K_L \cdot l_i, \quad (2.9)$$

$$C_i = K_C \cdot c_i, \quad (2.10)$$

kde l_i a c_i jsou normované hodnoty prvků získané z tabulek nebo výpočtem dle kapitoly 2. 4. 3 a K_L a K_C jsou transformační koeficienty vypočteny dle vztahů na počátku kapitoly 2.4.4.

2.4.4.2 Návrh horní propusti (HP) ze znalosti DP_n

Horní propust je vlastně zrcadlově obrácená dolní propust a z toho vychází i odnormování normované DP_n. Schéma zapojení HP z DP_n získáme tak, že prvky L zaměníme za prvky C a naopak a výsledné hodnoty prvků vypočteme dle vztahů [1]:

$$L_i = \frac{1}{c_i} \cdot K_L, \quad (2.11)$$

$$C_i = \frac{1}{l_i} \cdot K_C, \quad (2.12)$$

kde l_i a c_i jsou normované hodnoty prvků získané z tabulek nebo výpočtem dle kapitoly 4.3 a K_L a K_C jsou transformační koeficienty vypočteny dle vztahů na počátku kapitoly 4.4.

2.4.4.3 Návrh pásmových propustí (PP) a pásmových zádrží (PZ) ze znalosti DP_n

Při transformaci s normované dolní propusti na pásmovou zádrž nebo propust se mění řád filtru na dvojnásobný, a proto se mění počet akumulčních prvků na dvojnásobný a tím se změní i struktura filtru. Transformace zapojení vychází z náhrady normovaných prvků dle tabulek č. 2 a 3. uvedených v příloze.

2.4.5 Optimalizace struktury

V závěrečné etapě návrhu filtru se věnujeme optimalizaci jednotlivých stavebních prvků filtru z důvodu jeho technické realizace. V průběhu optimalizace je často potřeba provést úpravy s přihlédnutím celé řady hledisek. Úpravy provádíme z několika základních důvodů:

- Eliminace nerealizovatelných součástí
- Minimalizace počtu stavebních prvků
- Úprava hodnot na vhodnou velikost
- Optimalizace struktury filtru z hlediska minimalizace citlivosti

Při optimalizace používáme různé transformační metody např. dvojpólovou, trojpólovou a dvojbranové transformace, mezi dvojbranové transformace patří i Nortonova transformace [1].

2.5 Aktivní prvky a funkční bloky ve filtrech

2.5.1 Aktivní prvky-zesilovače

Nejpoužívanějšími aktivními prvky jsou operační zesilovače (OZ). Standardní napěťové OZ se však dají použít jen v pásmu nižších kmitočtů. Na vyšších kmitočtech musíme použít rychlé OZ speciálních struktur a jiné funkční bloky (viz. Kapitola 5.2). Dalšími aktivními prvky mohou být zesilovače napětí a proudu, transadmitanční zesilovače, transimpedanční zesilovače či Nortonův zesilovač.

2.5.2 Funkční prvky

Nejpoužívanějším funkčním prvkem je gyrátor a dalšími často používanými funkčními prvky jsou impedanční invertory, impedanční konvertory a proudové konvejory.

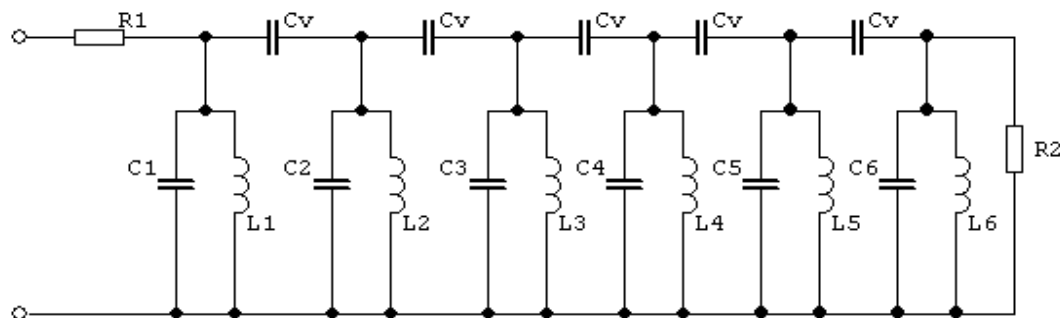
2.5.2.1 Gyrátory

Je to pozitivní imitanční invertor, který ve filtrech využíváme k simulaci a náhradě klasických cívek. Gyrátor můžeme realizovat řízenými zdroji VCCS nebo i s jinými funkčními bloky. Velmi vhodné je Riordanovo zapojení se dvěma operačními zesilovači. Gyrátor se dá také pořídit jako hotový zákaznický integrovaný obvod. Komerčně dostupný masově vyráběný IO v současnosti není znám. Dostupné gyrátory jsou většinou zemněné, plovoucí jsou zbytečně složité a nákladné.

2.6 Pásmové propusti s vázanými obvody

Při návrhu pásmových propustí můžeme narazit při realizaci přičkovou strukturou na několik problému. A to zvláště při relativně malých šířkách pásma. Při zužování propustného pásma dochází k vzrůstu poměru hodnot jednotlivých součástí PP. Problémem je zejména dosažení dostatečné velikosti pracovního činitele jakosti Q , proto potřebujeme co nejkvalitnější prvky L a C . Potíže narůstají s rostoucím kmitočtem, kdy je obtížné potlačit parazitní vlastností prvků, a to i s ohledem na velký rozptyl hodnot prvků. Obtíže přenáší i případné dostavování těchto pásmových propustí. Z předešlého je patrné, že praktická realizace úzkopásmových propustí je značně obtížná. A je často nutné použít některou z optimalizačních metod [1].

Jednou z možností řešení potíží problému s návrhem takovýchto PP je využití vázaných rezonančních obvodů. Jednotlivé paralelní rezonanční obvody tvořící tuto strukturu, mohou být vázany kapacitní (obr. 2.3) nebo induktivní vazbou. Do svého programu jsem implementoval strukturu s kapacitní vazbou. Jistým problémem této struktury je skutečnost, že se jedná v podstatě o horní propust. Při dostatečně malé relativní šířce pásma ($B/F_0 < 0,1$) převládá charakter přenosu a vliv vazebního prvku je dostatečně potlačen. Návrh filtru s vázaným může vycházet z polynomiálních aproximací bez nul přenosu v nepropustném pásmu (Besselova nebo Čebiševova), ale jednoduchou úpravou struktury můžeme realizovat i přenosovou funkci s nulami přenosu (viz. 2.6.3).



Obr. 2.3 Filtr s vázanými rezonančními obvody s kapacitní vazbou (5. řád)

2.6.1 Postup návrhu PP s vázanými obvody

V následujícím textu si krátce popíšeme kroky návrhu PP s vázanými obvody vycházející z polynomiálních aproximací. Výsledné charakteristiky zcela neodpovídají charakteristikám pásmových propustí získaných transformací z normované dolní propusti, proto je nazýváme kvazipolynomiální PP.

Postup návrhu:

- Volba typu aproximace, určení potřebného řádu, získání normovaných koeficientů DP_n .
- Modul impedance vazebního kapacitou se při rezonančním kmitočtu shoduje s hodnotou zakončovacích rezistorů.
- Rezonanční obvody mají rezonanční kmitočet F_0 , když k C_i přičteme hodnotu vazebního kapacitou.
- Charakteristická impedance rezonančních obvodů je úměrná odporu a relativní šířce pásma a nepřímo úměrně hodnotám prvků prototypu DP_n .

Hodnoty prvků vázaných PP vypočteme dle následujících vztahů [1]

$$\begin{aligned}
 C_V &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F_0 \cdot R}, & (2.13) \\
 L_i &= \frac{B \cdot R}{2 \cdot \pi \cdot F_0^2 \cdot a_i}, \\
 C_1 &= \frac{1}{(4 \cdot \pi^2 \cdot F_0^2 \cdot L_1)} - C_V, \\
 C_2 &= \frac{1}{(4 \cdot \pi^2 \cdot F_0^2 \cdot L_2)} - 2 \cdot C_V, \\
 C_{n-1} &= \frac{1}{(4 \cdot \pi^2 \cdot F_0^2 \cdot L_{n-1})} - 2 \cdot C_V, \\
 C_n &= \frac{1}{(4 \cdot \pi^2 \cdot F_0^2 \cdot L_n)} - C_V,
 \end{aligned}$$

kde C_V je vazební kondenzátor, L_i cívka rezonančního obvodu, C_n kondenzátor rezonančního obvodu, f_0 rezonanční kmitočet (střední frekvence PP), B značí šířku pásma PP, R označujeme zakončovací odpor, a_i jsou normované koeficienty

Nastavování této struktury je v porovnání s klasickou realizací podstatně snadnější, protože každý z rezonančních obvodů se nastavuje do rezonance samostatně.

2.6.2 Impedanční transformace PP s vázanými obvody

Z důvodu snadnější realizace musíme předběžně navrženou PP optimalizovat. Při optimalizaci je možno využít jednu z metod z kapitoly 2.4.5, ale u vázaných obvodů můžeme výhodně využít také impedanční transformace a to jedné ze tří typů. Možnost aplikovat všechny tři způsoby impedanční transformace obsahuje i program NPF.

a. Transformace odbočkou rezonančního obvodu

Tento typ zapojení je možné využít kromě impedanční transformace, také v situaci kdy potřebujeme použít různé hodnoty zakončovacích rezistorů. Odbočka může být kapacitní nebo induktivní, v případě použití k transformaci se častěji používá kapacitní odbočka (obr. 2.4). Postup je takový, že původní krajní kapacitor C_n rozdělíme na sériové spojení kapacitou C_{n1} a C_{n2} a jejichž hodnoty zjistíme dle následujících vztahů [1]

$$\begin{aligned}
 C_{n1} &= C_n \cdot \sqrt{\frac{R}{R'}}, & (2.14) \\
 C_{n2} &= \frac{C_{n1} \cdot C_n}{(C_{n1} - C_n)},
 \end{aligned}$$

kde R je původní hodnota zakončovacího rezistoru a R' je hodnota nově požadované rezistoru.

b. Transformace vazebním kapacitorem

Hodnoty transformačních prvků vypočítáme pomocí následujících vztahů [1]

$$C_{n2} = \frac{1}{\left(2 \cdot \pi \cdot F_0 \cdot R' \cdot \sqrt{\frac{R}{R'} - 1}\right)},$$

$$C_{n1} = C_n - \frac{C_{n2}}{\left[1 + (2 \cdot \pi \cdot F_0 \cdot R' \cdot C_{n2})^2\right]}. \quad (2.15)$$

kde C'_{n1} a C'_{n2} jsou vazební kondenzátory, C_n je původní krajní kondenzátor, R je původní hodnota zakončovacího rezistoru, R' je hodnota nově požadované rezistoru a f_0 představuje rezonanční kmitočet.

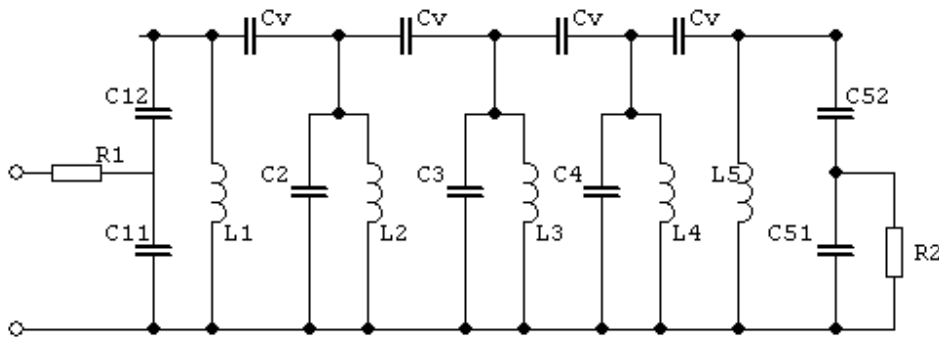
c. Transformace vazebním induktorem

Hodnoty transformačních prvků vypočítáme pomocí následujících vztahů [1]

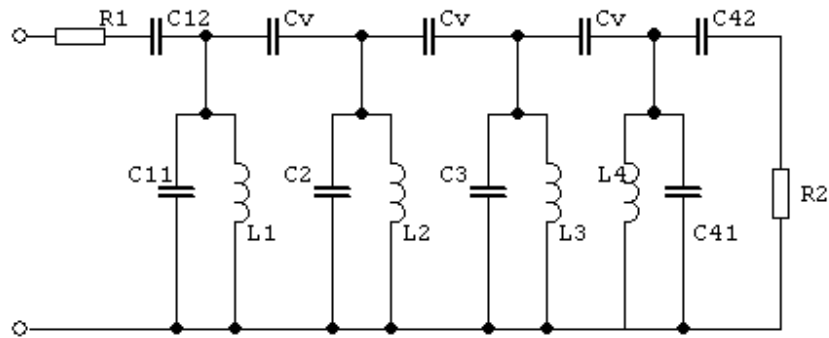
$$C'_n = C_n + \frac{L'_v}{\left[R'^2 + (2 \cdot \pi \cdot F_0 \cdot R' \cdot L'_v)^2\right]},$$

$$L'_v = \frac{R' \cdot \sqrt{\frac{R}{R'} - 1}}{2 \cdot \pi \cdot F_0}, \quad (2.16)$$

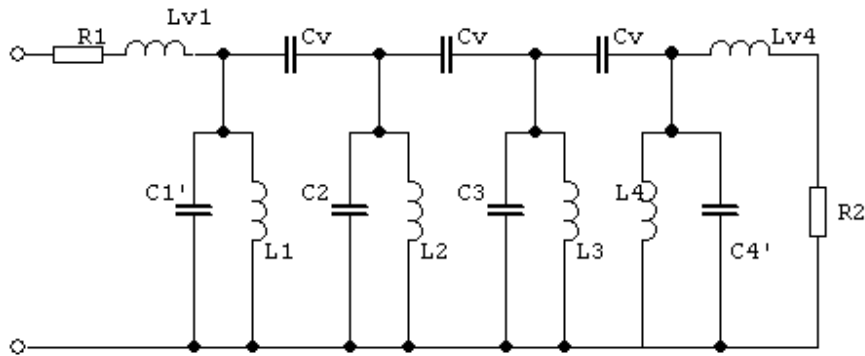
kde C'_n a L'_v jsou vazební prvky, C_n je původní krajní kondenzátor, R je původní hodnota zakončovacího rezistoru, R' je hodnota nově požadované rezistoru a f_0 představuje rezonanční kmitočet.



Obr. 2.4 PP s vázanými obvody impedanční přizpůsobení kapacitní odbočkou



Obr. 2.5 PP s vázanými obvody impedanční přizpůsobení vazebním kapacitorem



Obr. 2.6 PP s vázanými obvody impedanční přizpůsobení vazebním induktorem

2.6.3 Nuly přenosu pásmových propustí s vázanými obvody

Další možností jak vylepšit návrh PP propusti je realizace přenosové funkce s nulami přenosu. Kdy jednoduchou změnou struktury dosáhneme zlepšení strmosti boků modulové přenosové charakteristiky nebo výrazného potlačení této charakteristiky na vybraných kmitočtech. Tento postup však přináší i jisté nevýhody a úskalí. Musíme počítat se zvýšením složitosti struktury a měly bychom počítat s tím, že pokud zvolíme nuly přenosu nevhodně (příliš blízko F_0), tak může dojít k ovlivnění propustného pásma – k jeho zúžení nebo zvětšení zvlnění.

Postup spočívá v nahrazení libovolného induktoru nebo i více induktorů v původním zapojení sériovým rezonančním obvodem, který musí mít na středním kmitočtu PP impedanci shodnou s impedancí původního induktoru. Dalším podmínkou správné funkce je, aby na požadovaném kmitočtu nulového přenosu byl sériový rezonanční obvod v rezonanci. Výpočet součástí se bude lišit podle toho, zda chceme nastavit nulový bod nad středním kmitočtem PP (vztahy 2.17) nebo pod ním (vztahy 2.18) [1].

$$C_b = C \cdot \left(1 - \frac{F_0^2}{F_p^2}\right), \quad L_b = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot F_p^2 \cdot C_b}, \quad (2.17)$$

$$L_a = L \cdot \left(1 - \frac{F_p^2}{F_0^2} \right), \quad C_a = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot F_p^2 \cdot L_a}. \quad (2.18)$$

2.7 Analýza metodou uzlových napětí

Analýza je proces, během kterého jsou zjišťovány vlastnosti elektrických obvodů, jejíž struktura i parametry jejich prvků jsou známy. Při analýze se vychází ze základních zákonů elektrických obvodů. Výsledkem je popis modelu pomocí soustavy algebraických rovnic o n neznámých obvodových veličin nebo požadované obvodové funkce. Cílem analýzy prováděná v programu bude výpočet funkce pro přenos napětí. Než se dostaneme k samotné metodě MUN, musíme si nejprve definovat pojem incidenční matice, kterou budeme v dané metodě používat.

2.7.1 Incidenční matice

Každá orientovaná smyčka li je tvořena posloupností několika větví (b_k). Všechny nezávislé smyčky sestavíme do vektoru L a všechny větve do vektoru B , pak můžeme jejich souvislost vyjádřit maticovou rovnicí

$$L = D \cdot B, \quad (2.19)$$

kde D je (zkrácená) incidenční matice smyček a větví. Prvek této matice $d_{ik} = 1$, jestliže se orientace i -té smyčky shoduje s orientací k -té větve, $d_{ik} = -1$, když je orientace i -té smyčky opačná k orientaci k -té větve, $d_{ik} = 0$, když k -tá větev není součástí i -té smyčky [4].

2.7.2 Algoritmus metody MUN vhodný pro PC

Vzhledem k tomu, že základní princip je metody MUN je známý a nám se jedná o využití metody v počítačovém programu, tak se budeme rovnou soustředit na algoritmus sestavení admitanční (vodivostní) matice vhodný pro PC. Tento algoritmu je založen na použití incidenční matice větví a uzlových párů M (viz. kapitola 2.7.1) a její transponované¹ matice $^T M$ ve vztahu [4]:

$$Y = M \cdot Y_v \cdot ^T M, \quad (2.20)$$

kde Y je výsledná admitanční matice obvodu a Y_v je admitanční matice větví. Y_v je čtvercová matice, jejíž prvky hlavní diagonály jsou admitance jednotlivých větví obvodu. Prvky mimo hlavní diagonálu jsou rovny nule. Pomocí vztahu (2.20) získáme admitanční matici, čímž jsme učinili první krok. Posledním nutným krokem je využití matice k výpočtu napěťového přenosu.

Vyjdeme z faktu, že filtr můžeme považovat za dvojbran, který je buzen pouze jedním zdrojem signálu na vstupní bráně a zatížen na výstupní bráně určitou impedancí. Dále zvolíme první nezávislý uzlový pár soustavy jako vstupní a poslední nezávislý uzlový pár soustavy jako výstupní. Potom obě uzlová napětí (vstupní a výstupní) jsou dány výrazy [4]:

$$U_1 = \frac{\Delta_{1;1}}{\Delta} \cdot I_{01}, \quad (2.21)$$

$$U_2 = \frac{\Delta_{1;n}}{\Delta} \cdot I_{01}, \quad (2.22)$$

¹ Transponovanou matici získáme záměnou řádků a sloupců

kde symbol Δ představuje determinant admitanční matice a symboly $\Delta_{i,k}$ představují determinant zkrácené admitanční matice získané vynecháním i -tého řádku a k -tého sloupce (n představuje poslední sloupec). Využitím těchto vztahů a jednoduchou úpravou získáme vztah pro výpočet přenosu napětí

$$K_U = \frac{\Delta_{1;n}}{\Delta_{1,1}}. \quad (2.23)$$

Postup získání napěťového filtru je tedy následující:

1. Sestavení incidenční matice analyzovaného filtru M .
2. Vytvoření transponované incidenční matice $^T M$.
3. Sestavení admitanční matice větví.
4. Vynásobení admitanční matice větví zleva incidenční maticí a zprava transponovanou incidenční maticí (dle 2.20).
5. Vytvoření jedné zkrácené admitanční matice vynecháním prvního řádku a prvního sloupce a druhé vynecháním prvního řádku a posledního sloupce.
6. Výpočet determinantů těchto matic a výpočet jejich podílu (dle 2.23) $\rightarrow K_U$.
7. Pro modul přenosu výpočet absolutní hodnoty K_U nebo pro výpočet fáze přenosu ortog podílu reálné a imaginární složky.

Případně pokud chceme modul přenosu v dB, tak ještě použijeme následující vztah

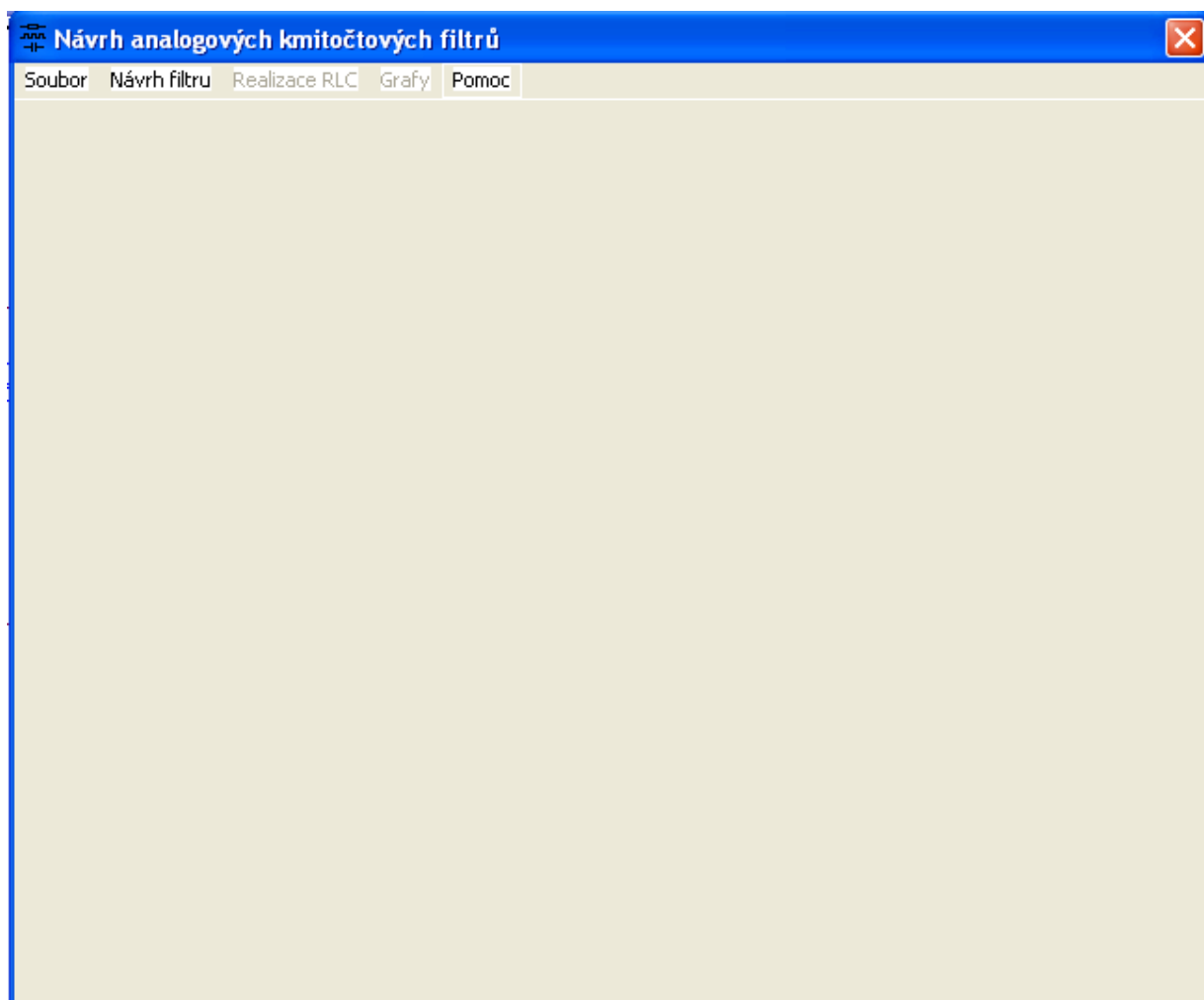
$$K_U = 20 \cdot \log_{10} K_U. \quad (2.24)$$

3. Popis uživatelského prostředí programu Návrh příčkových filtrů (NPF)

Tato kapitola by měla sloužit čtenáři (potažmo uživateli) k pochopení práce s programem. Jedná se vlastně o jakýsi manuál k programu NPF.

3.1 Úvodní obrazovka a hlavní menu

Po spuštění programu se uživateli zobrazí úvodní obrazovka (obrázek 3.1). Formulář programu NPF obsahuje základní ovládací prvky jako každé okno operačního systému Windows97 a jeho vyšší verze, tedy ikonu pro minimalizaci, maximalizaci a vypnutí programu. Úvodní obrazovka obsahuje jediný ovládací prvek a tím je základní menu v jeho horní části. Toto základní menu obsahuje nabídku tlačítek Soubor, Návrh filtru, Realizace RLC, Grafy a O programu.



Obr. 3.1 Úvodní obrazovka programu

Položka hlavního menu Soubor umožňuje použití zásadních schopností programu související s praktickým využitím výsledků programu. Obsahuje následující 3 položky:

- *Tiskni protokol*: Funkce tohoto tlačítka je na první pohled jasná, použitím tohoto tlačítka vytiskneme zprávu (protokol), která bude obsahovat všechny důležité data o navrhnutém filtru. První důležitou částí této zprávy budou všechny vlastnosti filtru, kterou uživatel požadoval (mezí kmitočty, přenosy, typ filtru, použitá aproximace) a druhá část bude obsahovat výsledek návrhu, tedy obvodové schéma filtru, tabulku součástí a použitý typ článku.
- *Ulož filtr*: Tlačítko sloužící k uložení hodnot stavebních prvků filtru do tabulkového editoru, což umožní pozdější využití navrženého filtru.
- *Konec*: Ukončení práce s programem.

Tlačítko Návrh filtru slouží k zahájení vlastní práce s programem a po jeho stlačení se nám rozvine menu a zobrazí se čtyři podnabídky:

- *Návrh filtru*: po stisku tohoto tlačítka se uživateli zobrazí okno, které je ukázáno na obrázku 3.2 a může začít navrhovat požadovaný filtr (viz. dále).
- *Uložení aproximace na disk*: tlačítko slouží k uložení parametrů navrhovaného filtru na disk, což je užitečné v případě, že je uživatel nucen přerušit práci a chce se k danému návrhu vrátit později.
- *Načtení aproximace z disku*: tlačítko slouží k načtení parametrů dříve navrhovaného filtru s disku a k opětovné práci s ním.

Poznámka: Použití posledních dvou tlačítek v nabídce Návrh filtru, je velmi užitečné pokud uživatel potřebuje opakovaně měnit jen některé s požadovaných parametrů filtru.

Nabídka Realizace RLC je při spuštění programu nedostupná a je ji možno využít po prvotním návrhu filtru (získání normovaných koeficientů).

- *Zakončovací rezistory R1 a R2*: Obsahuje čtyři podnabídky, které poskytují možnost různého zakončení filtru. Můžeme použít oboustranné shodné zakončení, kdy hodnoty odporů R1 a R2 jsou shodné, zakončení naprázdno ($R2 \rightarrow \infty$) nebo nakrátko ($R1 \rightarrow 0$).
- *Citlivostní analýza*: slouží k otestování vlivu nepřenosné realizaci hodnot součástí.

Nabídka Grafy slouží k zobrazení modulových a fázových kmitočtových charakteristik filtru a tím k ověření správnosti návrhu filtru bez nutnosti použít simulační prostředí. Zobrazený graf si může uživatel vytisknout.

Poslední položka hlavního menu programu Pomoc, již neobsahuje žádné submenu související s bezprostředním návrhem filtru.

- *O programu*: Základní informace o autorovi a účelu tvorby programu.
- *Jazyk*: Výběr jazykové verze programu, tato funkce není dokončena
- *Volba grafiky*: Možnost změnit barvu prostředí.

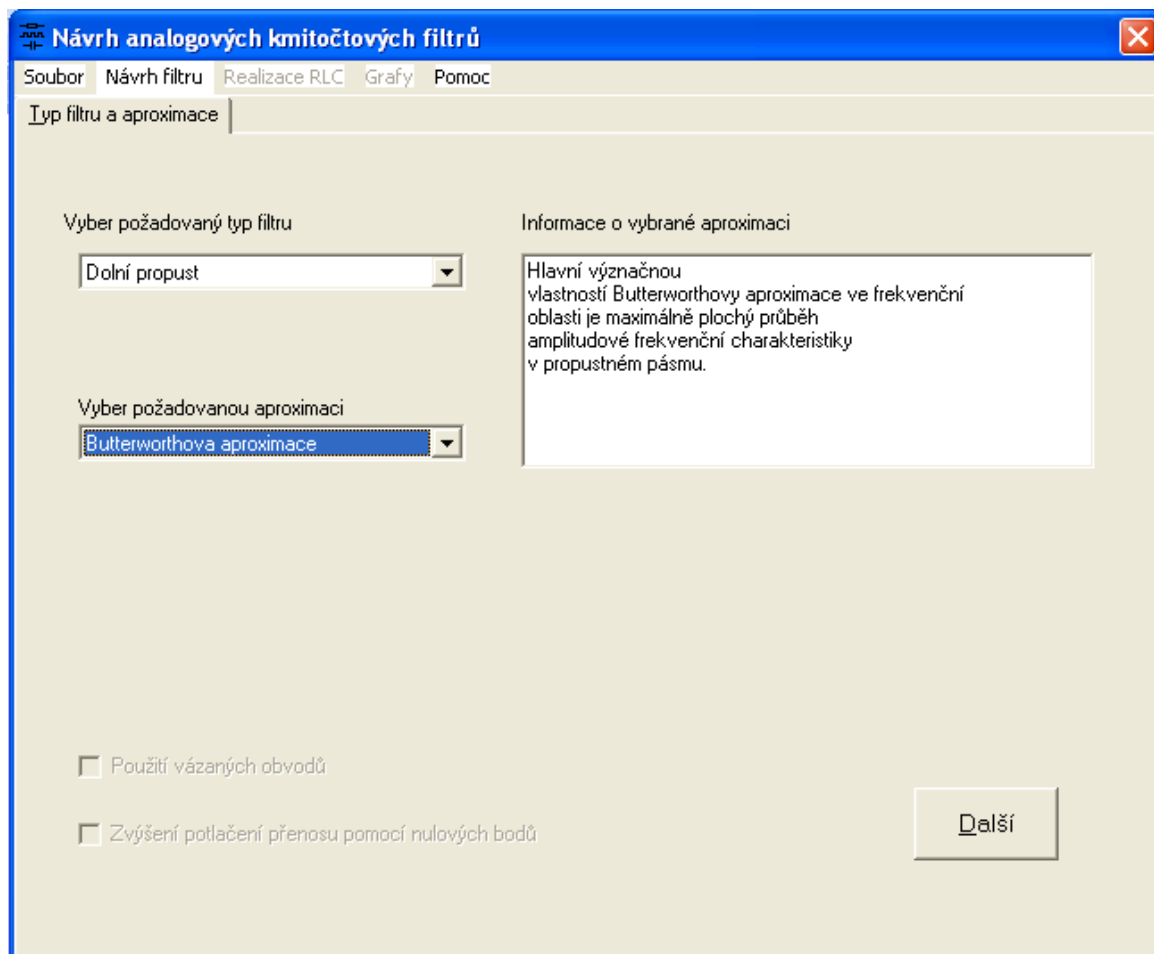
- *Návod*: Základní rady pro práci s programem.

3.2 Návrh filtru

Následující podkapitoly popisují z uživatelského hlediska nejdůležitější část programu, tedy samotný návrh filtru.

3.2.1 Záložka Typ filtru a aproximace

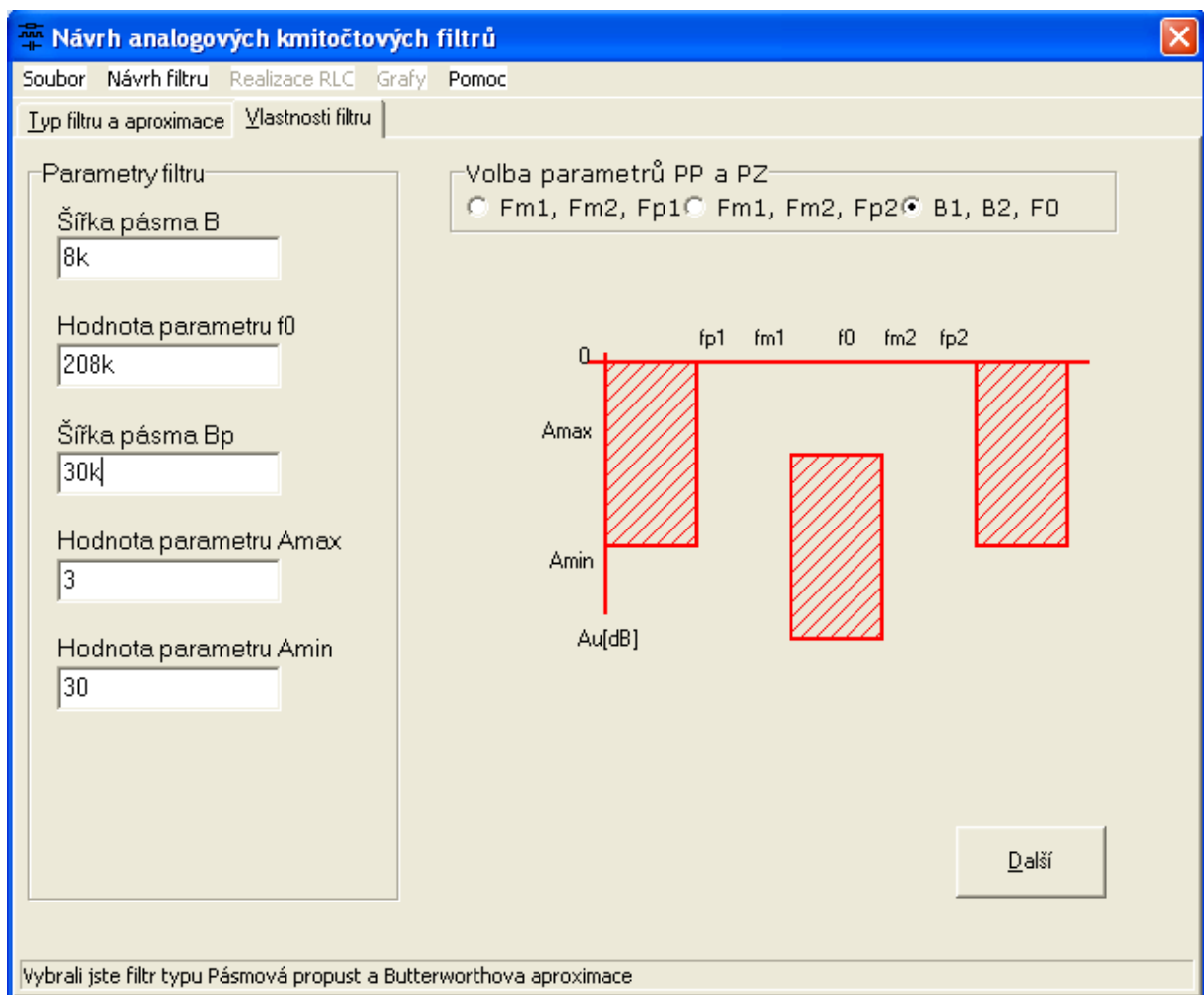
Tato záložka umožňuje uživateli zvolit typ filtru a aproximace, která má být použita při jeho návrhu. Typ i aproximace volí pomocí rozbalovacích nabídek. Ve spodní části záložky jsou umístěna dvě zatrhávací pole, která může uživatel programu použít jen při návrhu pásmové propusti. Při zatržení možnosti použití vázaných obvodů, bude tato metoda použita místo příčkové struktury. Použití zvýšeného použití může pomoci k optimálnějšímu návrhu (viz. Kapitola 2.6.3). Součástí této záložky je taky textové okno, které slouží k výpisu základních vlastností aktuálně zvolené aproximace, což může méně zkušeným uživatelům pomoci s její volbou. Po vybrání požadovaného typu filtru a aproximace se uživatel posune k dalšímu kroku návrhu stiskem tlačítka Další nebo stiskem klávesy ENTER. Zpět k této záložce se následující kroků může uživatel vrátit, kliknutím na jeho záložku. Vzhled záložky je zobrazen na obr. 3.2



Obr. 3.2 Záložka volby typu filtru a jeho aproximace

3.2.2 Záložka Vlastnosti: Zadání požadovaných vlastností filtru

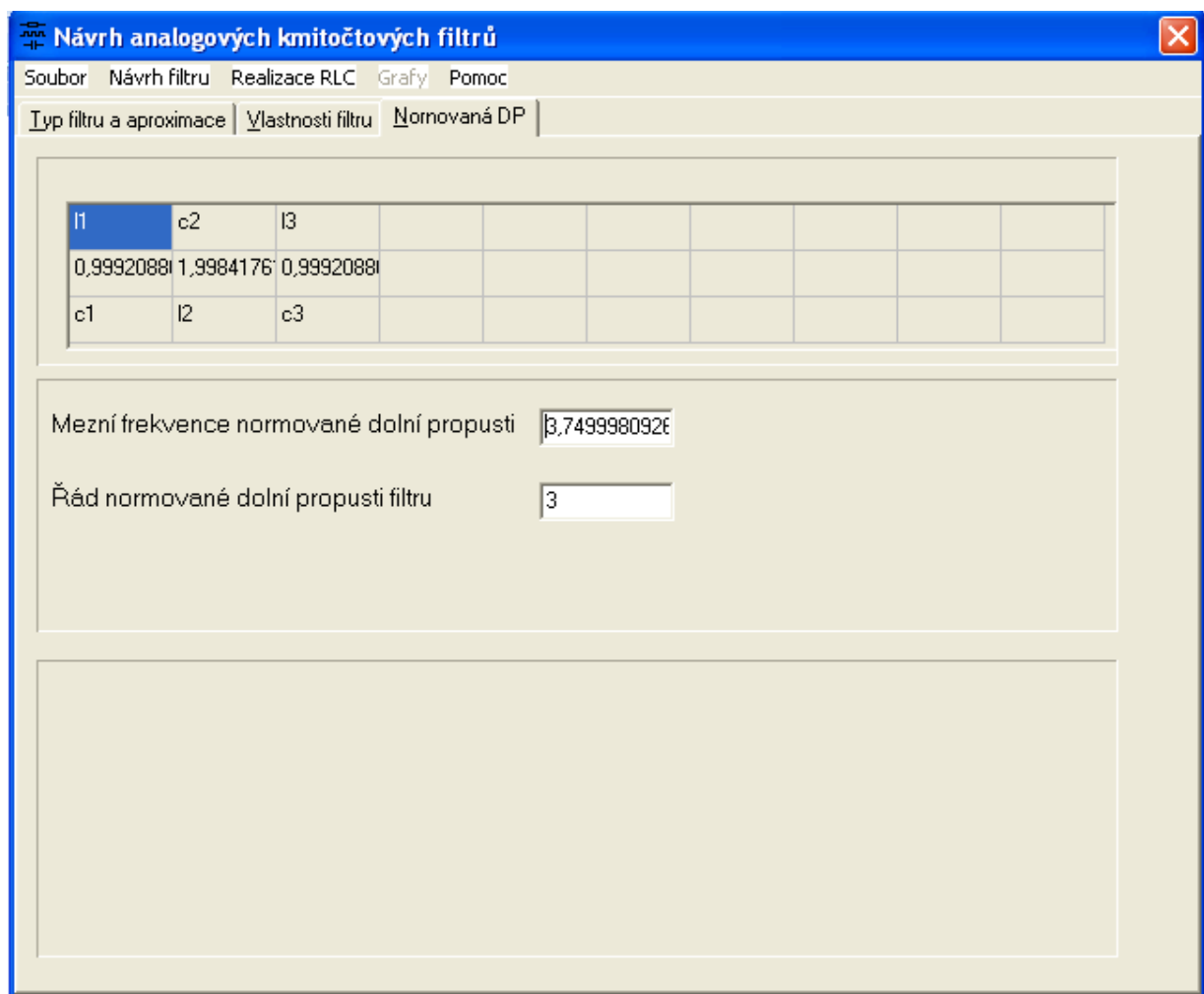
Dalším krokem návrhu filtru popisovaným v kapitole 2.4 je definice tolerančního pásma požadovaného filtru. Tento krok uživatel provede v této záložce. Zadáním mezních frekvencí filtru, dovoleného zvlnění v propustné oblasti a požadované potlačení v nepropustném pásmu. Parametry uživatel zadává v levé části obrazovky. Mezní frekvence může uživatel volit s použitím řádových přípon k a M. Mezi jednotlivými editačními poli je možné se pohybovat pomocí tlačítka Tab. Pro méně zkušené uživatele se po najetí myši na dané editační pole, zobrazí krátká plovoucí nápověda vysvětlující význam parametru. V pravé části obrazovky se uživateli zobrazuje standardní toleranční pole filtru, dle zvoleného typu (dolní propust, horní propust, pásmová propust a pásmová zadrž). Tato záložka také obsahuje stavový řádek, který informuje o zvoleném typu a aproximaci. Po vyplnění všech parametrů filtru, uživatel pokračuje stiskem tlačítka Další. Pokud nebudou parametry zadány nebo budou zadané hodnoty nepřípustné, nelze pokračovat na další krok návrhu a uživatel musí hodnoty opravit. Následující obrázek nám ukazuje vzhled této záložky pro pásmovou propust. Specifikem při návrhu PP a PZ je možnost volby parametrů, jimiž chce uživatel určit své požadavky na filtr, tato nabídka se u návrhu DP a HP neobjeví.



Obr. 3.3 Záložka Vlastnosti filtru

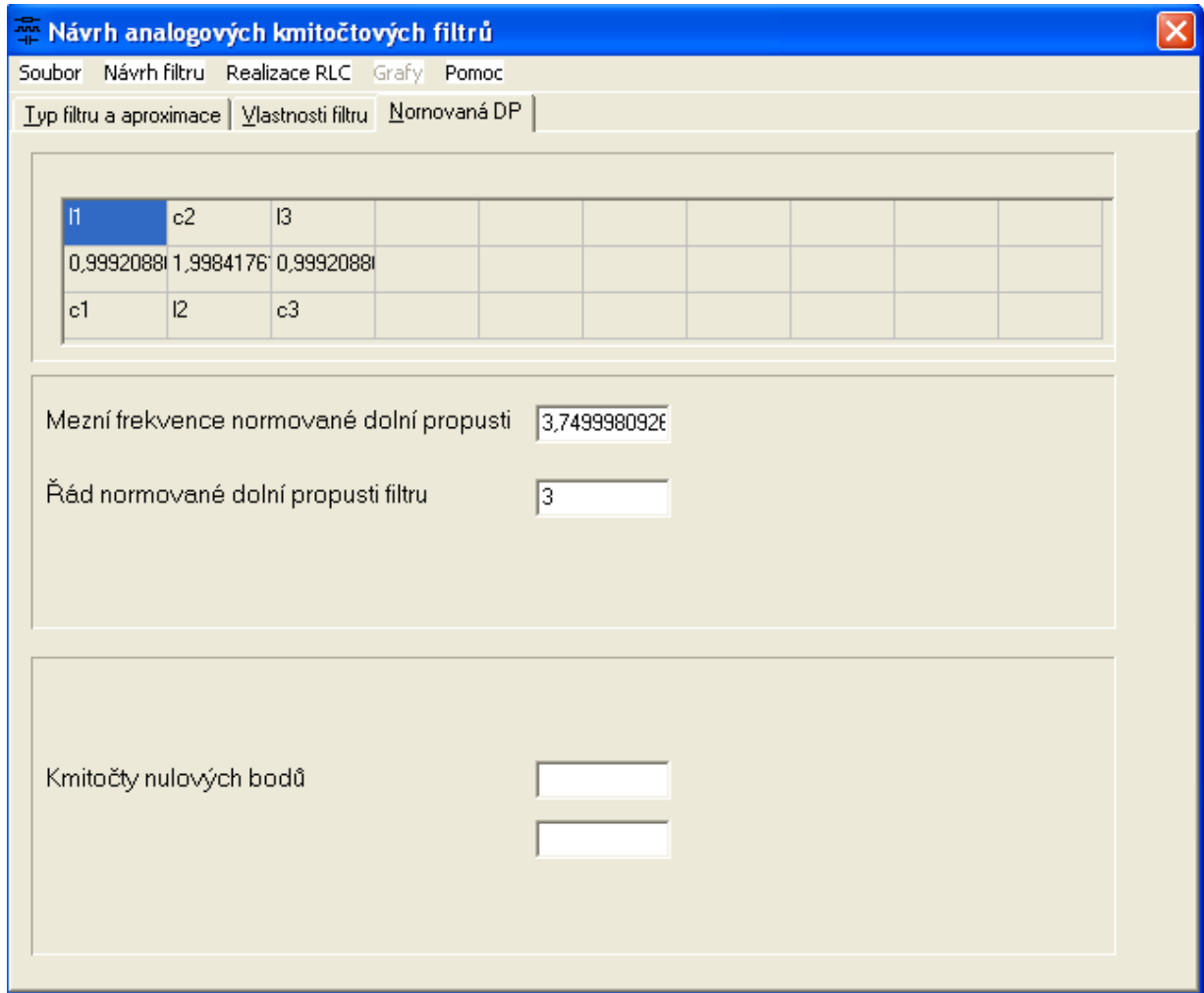
3.2.3 Záložka Normovaná DP: Koeficienty normované dolní propusti

Vzhled záložky je zobrazen na obrázku 3.4 odpovídá návrhu s použitím příčkové struktury. Tato záložka je pouze informativní. V její horní části je zobrazena tabulka, ve které jsou vypsány programem vypočítané koeficienty DP_n . Pod tabulkou je vypsán mezní kmitočet DP_n a řád DP_n . Uživatel si tedy prohlédne zobrazené informace a bude pokračovat stiskem tlačítka Realizace RLC v hlavním menu a volbou zakončovacích rezistorů. Po jeho stisku vyskočí komunikační box (obr. 3.6), který bude požadovat po uživateli zadání zakončovacích rezistorů R1 a R2, přičemž R1 představuje vnitřní odpor zdroje, kterým je filtr napájen a hodnota R2 zastupuje hodnotu odporu zátěže, připojené na filtr. Přiložený obrázek zachycuje situaci v případě, že uživatel zvolí shodné rezistory. Dialog bude mít mírně jiný vzhled pokud, bude zvoleno zakončená nakrátko, naprázdno nebo s obecnými rozdílnými hodnotami rezistorů.

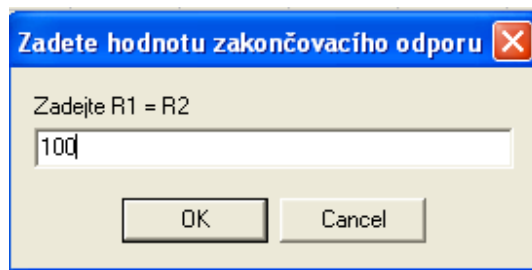


Obr. 3.4 Obrazovka koeficientů DP_n při příčkové struktuře

V případě, že je zvolen návrh vázaných obvodů a využití nul přenosu bude mít tato záložka vzhled zachycený na obrázku 3.5. Objeví se zde tedy navíc dvě editační pole, do kterých uživatel zadá kmitočty, na kterých vyžaduje nulový přenos.



Obr. 3.5 Obrazovka koeficientů DP_n při struktuře vázaných obvodů



Obr. 3.6 Volba zakončovacích rezistorů

3.2.4 Zálóžka Realizace: Hodnoty výsledných součástek a schéma obvodu

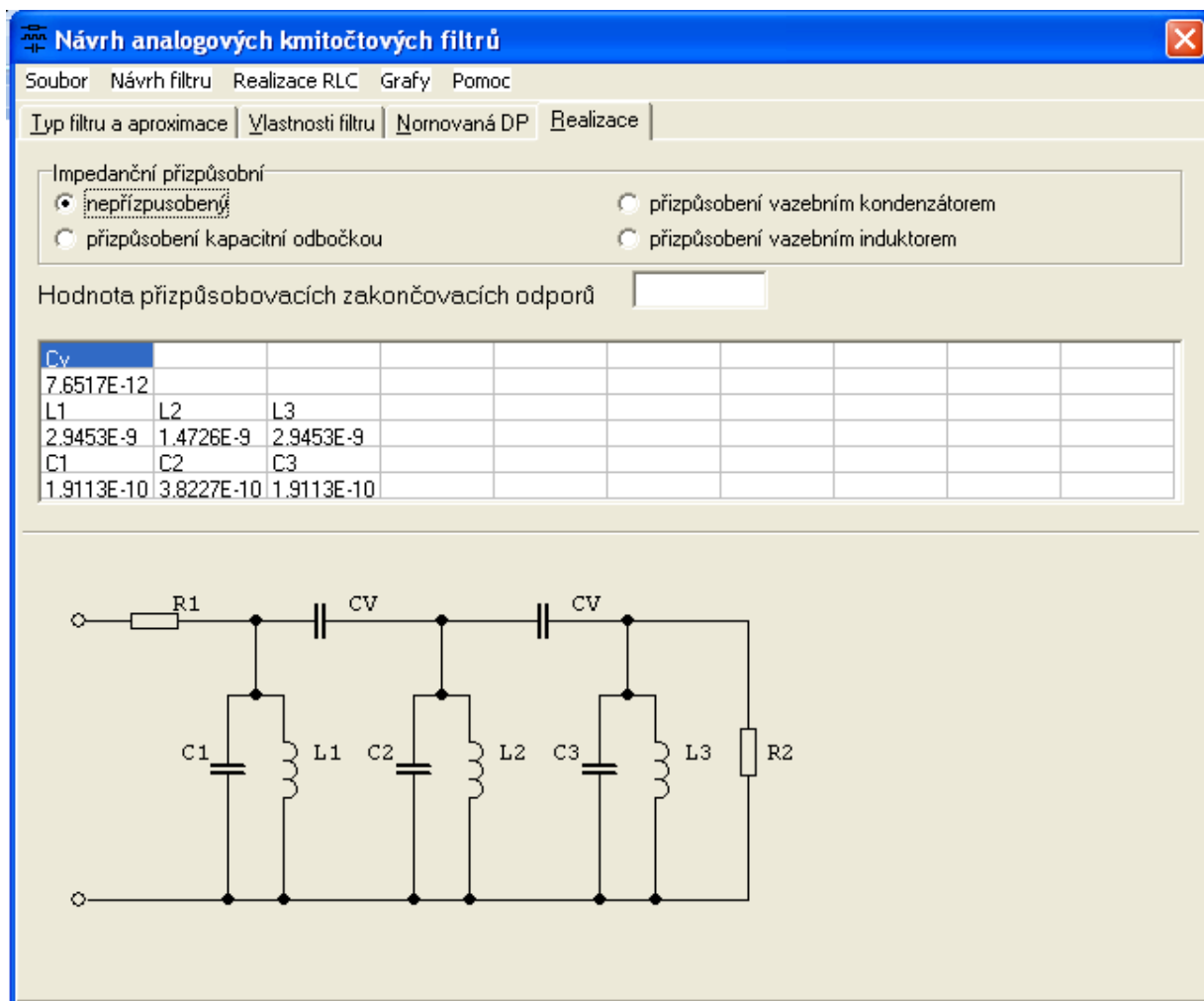
Tato zálóžka je výsledkem celého návrhu filtru, s kterým však bude moci uživatel ještě dále pracovat a to využitím zálóžky Realizace RLC.

Vzhled zálóžky při použití přičkové struktury ukazuje obr. 3.7. V horní části obrazovky může uživatel zvolit, jaké zapojení chce k realizaci filtru použít a ti buď T nebo Π článek. Tato volba ovlivňuje zobrazení dalších dvou součástí zálóžky. V prostřední části zálóžky je zobrazena tabulka, ve které jsou zapsány hodnoty LC součástek obvodu filtru a to dle volby článku v sekci a buď obvodu Π nebo T článku. V dolní části obrazovky je pak schéma obvodu filtru.

Pokud je navrhována pásmová propust pomocí vázaných obvodu vypadá zálóžka poskytující výsledky návrhu dle obrázku 3.8. Místo možnosti volby T nebo Π článku má uživatel možnost zvolit, zda chce nechat obvod nepřizpůsobený nebo jedno ze tří možných impedančních transformací. V případě použití transformace musí nejprve zadat hodnotu přizpůsobovacího rezistoru. Další části už jsou shodné s návrhem přičkové struktury (tabulka stavebních prvků a obvodové řešení).

C1	L2	C3							
1,9879E-10	3,9757E-6	1,9879E-10							
L1	C2	L3							
2,9453E-9	1,4726E-13	2,9453E-9							

Obr. 3.7 Výsledný filtr přičkové struktury (obrázek odpovídá PP 3. řádu, Butterworthově aproximaci a volbě PI článku)



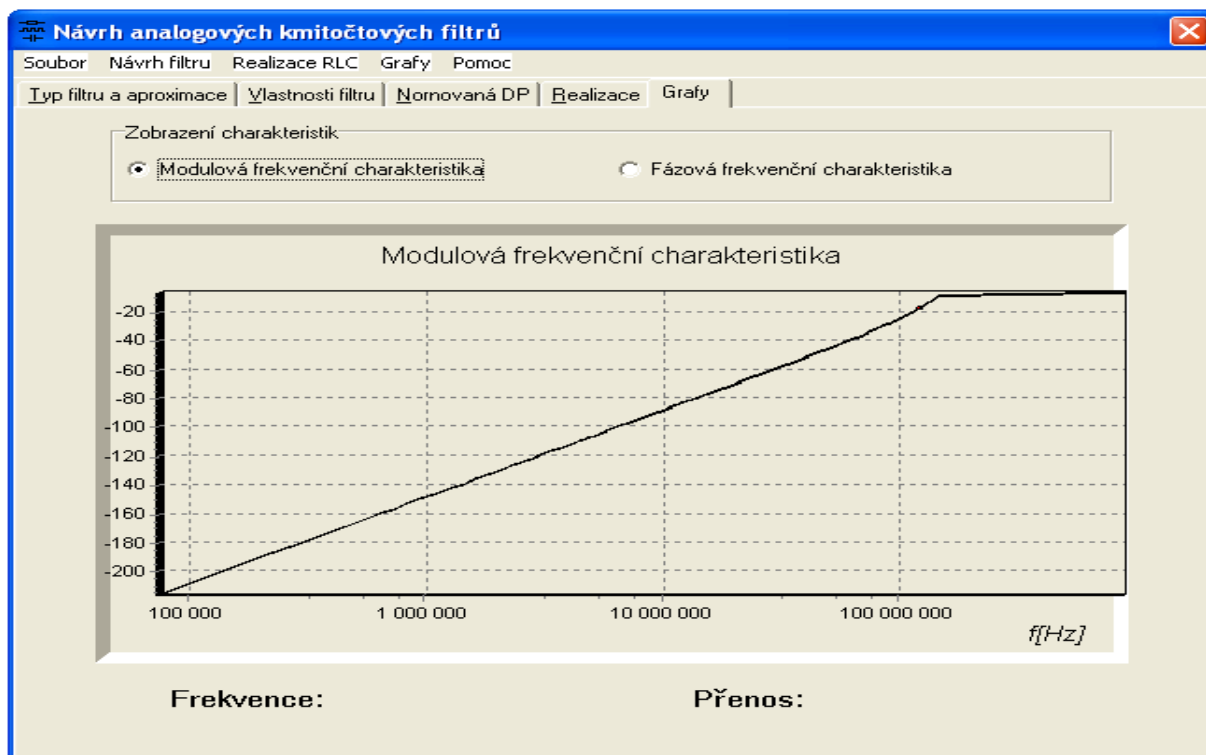
Obr. 3.8 Výsledný filtr struktury vázaných filtrů (obrázek odpovídá PP 3. řádu, Butterworthově aproximaci a je bez přizpůsobení)

3.2.5 Záložka grafy

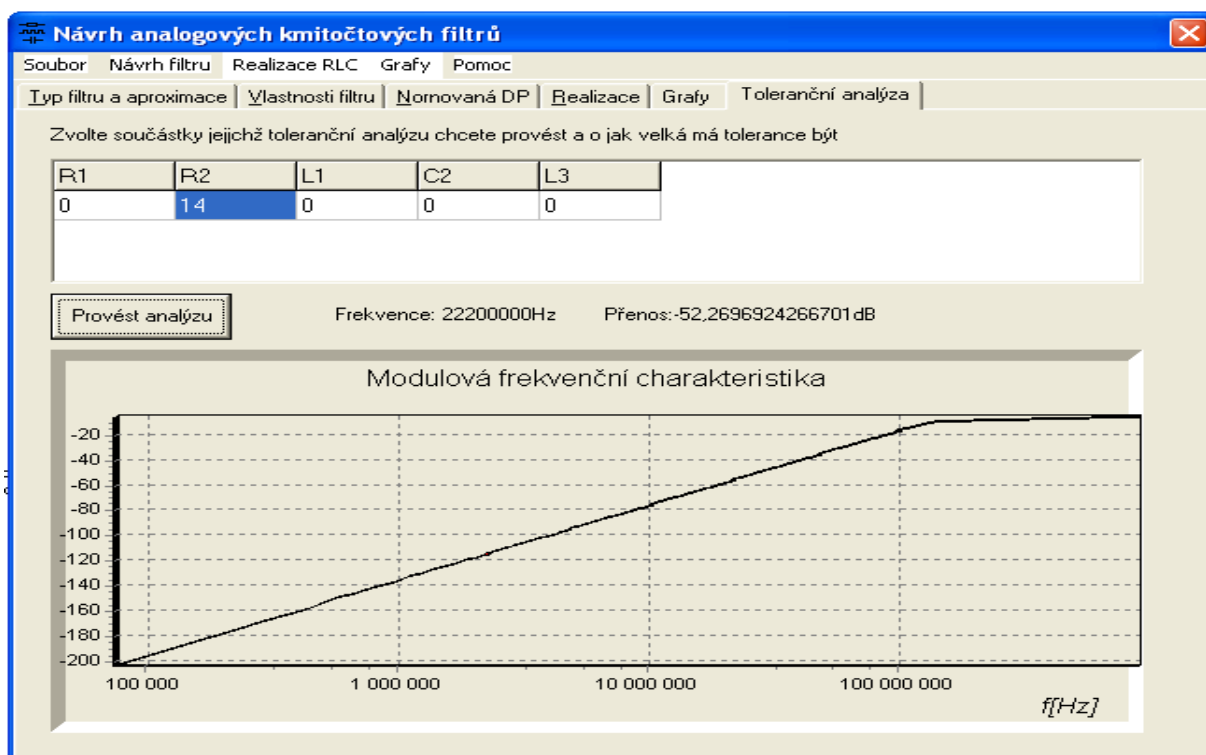
Program poskytuje možnost zobrazení kmitočtových charakteristik navržených filtrů a také jejich tisk. U zobrazeného grafu lze použitím pravého tlačítka myši, libovolně roztahovat kmitočtovou osu a tím si přiblížit nejdůležitější části grafu, zlomové body. Program také vypisuje pod graf příslušnou hodnotu kmitočtu a přenosu, a to pro bod křivky, na který ukazuje kurzor. Vzhled obrazovky je na přiložené ukázce (obr. 3.9).

3.2.6 Záložka Toleranční analýza

V této části programu může uživatel vyzkoušet, jak moc se změní kmitočtová charakteristika grafu v případě, že se hodnota součástek bude lišit o určité procenta od vypočítaných. Procentuální změnu zadá do příslušné buňky tabulky a poté nechá charakteristiku vykreslit (viz. Obrázek 3.10).



Obr. 3.9 Vzhled záložky grafy



Obr. 3.10 Záložka toleranční analýza

4. Popis programu a jeho vývoje

Cílem této kapitoly je popis základních částí zdrojového programu, popis postupů, které byli při jeho tvorbě použity, nastínění základních problémů. V zásadní část programu NPF není prováděna syntéza prototypu DP_n dle kapitoly 2.4.3, která by vedla na obtížné řešení nelineárních rovnic a k návrhu použity tabulky jednotlivých hodnot prvků L a C normovaných dolních propustí, které jsem čerpal ze zdroje [1] a přiložil je k semestrálnímu projektu. V části programu jenž řeší speciální případy zapojení filtru, tedy zapojení s ideální zdrojem napětí (tedy $R_1 = 0$) a zapojení s výstupem na prázdno (tedy $R = \infty$) jsem čerpal tabulky z knihy č. 3. Použití těchto tabulek bylo bezproblémové pro Besselovu a Butterworthovu aproximaci. Na problém jsem však narazil při použití tabulek Čebyševovi aproximace, jejichž hodnoty jsou tabelovány jen pro určité hodnoty útlumu v propustném pásmu. Tento problém jsem se rozhodl řešit aproximací těchto hodnot pomocí metody nejmenších čtverců. Vzhledem k velkému počtu potřebných aproximací jsem si pro tuto úlohy vytvořil samostatný pomocný program Interpolace. K tvorbě schémat použitých v programu byl použit freeware program ProfiCAD, jenž je součástí Balíčku PC Elektro2 vydaného společností Špidla Data Processing.

4.1 Grafické prostředí a použité komponenty

K tvorbě grafického prostředí je použita komponenta PageControl. Tato komponenty umožňuje rozčlenění formuláře na jednotlivé stránky neboli záložky. Jednotlivé záložky vytvářejí nové samostatné komponenty TabSheet typu TTabSheet. Tento fakt umožňuje individuální nastavení každé záložky.

Nejdůležitějším ovládacím prvkem je komponenta MainMenu, která byla použita pro tvorbu hlavního menu. Dalšími ovládacím prvkem použitým v aplikaci je komponenta Button, tedy tlačítko. Tlačítka slouží ke spouštění akce a je využito jeho události (Events) OnClick.

Uživatel zadává vstupní data pomocí komponenty Edit, což je komponenta sloužící k jednořádkovému zadávání textu nebo jeho zobrazování, jejichž nejdůležitější vlastností (properties) je Text, která obsahuje zobrazený (zadaný) text v podobě proměnné typu Ansistring.

Požadavek na typ filtru a aproximaci uživatel zadává pomocí komponenty Combobox. Combobox je rozbalovací seznam pomocí, kterého může být vybrána jedna z nabízených možností. Nejdůležitější vlastností komponenty je ItemIndex, v které je uloženo číslo (typu int) vybrané položky. Položky jsou číslovány od 0. Vlastnost ItemIndex je ve zdrojovém kódu často využita pro větvení programu. Další důležitou vlastností je TStrings, která obsahuje položky seznamu.

V prvním kroku návrhu se uživatel setká s další komponentou umožňující výběr a to s komponentou CheckBox (zatrhávací tlačítko). Jedinou důležitou vlastností komponenty je Checked, udávající je-li box zatržený (hodnota true) nebo ne (hodnota false).

Několikrát během práce s programem má uživatel možnost na výběr z několika možností návrhu (například volba Π mezi T článkem nebo výběr způsobu impedančního přizpůsobení vázaných obvodů). K této volbě slouží komponenta RadioGroup (skupina přepínacích tlačítek), která obsahuje potřebný počet přepínacích tlačítek. Charakteristickým rysem je, že může být vybráno vždy jen jedno tlačítko ze skupiny. Zjišťování toho, které tlačítko je stisknuto (vybráno), se provádí stejně jako u Comboboxu testováním hodnoty vlastnosti ItemIndex. V programu je bezprostřední test stisknutého tlačítka proveden ošetřením procedury OnClick dané komponenty.

Pro možnost ukládání aproximací na disk a jejich opětovného načítání obsahuje aplikace komponenty SaveDialog a OpenFileDialog, pro tisk protokolu o návrhu filtru, je použita komponenta PrintDialog.

Pro zobrazení základních údajů o aproximaci v kroku 1 slouží komponenta Memo, jejíž stěžejní vlastností je vlastnost Lines a jenž slouží k zobrazení víceřádkového textu. K zobrazení obvodového řešení filtrů a k zobrazení tolerančních pásem je použita komponenta Image, jenž umožňuje zobrazit bud obrázky určitých formátů (např. BMP) nebo je možné využití třídy Canvas. K zobrazení hodnot normovaných koeficientů a hodnot LC součástí filtru jsem použil komponentu StringGrid. K tvorbě grafů je použita komponenta Chart, která vykresluje hodnoty uložené ve třídě Series.

K vylepšení vzhledu aplikace, a k seskupení souvisejících komponent je použito oddělovací čáry Bevel z palety Additional a GroupBox z palety Standart.

4.2 Základní struktura programu

Zdrojový kód programu NPF rozdělen do několika samostatných jednotek (unitů), jenž v následujících kapitolách stručně popíšu a vysvětlením jejich funkce. Tento způsob psaní programu má sice za následek zvětšení nároku na kapacitu pevného disku, jenž je nutná k použití programu, ale programový kód se dělením na funkce, které spolu souvisí, stává značně přehlednějším. V průběhu tvorby programu jsem se snažil pro opakující se úkony vytvářet vlastní funkce, aby nebylo nutné opakovat několikrát stejné bloky a tím komplikovat kód, avšak z důvodu rozdílnosti operací v jednotlivých větvích programu, to nebylo vždy možné. Základním prvkem programu je jeho větvení pomocí funkce Switch, což vyplývá z charakteru programu, kdy jsou požadovány různé operace dle zvolené aproximace a typu filtru.

4.2.1 Unit1

Unit1 je základní jednotkou programu, jenž obsahuje zejména část programu zajišťující jeho bezprostřední činnost, tedy OnClicky jednotlivých tlačítek v níž nejdůležitější roli hrají tlačítka Další v jednotlivých záložkách při návrhu filtru. Mimo tuto část obsahuje Unit jedna také deklaraci globálních proměnných a deklaraci funkcí, jenž program používá. Program obsahuje několik globálních proměnných jejich počet jsem snažil omezit v další části této kapitole uvedenu seznam funkcí a procedur s jejich stručným popisem, které obsahuje tato jednotka. Bližší komentáře obsahuje zdrojový kód programu.

Globální proměnné:

R1, R2	slouží k uložení hodnot zakončovacích rezistorů (typ float)
B	proměnná pro uložení šířky propustného pásma PP (typ float)
F0	použita k uložení střední frekvence PP (typ float)
koeficient	uložení kmitočtového kroku, použita při vykreslování grafů (typ float)
t_typ	slouží k uložení typu filtru (výčtový typ enum)
t_aproximace	použitá k uložení aproximace filtru (výčtový typ enum)
pole_bessel	pole normovaných koeficientů Besselovi aproximace (typ float)

pole_butter	pole normovaných koeficientů Butterworthovi aproximace (typ float)
Butter_nakratko	pole normovaných koeficientů Butterworthovi aproximace pro zakončení nakrátko (typ float)
Butter_nakratko	pole normovaných koeficientů Butterworthovi aproximace pro zakončení naprázdno (typ float)
pole_cebisev	pole normovaných koeficientů Čebiševovi aproximace (typ float)
t_filtr	struktura sloužící k uložení parametrů filtru

Funkce:

void fADD(t_typ _typ, t_aproximace _apro, int _Fm1, int _Fm2, int _Fp1, float _Amax, float _Amin)

Slouží k uložení zadaných parametrů filtru do struktury t_filtr.

void ftabulka(float _rad)

Slouží k vypsání jmen normovaných součástek do tabulky normovaných koeficientů DP_n.

float fArccosh(float _x)

Slouží k výpočtu hyperbolického arcuscosínus vstupní hodnoty x.

float fRezistor(AnsiString R)

Používá se při zadávání zakončovacích rezistorů.

float ff0(float _FM1, float _FM2)

Funkce vypočítá střední frekvenci f0 PP nebo PZ, při známých mezních frekvencích

float fabsolut (float _a, float _b, float _c)

Vypočítává pomocnou proměnnou využitou při výpočtu mezní frekvence DP_n při PP a PZ.

float fpodil (float a, float b)

Funkce realizující podíl.

float fFp1(float _Bp, float _F0)

Výpočet kmitočtu potlačení f_{p1}.

float fFp2(float _Bp, float _F0)

Výpočet kmitočtu potlačení f_{p2}.

float konstKl (float _R, float _Fm)

float konstKl (float _R, float _Fm)

float konstKl (float _R, float _Fm)

Funkce počítající konstanty K_i, K_c a K_b potřebné ke kmitočtovému odnormování.

float fFDPNPP(float _F0, float _B, float _Fp1)

Výpočet normované mezní frekvence pásmové propusti, při znalosti f₀, B_m a f_{p1}.

float fFDPNPZ(float _F0, float _B, float _Fp1)

Výpočet normované mezní frekvence pásmové propusti, při znalosti f₀, B_m a f_{p1}

float butterworth

Používá se k výpočtu řádu Butterworthovi aproximace.

float fCebisev(float _Amin, float _Amax, float _Fdpn)

Používá se k výpočtu řádu Čebiševovi aproximace.

float cauer (float _Amin, float _Amax, float _Fdpn)

Používá se k výpočtu řádu Cauerovi aproximace.

void showfiltr(void)

Funkce zajišťující zobrazení parametrů filtru do příslušných editů.

void draw_line(int x1, int y1, int x2, int y2)

Funkce pro kreslení čar, vstupní parametry představují souřadnice počátečního a koncového bodu.

void draw_text(void)

Funkce pro psaní textu, nastavení vlastností textu.

void draw_blok(int a, int b, int c, int d)

Funkce pro kreslení obdélníku, vstupní parametry představují souřadnice levého horního a pravého dolního rohu.

void statuspanel(void)

Funkce vypisující do StatuBaru vybraný typ filtru a jeho aproximaci.

void MMrad(int rad_filtru)

Funkce ošetřující situaci, kdy je řád filtru mimo meze $1 < n < 11$.

int frad(int rad_filtru)

Slouží k výpočtu počátečního řádku při zjišťování norm. koeficientů Čebiševovi aproximace.

void tabulkaprickovaPP(void)

Změna parametrů tabulky součástí.

události Unitu 1:

*void __fastcall Tuvod::mbtnKonec1Click(TObject *Sender)*

Ukončení programu, tlačítkem MainMenu.

*void __fastcall btndalsi1Click(TObject *Sender);*

Tato událost zajišťuje vykreslení vhodného tolerančního pole zobrazeného na záložce krok2 (viz obrázek 3.3) a připraví potřebné editační pole pro zadání parametrů filtru.

*void __fastcall btndalsi2Click(TObject *Sender);*

Provádí výpočet mezní frekvence filtru a řádu filtru a to využitím různých funkcí (viz výše) dle typu aproximace a typu filtru a uloží parametry do globální proměnné filtr Výpis normovaných koeficientů.

*void __fastcall FormCreate(TObject *Sender);*

Definuje počáteční nastavení programu při jeho spuštění.

*void __fastcall mbtnNavrh1Click(TObject *Sender);*

Start vlastního návrhu, zobrazení záložky1 jedna a skrytí ostatních záložek.

*void __fastcall cbAproximaceChange(TObject *Sender);*
 Při změně vybrané aproximace se mění text v Memo1, dle vybrané aproximace.

*void __fastcall rgClanekClick(TObject *Sender);*
 Zobrazení hodnot součástí příčkového filtru a obvodového řešení filtru, dle volby T nebo II článku.

*void __fastcall mbtnUlozClick(TObject *Sender);*
 Uloží parametry filtru uložené ve struktuře t_filtr na pevný disk použitím komponenty Savedialog.

*void __fastcall mbtnNactiClick(TObject *Sender);*
 Načte uložený filtr s pevného disku využitím komponenty OpenFileDialog a zobrazí jeho parametry

*void __fastcall zobrazgrafy1Click(TObject *Sender);*
 Zobrazí se záložka využívaná pro zobrazení grafů.

*void __fastcall Tuvod::cbTyp_filtruChange(TObject *Sender);*
 Zajišťuje zpřístupnění volby použití vázaných obvodů a nulových bodů, jen v případě použití pásmové propusti.

*void __fastcall Tuvod::RGpasmaClick(TObject *Sender);*
 Změna formátu zadávání požadovaných parametrů při návrhu PP -> změna popisků editů.

*Void __fastcall Tuvod::RgprizpusobeniClick(Tobject *Sender);*
 Výpočet hodnot součástí vázaných obvodů, dle zvoleného přizpůsobení (větvení běhu programu dle ItemIndex této komponenty).

*void __fastcall rgGrafyClick(TObject *Sender);*
 Výpočet modulové nebo fázové kmitočtové charakteristiky (podle stisknutého tlačítka) a její zobrazení do grafu.

*void __fastcall Tuvod::Ulofiltr1Click(TObject *Sender)*
 Uložení hodnot součástí do tabulkového editoru.

*void __fastcall Tuvod::Oprogramu1Click(TObject *Sender)*
 Zobrazení Formu2 obsahujícího několik několik informací o programu

*void __fastcall Tuvod::R1R21Click(TObject *Sender)*
 Výpočet hodnot součástí filtru pro rozdílné hodnoty zakončovacích odporů. Výpočet větven, dle typu filtru. Zobrazení záložky krok4. Není ještě zcela funkční.

*void __fastcall Tuvod::mbtnR1R21Click(TObject *Sender)*
 Výpočet hodnot součástí filtru pro oboustranné shodné zakončení. Výpočet větven, dle typu filtru. Zobrazení záložky krok4.

*void __fastcall Tuvod::mbtngrafikaClick(TObject *Sender)*
 Změna barevného vzhledu aplikace.

*void __fastcall Tuvod::R10R211Click(TObject *Sender)*
 Výpočet hodnot součástí filtru pro zakončení nakrátko. Výpočet větven, dle typu filtru. Zobrazení záložky krok4.

*void __fastcall Tuvod::mbtnAnalyzaClick(TObject *Sender)*
Zobrazení záložky pro testování tolerance součástí.

*void __fastcall Tuvod::Button1Click(TObject *Sender)*
Vykreslení přenosové kmitočtové charakteristiky filtru s uvažováním zvolené odchylky hodnot součástí v toleranční analýze

*void __fastcall Tuvod::Chart2MouseMove(TObject *Sender, TShiftState Shift, int X, int Y)*
Údálost reaguje na pohyb myši nad komponentou Chart2 a na základě polohy kurzoru vypisuje hodnoty zobrazené křivky.

*void __fastcall Tuvod::Chart1MouseMove(TObject *Sender, TShiftState Shift, int X, int Y)*
Údálost reaguje na pohyb myši nad komponentou Chart1 a na základě polohy kurzoru vypisuje hodnoty zobrazené křivky.

*void __fastcall Tuvod::Tisk1Click(TObject *Sender)*
Sestavení formuláře, který není zobrazen, ale je vytisknut. Formulář obsahuje všechny podstatné informace o návrhu filtru (požadavky i výslednoé součástky a obvod).

*void __fastcall Tuvod::PageControl1Change(TObject *Sender)*
Událost reagující na vládání PageControlu1, pomocí jeho záložek, skrytí některých záložek).

*void __fastcall Tuvod::mbtnTiskgrafu1Click(TObject *Sender)*
OnClick tlačítka MainMenu obsluhující tisk grafu.

*void __fastcall Tuvod::R11R2nekoneno1Click(TObject *Sender)*
Výpočet hodnot součástí filtru pro zakončení naprázdno. Výpočet větven, dle typu filtru. Zobrazení záložky krok4.

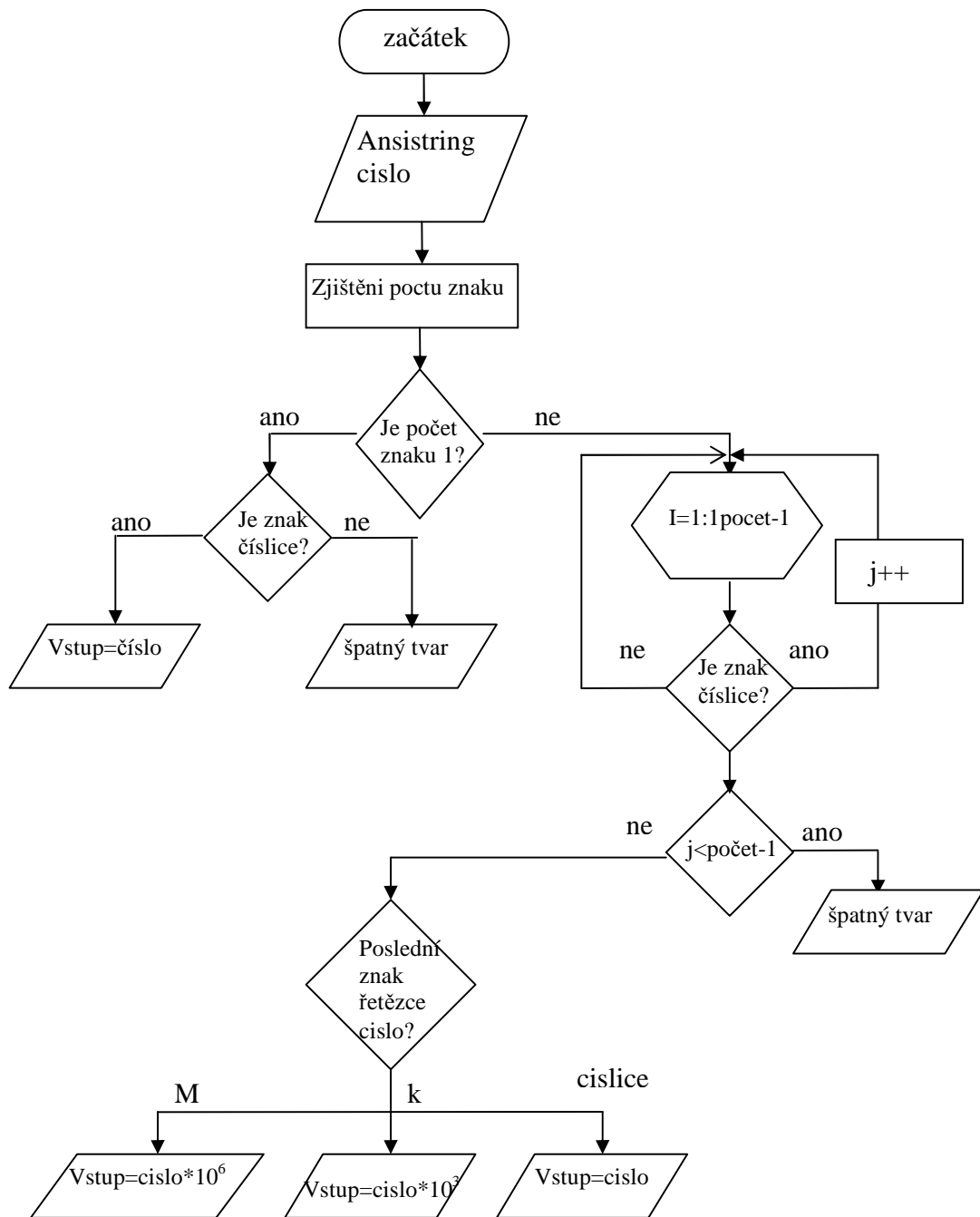
4.2.2 Unit Beseel

Úkolem této samostatné jednotky (Unitu) obsahující dvě funkce je zjištění (výpočet) řádu filtru při použití Besselovi aproximace. Pro Besselovu aproximace na rozdíl od dalších použitých aproximací neexistuje matematický vzorec, jehož pomocí by se dal jednoduše určit řád filtru. Je proto nutné určit řád filtru přímo z modulových charakteristik filtru.

Funkce Bessel je volaná z hlavního Unitu se dvěma vstupními parametry. Jedním je mezní frekvence DP_n a druhým požadovaný útlum v nepropustném pásmu. Tyto parametry můžeme interpretovat jako hodnotu frekvence při, která má být útlum roven nebo větší než požadovaný útlum. Funkce Bessel spočítá s využitím Besselových polynomů zvlášť reálnou a imaginární složku přenosové funkce 2. řádu až 7. řádu, jež jsou vstupními parametry druhé funkce výpočet. Funkce výpočet spočítá modul přenosu K_u na dané frekvenci a porovná jestli je vypočítaný modul útlumu větší než požadovaný útlum, pokud ano její návratovou hodnou je 1 a pokud ne(spočítaný útlum je menší než požadovaný) vrací 0. Funkce Bessel poté tuto návratovou hodnotu testuje, a pokud je její hodnota 1, vrací do hlavního programu, odkud byla volána řád, jehož útlum byl právě spočítán. Pokud je však návratová hodnota 0, pokračuje funkce výpočtem modulu útlumu o jeden řád vyššího a takto dále dokud funkce výpočet nevrátí 1 nebo nedojde funkce až do svého maximálního řádu, jenž je prozatím 7. Tady je jedna z možností dalšího rozšíření aplikace.

4.2.3 Unit File

Tento Unit realizuje dvě funkce. První z nich zlepšuje uživatelskou přívětivost aplikace tím, že umožňuje uživateli zadávat frekvence ve tvaru XXXY, přičemž znak X reprezentuje číslici a znak Y písmeno k nebo M). Funkce funguje v několika krocích a její slovní popis by byl výrazně nepřehledný, proto je jeho funkce popsána vývojovým diagramem na obr. 4. 1.



Obr. 4.1 Vývojový diagram funkce Postfix

Druhá funkce s názvem Testik, ošetřuje možné chybné vstupy, které by uživatel mohl zadat do komponent typu Unit. A s její pomocí tedy dochází k testování všech vstupních hodnot, jenž uživatel při chodu programu zadává. Princip funkce je velmi jednoduchý, pomocí cyklu for dochází k procházení zadaného řetězce typu Ansistring znak po znaku. A každý znak je testován pomocí funkce podmínky if, jestli je číslicí 0-9 nebo znak “,“. Pokud podmínka neplatí (znak je číslice nebo“ ,,,) je přičtena k proměnné „j“ jednička. Po proběhnutí cyklu for, tolikrát kolik má řetězec znaků. Je testována proměnná „j“, pokud je menší než počet znaků kódu, vrací funkce 0. V hlavním programu je posléze vyhodnoceno, že byla zadána chybná vstupní hodnota a uživatel je upozorněn pomocí Messageboxu.

4.2.4 Unit Zobrazobvod

Tento Unit obsahuje pouze jednu funkci, která zajišťuje zobrazení schématu navrženého filtru do komponenty obvod typu TImage a komponenty Schéma téhož typu. Jeho funkce je tvořena konstrukcí Switch-case, která větví běh programu, dle vybraného článku (T nebo []). K čtení obrázku ze souboru je použita metoda LoadFromFile(). Schéma obvodu je uloženo ve formátu BMP.

4.2.5 Unit Zobraz_vazany_obvod

Jednotka plní obdobou funkci jako unit Zobrazobvod jen s tím rozdílem, že zobrazuje obvody filtrů navržených strukturou vázaných obvodů. Opět je použito konstrukce switch a metody LoadFromFile().

4.2.6 Unit funkce_nuly_prenosu

Unit funkce_nuly_prenosu obsahuje čtyři jednoduché funkce. Všechny tyto funkce jsou čistě početní a realizují výpočet hodnot součástek, které jsou do původního obvodu přidány, jestliže je použito zvýšení útlumu přenosu pomocí nul přenosu. Funkce tedy provádí výpočet součástek La, Ca, Lb a Cb, dle vzorců 2. 17 a 2. 18. Vstupní i výstupní hodnoty jsou typu float (reálné). Tento unit používá knihovnu math.h, která mu umožňuje použití příkazu pow (double x, double y) pro výpočet mocniny, kde x představuje základ mocniny a y exponent.

float fLa(float _L, float _Fnul, float _F0),

float fCa(float _La, float _Fnul),

float fCb(float _C, float _Fnul, float _F0),

float fLb(float _Cb, float _Fnul).

4.2.7 Unit funkce_vazane_obvody

Stejně jako předešlý unit i tento unit obsahuje funkce, které provádí výpočet součástek filtru. Tentokrát se jedná o součástky obvodů vázaných obvodů, provádí se tedy výpočty dle vzorců 2. 13, 2. 14, 2. 15 a 2. 16. Jedná se tedy o výpočet samotných vázaných struktur a také o výpočty součástek při použití třech různých impedančních transformací (přizpůsobení). Funkce opět používá knihovnu math.h.

float fCv(float _R, float _F0)

Funkce vypočítává hodnotu vazebního kondenzátoru.

float fLn(float _R,float _F0, float _B, float _an)

Funkce pro výpočet cívky vázaného rezonančního obvodu.

float fCn(float _R, float _F0, float _Ln, float _n, float _m, float _Cv)

Funkce pro výpočet cívky vázaného rezonančního obvodu.

float fCn1_kapacitni_odbocka(float _R,float _R1, float _Cn)

float fCn2_kapacitni_odbocka(float _Cn1,float _Cn)

Funkce realizující výpočet kondenzátoru kapacitní odbočky.

float fCn2_vazebni_kapacitor(float _R,float _R1, float _F0)

float fCn1_vazebni_kapacitor(float _Cn2,float _Cn, float _F0, float _R1)

Funkce realizující výpočet kondenzátoru při použití přizpůsobení vazebním kondenzátorem.

float fLv(float _R,float _R1, float _F0)

float fCn_vazebni_induktor(float _Lv,float _Cn, float _F0, float _R1)

Funkce realizující výpočet kondenzátoru a cívky při použití přizpůsobení vazebním induktorem.

4.2.8 Unity pro vykreslování grafů

Velkou část zdrojového kódu programu tvoří unity, zabývající se vykreslováním grafů. Přidání možnost zobrazení grafu a tím kontroly funkce přímo v programu se ukázalo jako relativně náročný problém. Komplikací byla zejména nutnost pracovat po celou dobu s komplexními čísly. Program proto nekreslí grafy všech variant obvodů a v tomto směru bude program dále vyvíjen. K tvorbě grafů bylo použito dvou rozdílných přístupů.

První metodou bylo použití přenosových charakteristik vygenerovaných programem SNAP. Program SNAP vypočítává přenosové funkce obvodů na základě vytvoření obvodového schématu. Program dané schéma analyzuje pomocí metody MUN a vypočítá příslušnou funkci. Původní myšlenkou tedy bylo upravení těchto vzorců a jejich využití v programu NPF. Tento přístup byl však možný pouze u filtrů typu horní a dolní propust. U složitějších struktur a zejména vyšších řádů, nebylo již možné takto získané vzorce do programu implementovat. Potom musel přijít na řadu druhý způsob, kterým bylo provedení analýzy obvodu pomocí metody MUN, tak jak je popsána v kapitole 2.7.

4.3 Ošetření výjimek

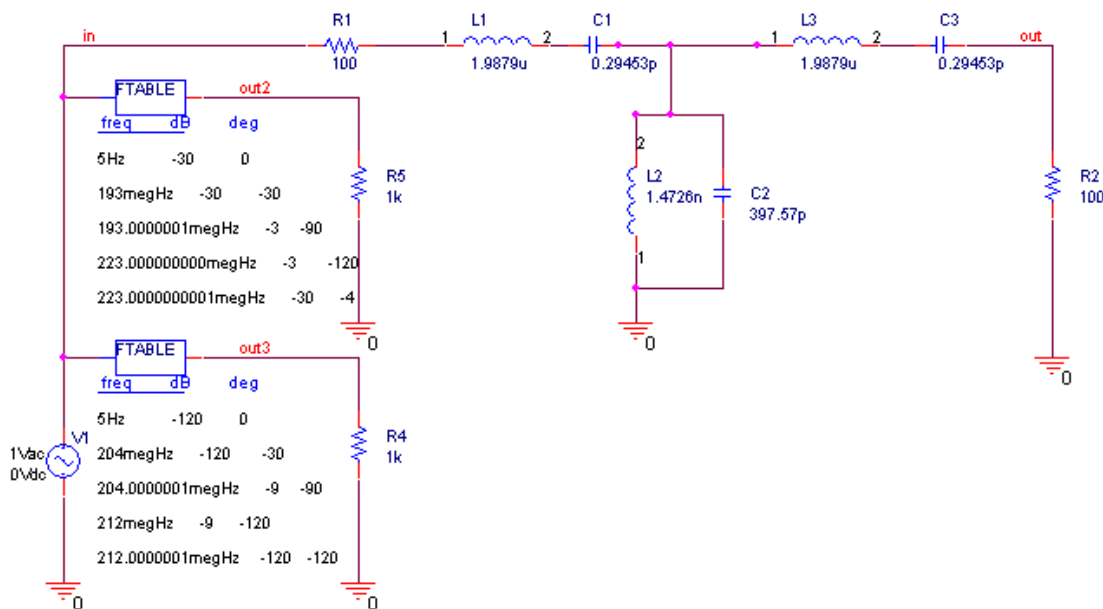
Důležitou částí programu je také programové ošetření situace, kdy uživatel zadá do editačních polí nepřipustnou hodnotu nebo se bude snažit provést jinou nepřipustnou operaci. Tyto situace jsou ošetřeny dvěma způsoby. Na jedné straně jsou některá tlačítka, která by při použití v nevhodný okamžik návrhu mohla způsobit problém, znepřístupněna nastavením vlastností Enabled na false. A skupinu druhých opatření reprezentuje funkce testik, která brání uživateli zadat do editačních polí nepřipustnou hodnotu (například písmeno či jiné nepřipustné znaky nebo nepovolenou číselnou hodnotu).

5. Test správnosti návrhu programem

Tak jako u každé jiné aplikace tak i u programu Návrh příčkových filtrů je nejdůležitější jeho správná funkce a až v okamžiku, kdy program správně funguje, klademe důraz na uživatelskou přívětivost. Proto bylo nutné nalézt spolehlivý a názorný způsob ověření funkce filtrů, které byli daným programem navrženy. Praktická realizace a testování navržených obvodových struktur, by bylo časově náročné a pouhé porovnávání s výsledky jiných programů neprokazatelné (navíc velké množství programů není v plné verzi volně šiřitelné), proto jsem k ověření správného návrhu použil simulační prostředí OrCAD Pspice. Tento program jsem si vybral i proto, že je využíván při výuce na našem ústavu.

Nejdůležitější charakteristikou filtru je přenosová frekvenční charakteristika. I samotný uživatel zadává požadavky na filtr ve formě vlastností této charakteristiky. Vzhledem k tomu bude i kontrola návrhu spočívat v měření (našem případě simulování) této charakteristiky. Z důvodu maximální názornosti výsledků testů je naměřený frekvenční průběh přenosu srovnán s tolerančním polem (viz. kapitola 2.4.1). Zobrazení tolerančního pole bylo zajištěno paralelním zapojením komponenty FTABLE (obr. 5.1), která umožňuje nastavení požadovaného průběhu přenosové frekvenční charakteristiky, zadáním přenosu v jejich diskretních bodech (zlomové kmitočty).

V tabulce 5.1 jsou uvedeny testované filtry, u kterých byla použita příčková struktura a oboustranné shodné impedanční zakončení ($R_1 = R_2$). Tabulka 5.2 obsahuje přehled testovaných filtrů příčkové struktury se zakončením naprázdno a nakrátko. Základní vlastnosti testovaných filtrů, které byly navrženy strukturou vázaných obvodů, naleznete v tabulce 5. 3. Na následujících obrázcích jsou potom znázorněny výsledky testů.



Obr. 5.1 Zapojení obvodu v simulační prostředí Pspice (obvod PP, Butterworthova aproximace, řád 3, $R_1 = R_2$)

Č. testu	Použitá aproximace	Použitá obvodová struktura	Typ filtru	Zakončovací odpor [Ω]
1	Besselova	P	Dolní propust	100
2	Butterworthova	P	Dolní propust	100
3	Čebyševova	T	Dolní propust	100
4	Butterworthova	T	Horní propust	50
5	Čebyševova	P	Horní propust	50
6	Besselova	P	Pásmová propust	50
7	Čebyševova	T	Pásmová propust	300
8	Butterworthova	P	Pásmová propust	40
9	Čebyševova	T	Pásmová zadrž	800
10	Besselova	P	Pásmová zadrž	200

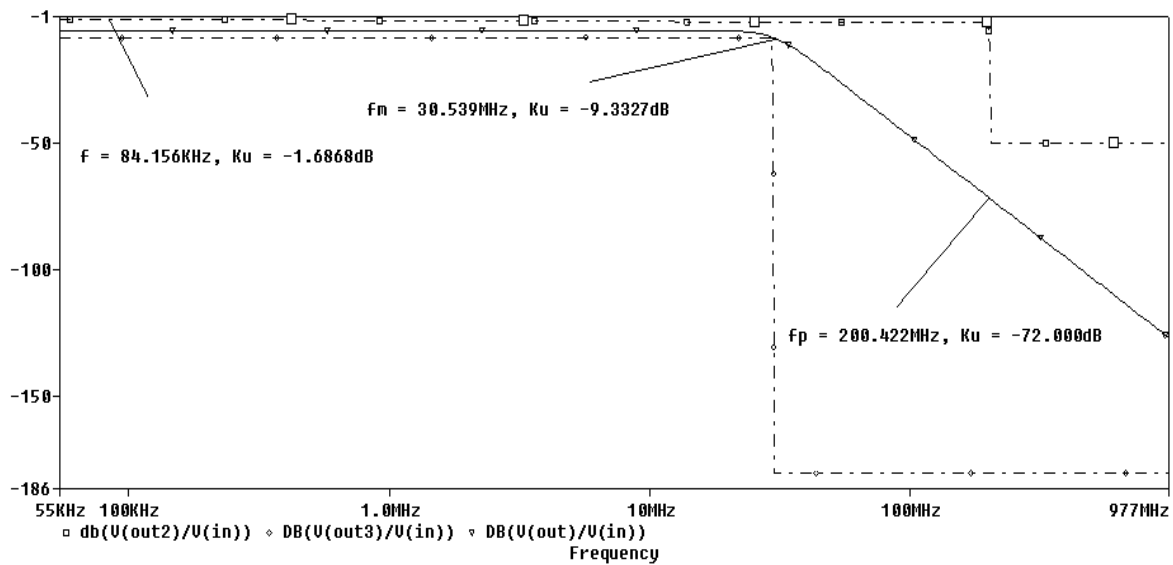
Tab. 5.1 Vlastnosti testovaných filtrů příčkové struktury s $R_1 = R_2$

Č. testu	Použitá aproximace	Použitá obvodová struktura	Typ filtru	Zakončovací odpory [Ω]
11	Butterworthova	P	Dolní propust	$R_1 = 50, R_2 \rightarrow \infty$
12	Butterworthova	T	Pásmová propust	$R_1 = 50, R_2 \rightarrow \infty$
13	Butterworthova	P	Horní propust	$R_1 = 100, R_2 \rightarrow \infty$
14	Butterworthova	T	Dolní propust	$R_1 = 0, R_2 = 100$
15	Butterworthova	T	Pásmová propust	$R_1 = 0, R_2 = 100$
16	Butterworthova	P	Pásmová zadrž	$R_1 = 0, R_2 = 200$

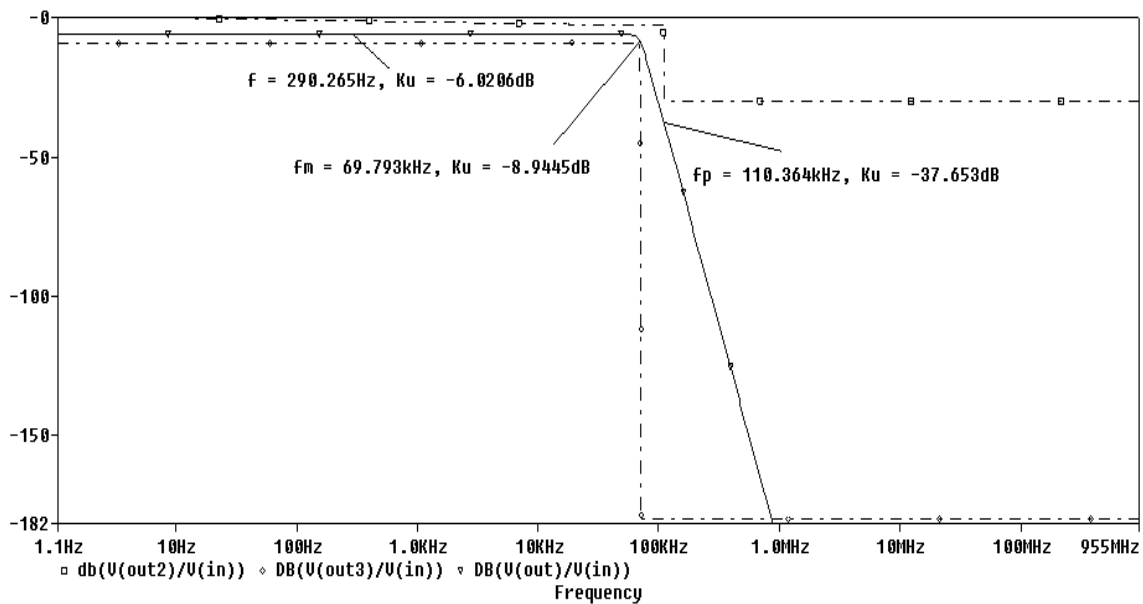
Tab. 5.2 Vlastnosti testovaných filtrů příčkové struktury s $R_1 = 0$ nebo $R_2 \rightarrow \infty$

Č. testu	Použitá aproximace	Typ filtru	Impedanční transformace	Použití nulových bodů
17	Besselova	Pásmová propust	Bez transformace	NE
18	Butterworthova	Pásmová propust	Kapacitní odbočka	NE
19	Butterworthova	Pásmová propust	Kapacitní vazba	NE
20	Butterworthova	Pásmová propust	Induktivní vazba	NE

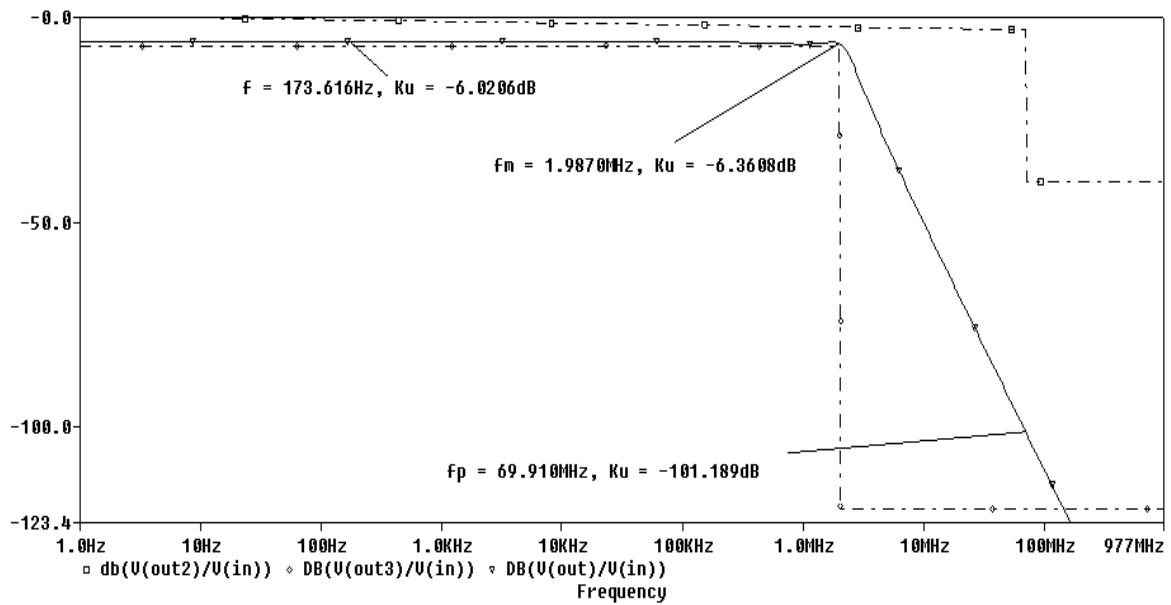
Tab. 5.3 Testované filtr s vázanou strukturou



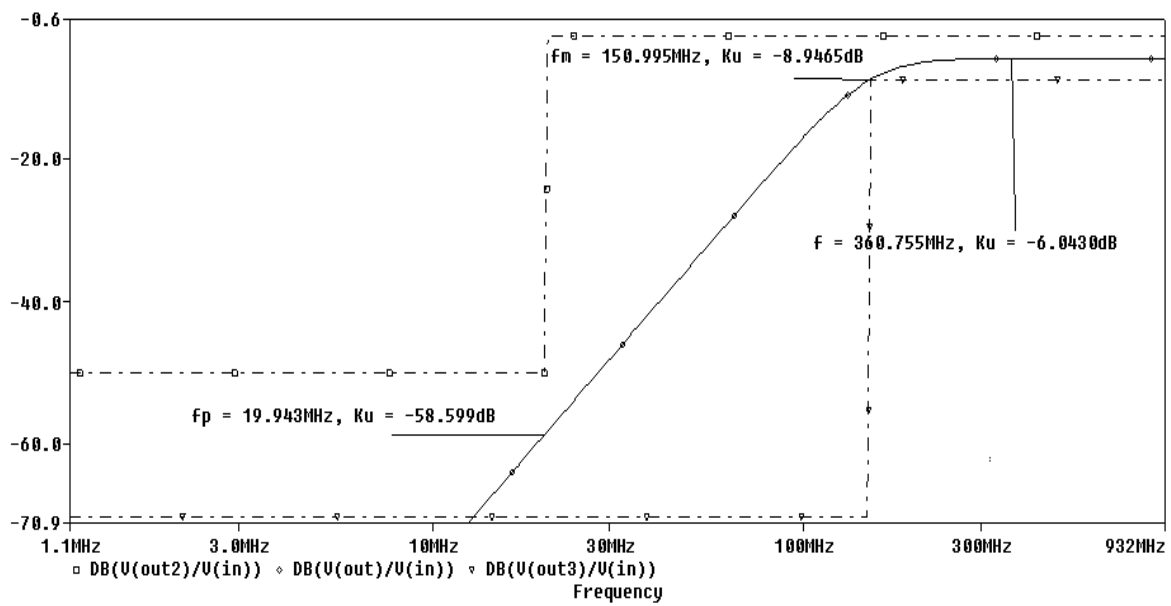
Obr. 5.2 Test č. 1, $f_m = 30 \text{ MHz}$, $f_p = 200 \text{ MHz}$, $A_{\max} = 3 \text{ dB}$, $A_{\min} = 50 \text{ dB}$



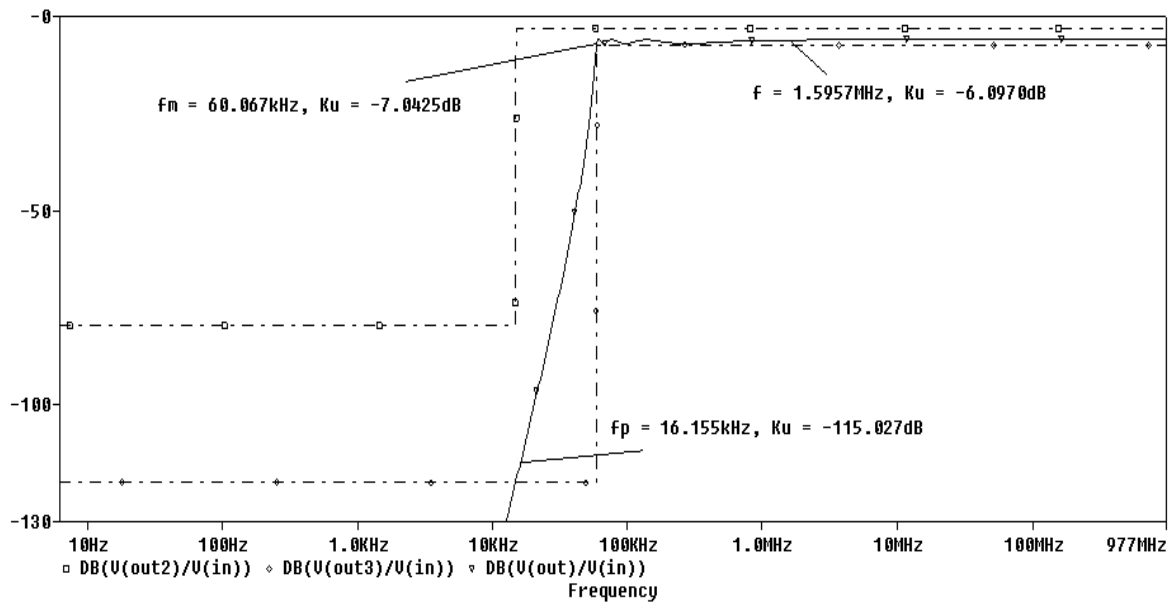
Obr. 5.3 Test č. 2, $f_m = 70 \text{ kHz}$, $f_p = 110 \text{ kHz}$, $A_{\max} = 3 \text{ dB}$, $A_{\min} = 30 \text{ dB}$



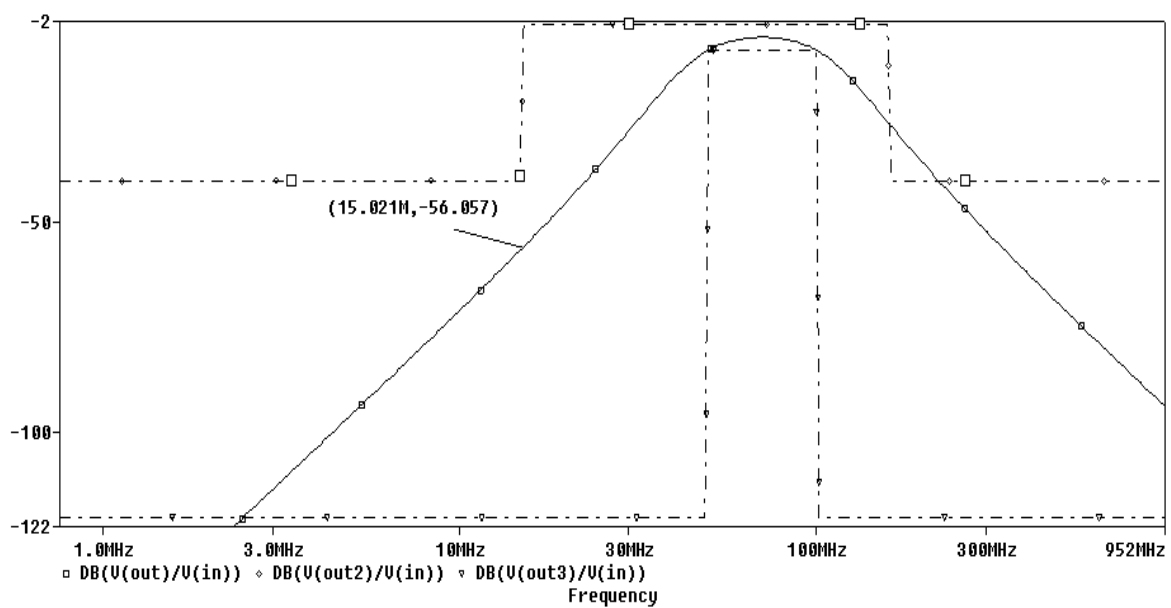
Obr. 5.4 Test č. 3 $f_m = 2\text{ MHz}$, $f_p = 70\text{ MHz}$, $A_{max} = 0,5\text{ dB}$, $A_{min} = 40\text{ dB}$



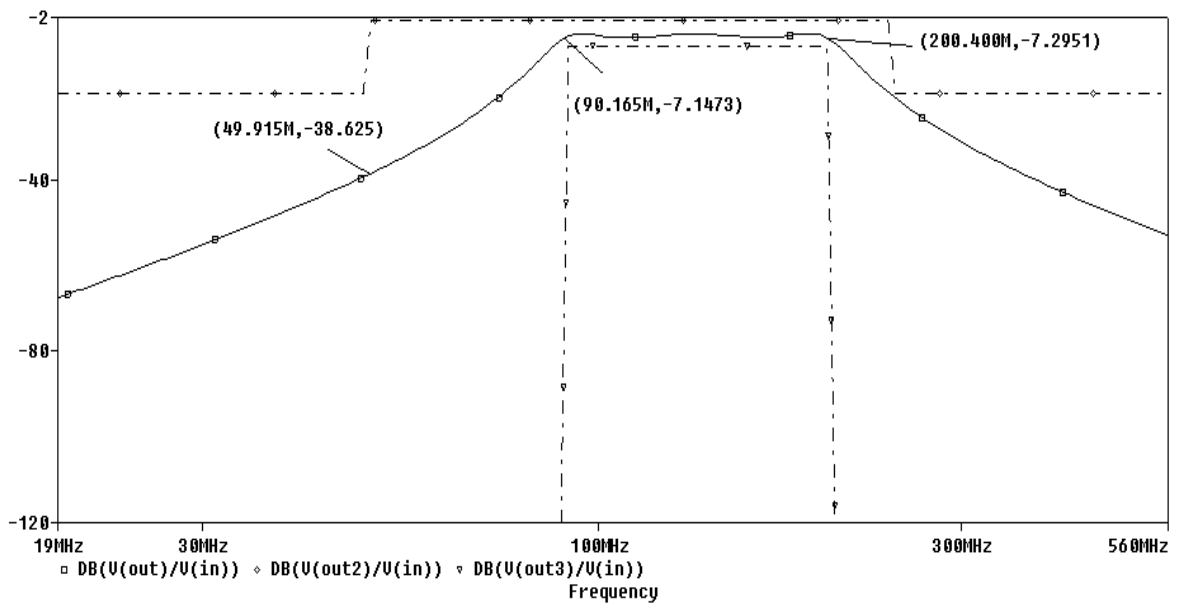
Obr. 5.5 Test č. 4 $f_p = 20\text{ MHz}$, $f_m = 150\text{ MHz}$, $A_{min} = 30\text{ dB}$, $A_{max} = 50\text{ dB}$



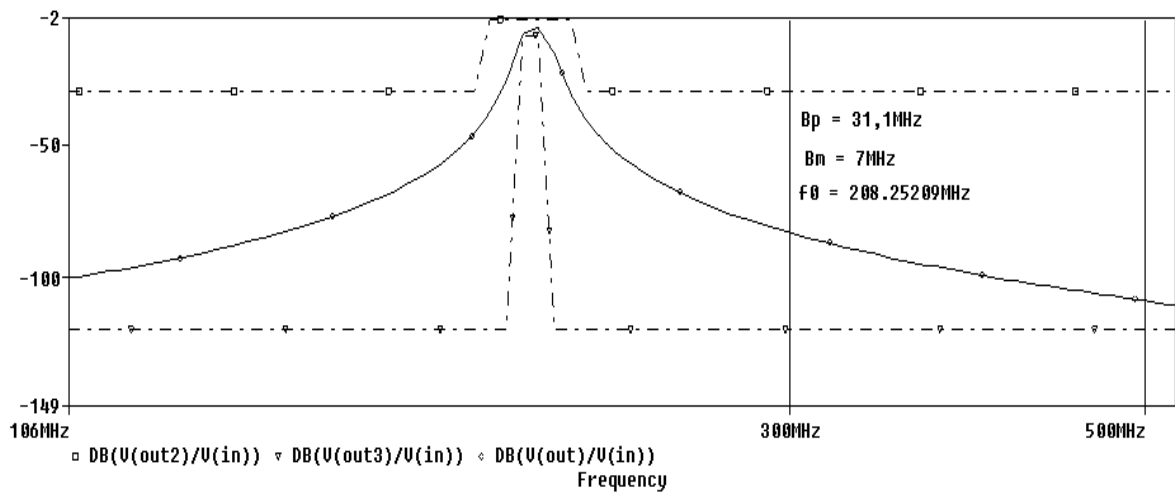
Obr. 5.6 Test č. 5 $f_p = 20\text{ kHz}$, $f_m = 60\text{ kHz}$, $A_{\min} = 1\text{ dB}$, $A_{\max} = 50\text{ dB}$



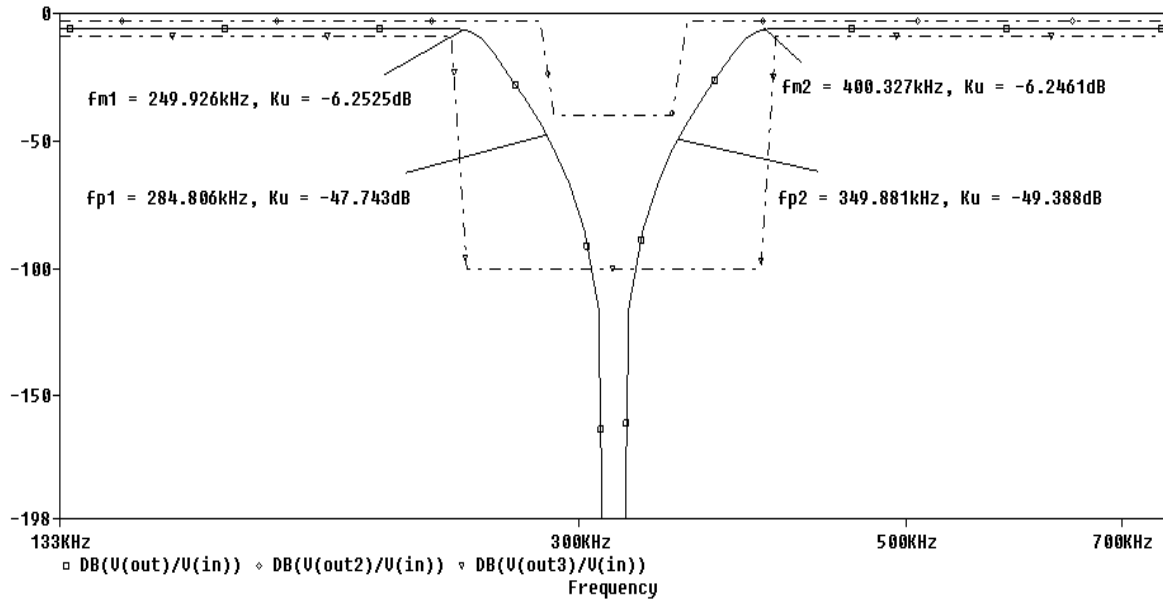
Obr. 5.7 Test č. 6 $f_{m1} = 50\text{ MHz}$, $f_{m2} = 100\text{ MHz}$, $f_{p1} = 15\text{ MHz}$, $A_{\max} = 2\text{ dB}$, $A_{\min} = 40\text{ dB}$



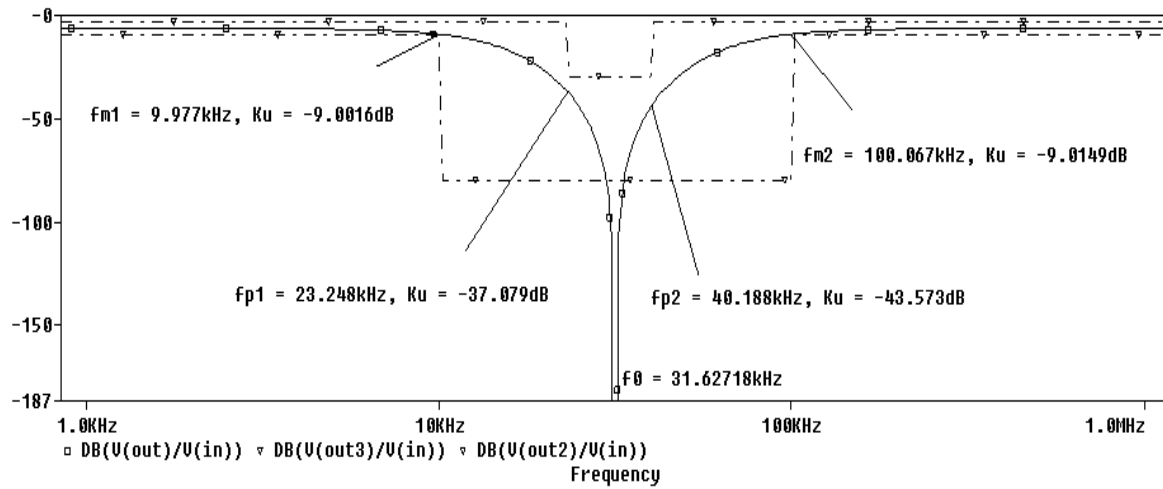
Obr. 5.8 Test č. 7 $f_{m1} = 90 \text{ MHz}$, $f_{m2} = 200 \text{ MHz}$, $f_{p1} = 50 \text{ MHz}$, $A_{\max} = 1 \text{ dB}$, $A_{\min} = 20 \text{ dB}$



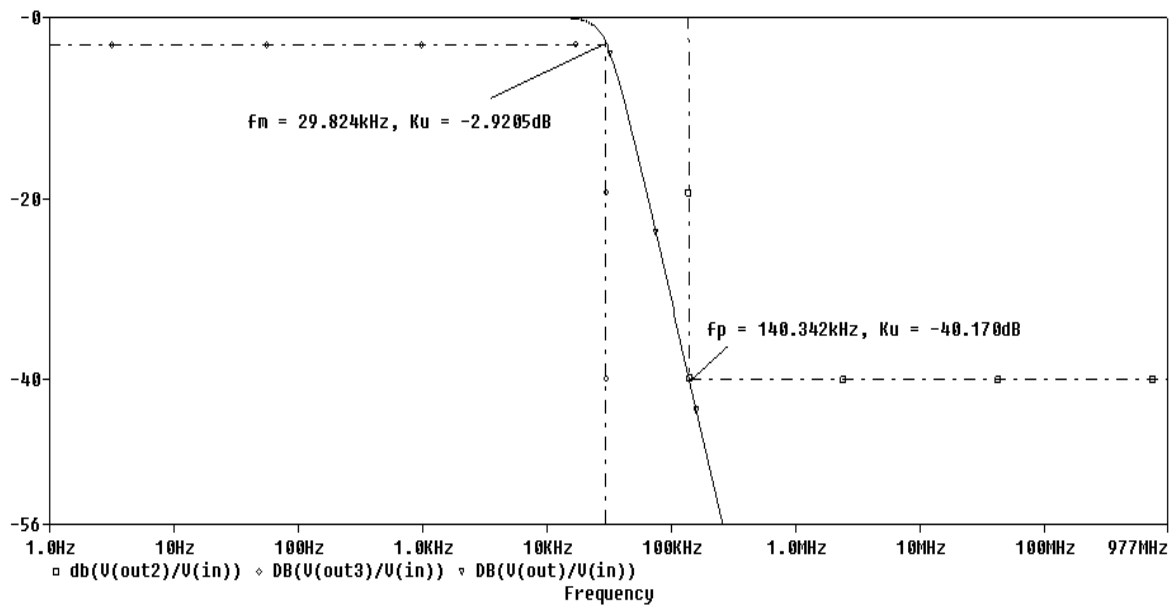
Obr. 5.9 Test č. 8 $B_m = 8 \text{ MHz}$, $B_p = 30 \text{ MHz}$, $f_0 = 208 \text{ MHz}$, $A_{\max} = 3 \text{ dB}$, $A_{\min} = 30 \text{ dB}$



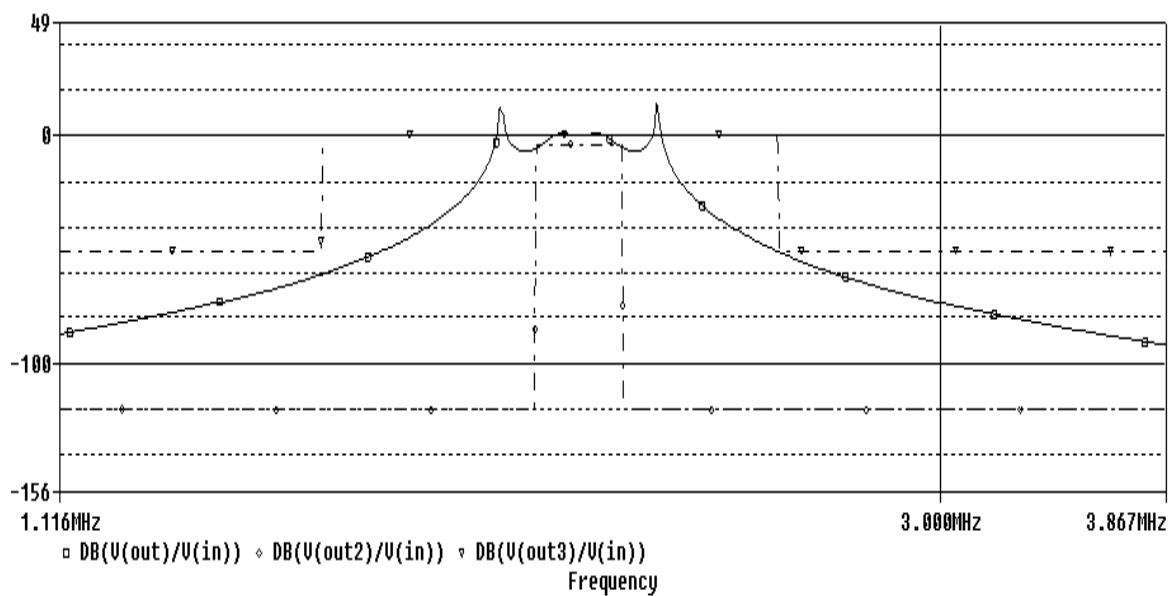
Obr. 5.10 Test č. 9 $f_{m1} = 250$ kHz, $f_{m2} = 400$ kHz, $f_{p1} = 285$ kHz, $A_{max} = 1$ dB, $A_{min} = 20$ dB



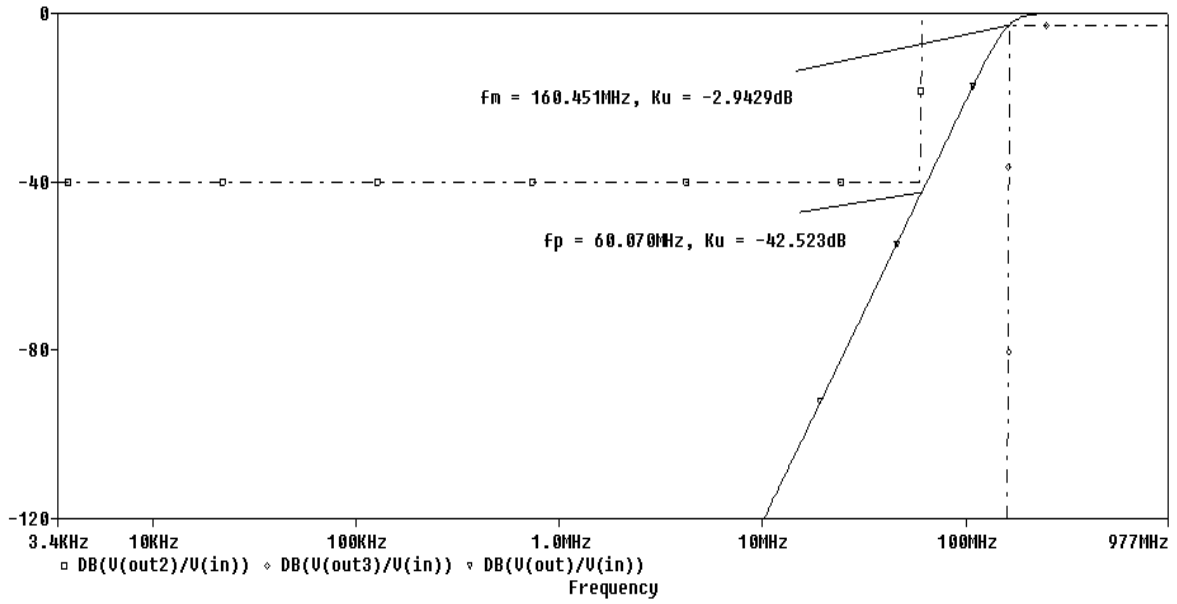
Obr. 5.11 Test č. 10 $f_{m1} = 10$ kHz, $f_{m2} = 100$ kHz, $f_{p1} = 40$ kHz, $A_{max} = 1,5$ dB, $A_{min} = 30$ dB



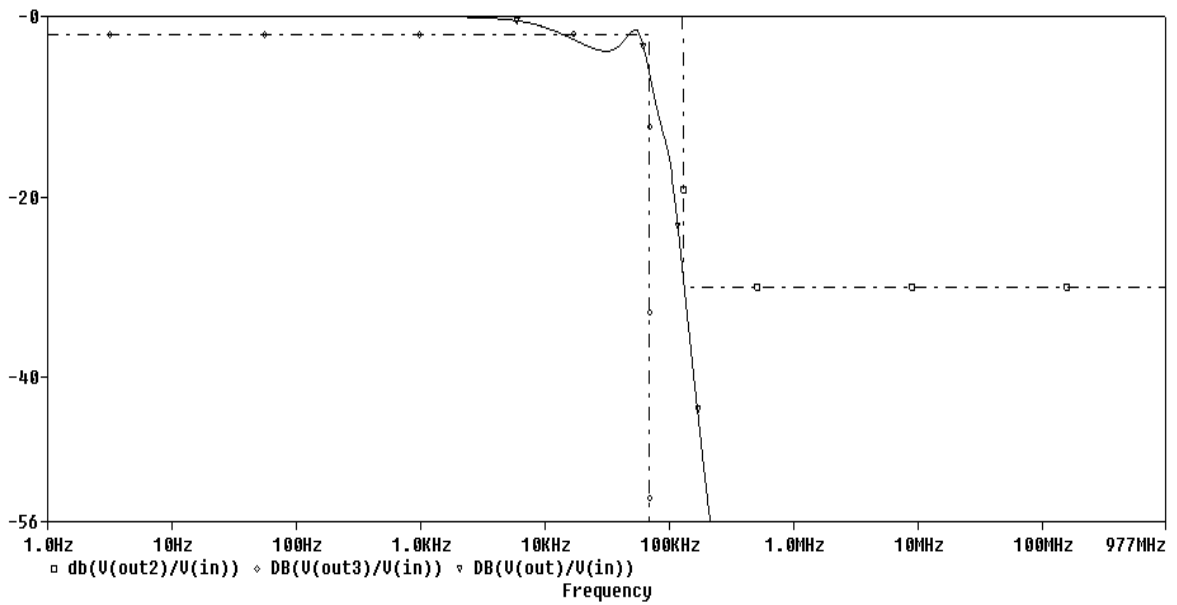
Obr. 5.12 Test č. 11 $f_m = 30\text{ kHz}$, $f_p = 140\text{ MHz}$, $A_{\max} = 3\text{ dB}$, $A_{\min} = 30\text{ dB}$



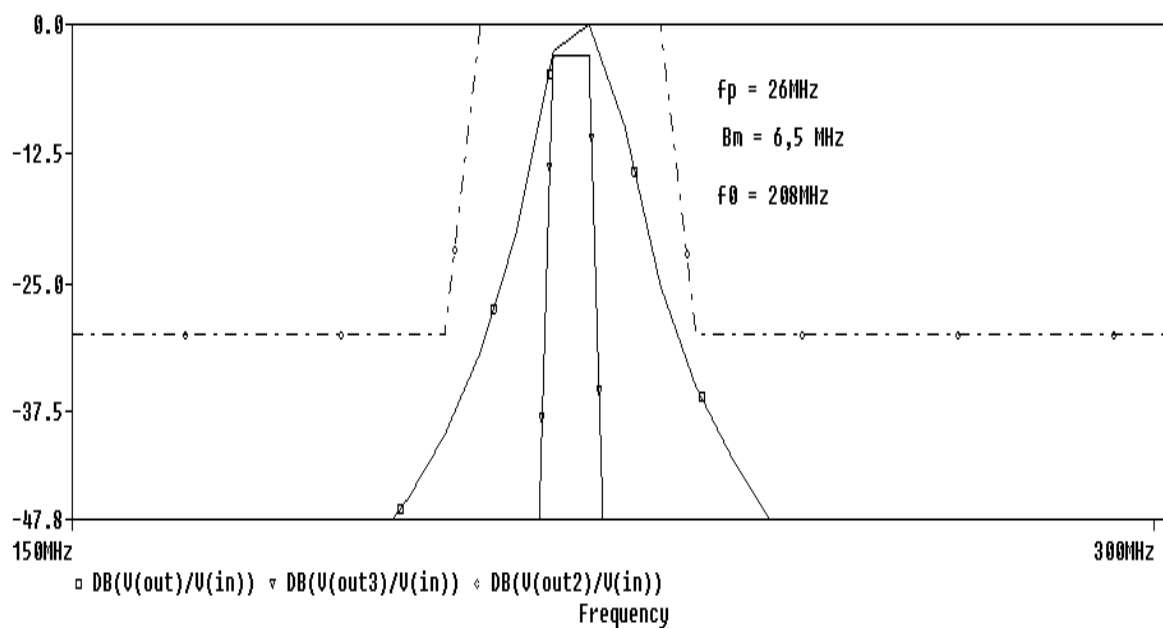
Obr. 5.13 Test č. 12 $B_m = 200\text{kHz}$, $B_p = 1\text{ MHz}$, $f_0 = 2\text{MHz}$, $A_{\max} = 3\text{ dB}$, $A_{\min} = 50\text{ dB}$



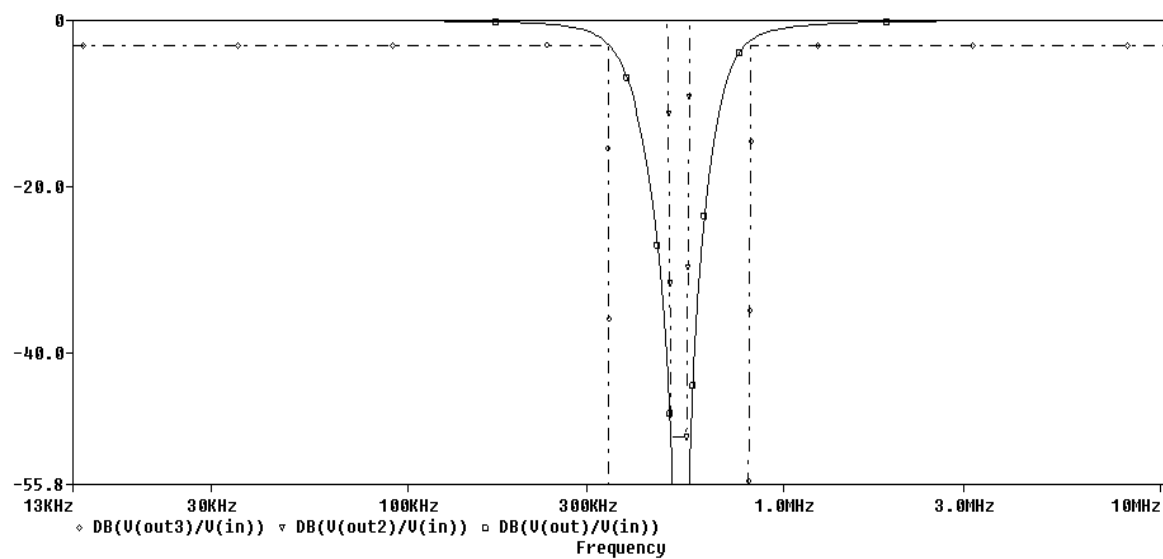
Obr. 5.14 Test č. 13 $f_p = 60\text{ MHz}$, $f_m = 160\text{ MHz}$, $A_{\max} = 3\text{ dB}$, $A_{\min} = 40\text{ dB}$



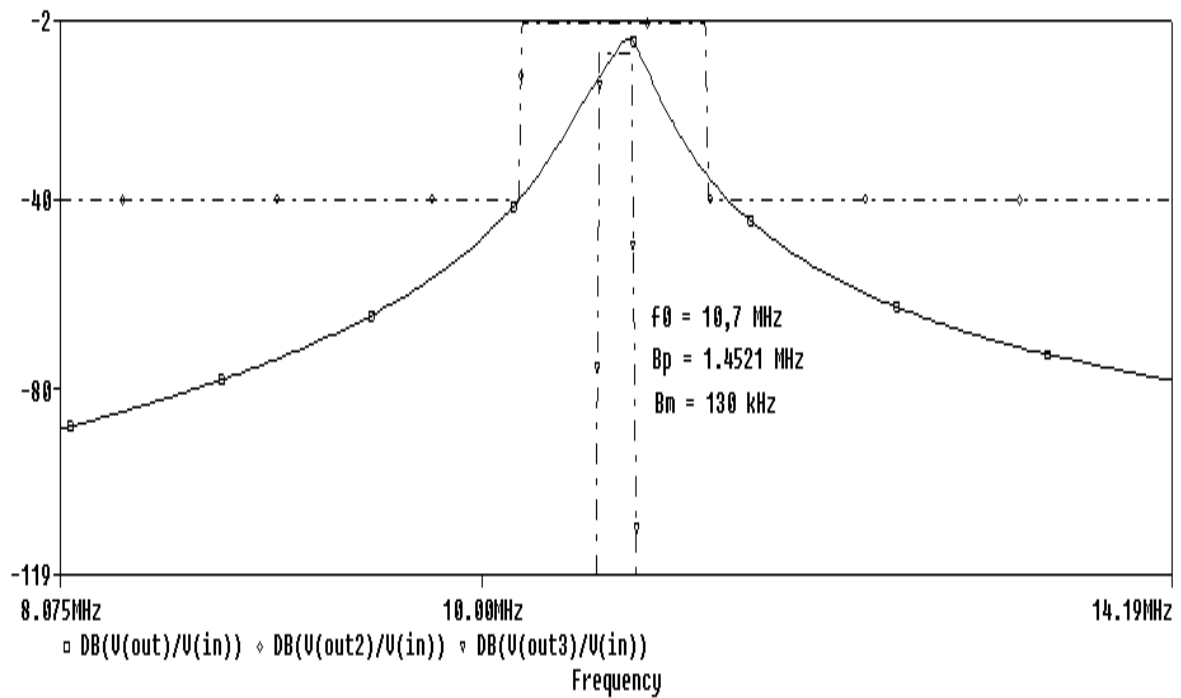
Obr. 5.15 Test č. 14 $f_m = 70\text{ kHz}$, $f_p = 130\text{ kHz}$, $A_{\max} = 2\text{ dB}$, $A_{\min} = 30\text{ dB}$



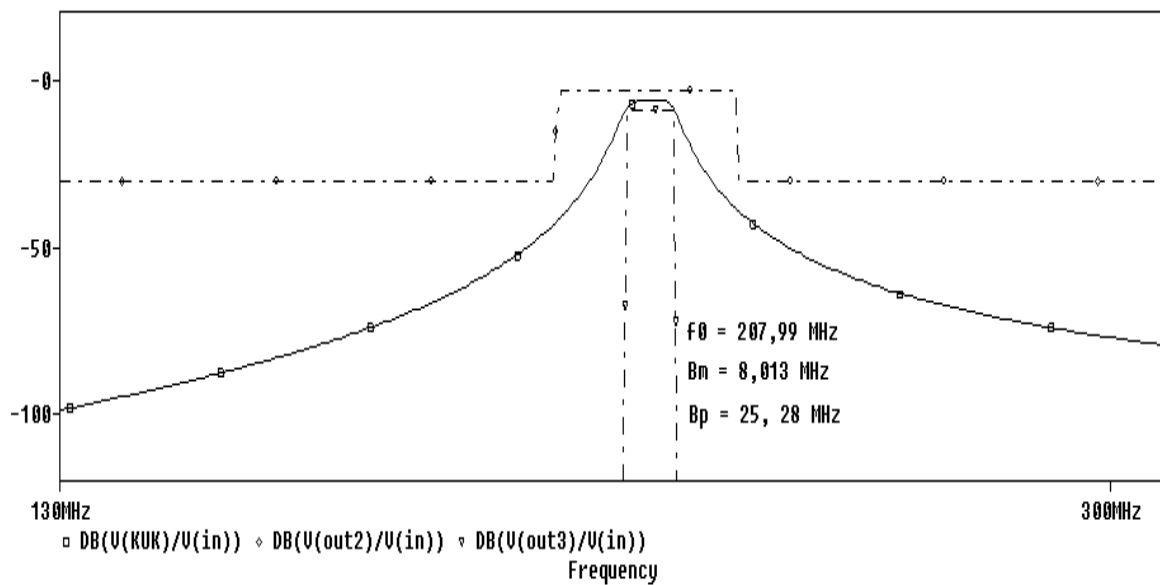
Obr. 5.16 Test č. 15 $B_m = 8 \text{ MHz}$, $B_p = 30 \text{ MHz}$, $f_0 = 208 \text{ MHz}$, $A_{\max} = 3 \text{ dB}$, $A_{\min} = 30 \text{ dB}$



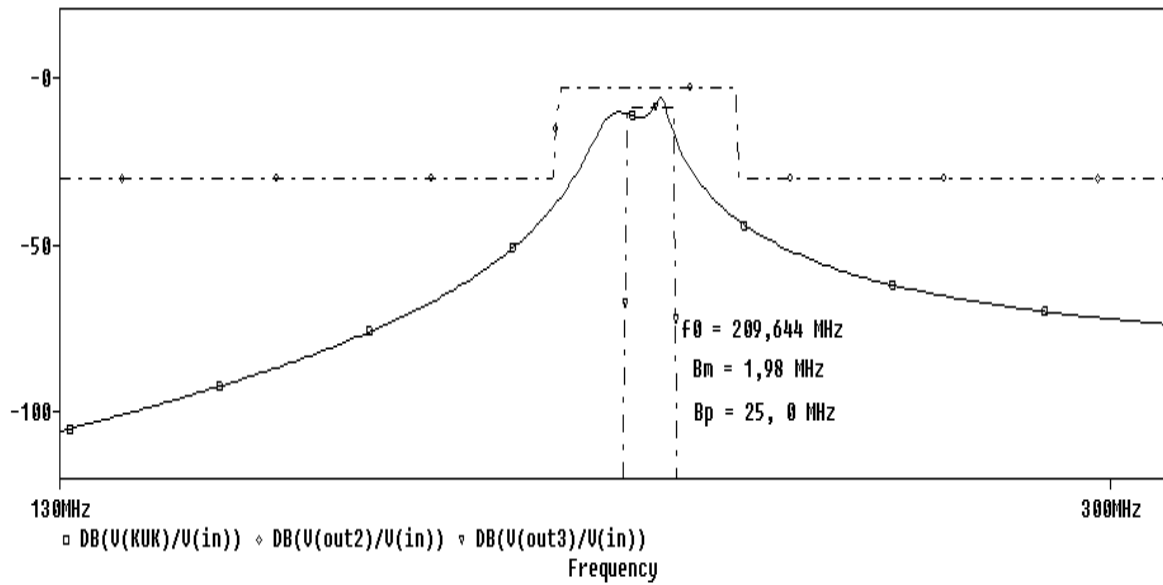
Obr. 5.17 Test č. 16 $f_{m1} = 340 \text{ kHz}$, $f_{m2} = 800 \text{ kHz}$, $f_{p1} = 480 \text{ kHz}$, $A_{\min} = 3 \text{ dB}$, $A_{\max} = 50 \text{ dB}$



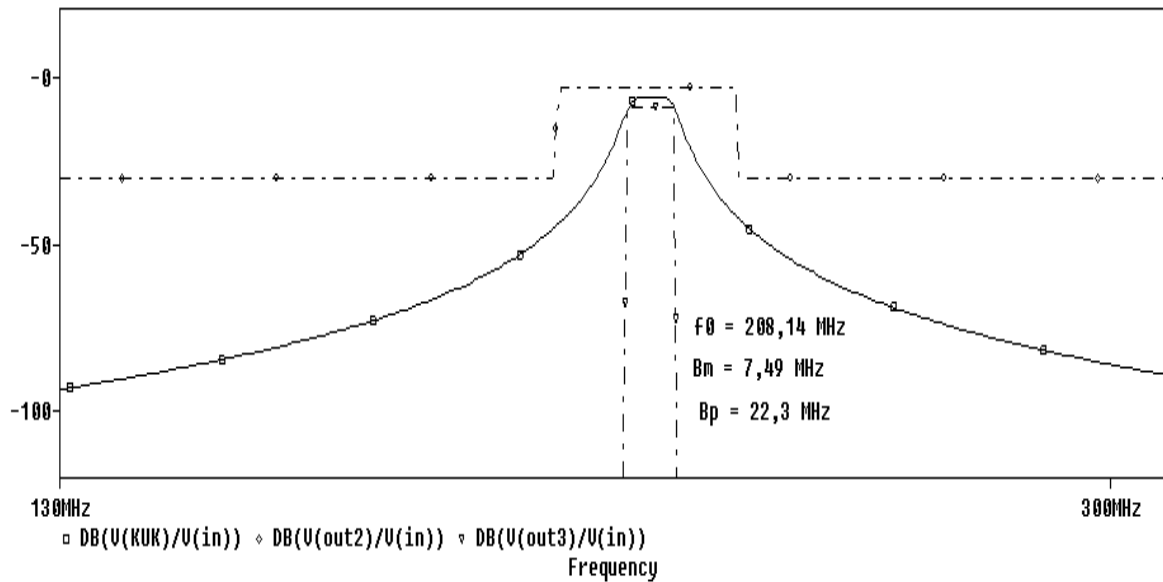
Obr. 5.18 Test č. 17 $B_m = 1 \text{ MHz}$, $B_p = 200 \text{ kHz}$, $f_0 = 10,7 \text{ MHz}$, $A_{\max} = 3 \text{ dB}$, $A_{\min} = 40 \text{ dB}$



Obr. 5.19 Test č. 18 $B_m = 8 \text{ MHz}$, $B_p = 30 \text{ MHz}$, $f_0 = 208 \text{ MHz}$, $A_{\max} = 3 \text{ dB}$, $A_{\min} = 30 \text{ dB}$



Obr. 5.20 Test č. 19 $B_m = 8 \text{ MHz}$, $B_p = 30 \text{ MHz}$, $f_0 = 208 \text{ MHz}$, $A_{\max} = 3 \text{ dB}$, $A_{\min} = 30 \text{ dB}$



Obr. 5.21 Test č. 20 $B_m = 8 \text{ MHz}$, $B_p = 30 \text{ MHz}$, $f_0 = 208 \text{ MHz}$, $A_{\max} = 3 \text{ dB}$, $A_{\min} = 30 \text{ dB}$

Je samozřejmé, že nebylo možné otestovat a celé spektrum struktur, které lze programem navrhnout. Tedy otestovat všechny typy filtrů na různých kmitočtech, s využitím všech aproximací, použitím vždy obou typů článku T a Π a otestováním vždy všech typů impedančního zakončení. Při testování vázaných struktur byl zvolen testován stále shodný požadovaný filtr, ale bylo použito různých impedančních transformací (přizpůsobení). Rozsah testování byl do určité míry omezen také rozsahem této práce. I z omezeného počtu testů je však patrné, že program funguje správně a jen v ojedinělých případech navržené filtr nesplňuje požadavky. Ale jedná se o relativně malé odchylky, které lze ve většině aplikací filtrů zanedbat a jeho využití v praxi je možné.

6. Závěr

Cílem bakalářské práce Inovace programu pro návrh analogových kmitočtových filtrů bylo vytvořit aplikaci, která vypočítá hodnoty prvků filtru pro zadanou obvodovou strukturu a vstupní parametry kladené na výsledný filtr a její otestování na vybraných filtrech prostřednictvím obvodového simulátoru Pspice.

Na začátku práce před samotnou tvorbou aplikace bylo potřeba nejprve nastudovat teorii kmitočtových filtru a možnosti jejich návrhu. Po nastudování informací jsem se rozhodl pro využití návrhu pomocí přičkových struktur (T a Π články), ke kterému byl později přidán i návrh pomocí struktury vázaných filtrů. Návrh obou struktur je založen na převodu požadovaného filtru na normovanou dolní propust, výpočtu jejich koeficientů a jejich následné odnormování. K tvorbě programu byl použit jazyk C++ a vývojové prostředí Builder C++. Během práci na programu jsem použil volně šiřitelné programy SNAP, Filter Sollution, demo verzi programu NAF a pro testování studentskou verzi programu Pspice.

Dalším krokem bylo vytvoření uživatelsky příjemného a snadno ovladatelného GUI (uživatelské prostředí), které je velmi důležité, protože prvoplánový uživatel se často nerozhoduje podle funkcí, jenž mu program nabízí, ale podle toho jak pěkně se na program kouká. K vytvoření prostředí jsem použil komponentu, jenž umožňuje „listování“ návrhem krok po kroku, aby aplikace uživatele celým návrhem provedla a on se nemohl někde zamotat. Samotný průběh filtru je pomocí záložek členěn na logické kroky odpovídající metodě návrhu. Pro ulehčení práce s programem slouží také systém plovoucích nápověd. Příjemným zpestřením může pro uživatele být možnost změny barevného ladění aplikace a anglicky mluvící uživatel ocení anglickou verzi aplikace, která však není zcela dokončena. Vizually vypadají velmi dobře také zobrazovaná schémata, která jsou vytvořena ve speciálním editoru schémat. Podrobný popis uživatelského prostředí obsahuje kapitola 3.

Po vybrání použitých metod návrhu a vytvoření vzhledu aplikace přišla na řadu tvorba obslužného programu. Zdrojový kód je členěn do několika samostatných částí a díky tomu byla udržena přehlednost kódu. V programu jsou pomocí funkcí ošetřeny nepřijatelné zásahy uživatele (viz kapitola 4.3). Kód je doplněn komentáři a to i proto, aby mohl být v budoucnu doplněn. Tvorba programu a použité postupy jsou dostatečně popsány v kapitole 4.

A co tedy program uživateli nabízí. Aplikace splňuje bezzbytku zadání bakalářské práce. Což znamená, že program na základě uživatelem zadaných vlastností filtru (mezních kmitočtů, požadovaného maximálního zvlnění v prostném pásmu a minimálního útlumu v nepropustném pásmu) navrhne obvodovou strukturu včetně hodnot stavebních prvků (součástky R, L, a C). Hlavní účel program plní a urychlí uživateli návrh požadovaného filtru, přičemž ho ušetří numerických výpočtů.

Program umožňuje návrh čtyř základních typů filtru (dolní propust, horní propust, pásmová propust, pásmová zádrž) a uživatel si může zvolit jednu ze tří aproximací (Butterworthova, Čebiševova a Besselova). V případě návrhu pásmových filtrů má uživatel možnost volby mezi použitím struktury vázaných filtrů a přičkovou strukturou. V případě ostatních typů je možný pouze návrh přičkové struktury, je zde ale možnost výběru mezi realizací článkem T nebo Π . Aplikace také poskytuje možnost výběru různého zakončení filtru a to

klasického oboustranně shodného ($R1 = R2$), dále zakončení nakrátko ($R1 = 0$) a naprázdno ($R2 = 0$). Volba zakončení je však možné pouze pro Butterworthovu aproximaci. Podrobnější popis funkcí programu zajímavých pro uživatele obsahuje kapitola 3.

Po dokončení samotného návrhu má uživatel několik možností jak pokračovat a jak vypočítané hodnoty využít. První z možností je vytisknutí protokolu o návrhu, který obsahuje všechny podstatné informace o navrženém filtru, tedy jeho obvodovou strukturu, hodnoty stavebních prvků a také všechny hodnoty zadané v průběhu návrhu uživatelem. Uživatel si také může hodnoty stavebních prvků uložit do tabulkového editoru. Další funkcí aplikace je vykreslení kmitočtových charakteristik filtrů, které je také možné vytisknout. Zobrazení těchto grafů umožňuje uživateli, kontrolu splnění jeho požadavků navrženým filtrem. V případě že je uživatel nespokojen má možnost, změnit vypočítané hodnoty stavebních prvků (přímo změnou hodnot zobrazených v tabulce) a tak filtr modifikovat. Součástí aplikace je také jednoduchá toleranční analýza, pomocí které si může uživatel otestovat, jak se změní přenosová kmitočtová charakteristika filtru při jím zadané procentuální změně součástek.

Součástí bakalářské práce bylo také otestování správné činnosti programu využitím obvodového simulátoru Pspice. Provedl jsem test zhruba dvaceti filtrů různých typů, aproximací, struktur a impedančních zakončení. Výsledné grafy, ve kterých je zachyceno i toleranční pole definované požadavky uživatele, jsou zobrazeny v kapitole 5 a dokumentují, že programem navržené filtry splňují mnohdy s rezervou požadavky. V určitých případech výrazné překročení minimálního útlumu v nepropustním pásmu je způsobeno u Čebyševovy aproximace, návrhem filtrů pouze lichého řádu.

Možností dalšího vylepšení aplikace se nabízejí. Jedna z cest k rozšíření funkcí programu vede směrem k přidávání dalších aproximací. Na toto rozšíření je zdrojový kód uzpůsoben a implementování dalších aproximací je možné. Pro Caurovu aproximaci už program počítá řád filtru, ale další kroky nejsou prováděny. Dalším významným vylepšením by bylo přidání možností obecných různých hodnot zakončovacích rezistorů. K tomuto cíli povede využití impedančních přizpůsobení například pomocí vazebních odboček, které jsou již součástí návrhu vázaných struktur, takže i na toto vylepšení je program připraven. Určité nedostatky také skrývá vykreslování grafů. Z uživatelského hlediska by bylo možné aplikaci vylepšit použitím řadových přípon při zobrazení hodnot stavebních prvků.

7. Literatura

- [1] HÁJEK, Karel; SEDLÁČEK, Jiří. Kmitočtové filtry. 1. vyd.v BEN - technická literatura, Praha 2002.535 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [2] DOSTÁL, Tomáš; AXMAN, Vladimír. Elektrické filtry [online]. Učební elektronické texty FEKT VUT, Brno.
- [3] DAVÍDEK V., LAIPERT M., VLČEK M.: Analogové a číslicové filtry, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004.
- [4] DOSTÁL, Tomáš. Teorie elektronických obvodů [online]. Učební elektronické texty FEKT VUT, Brno.
- [5] KADLEC, Václav. Učíme se programovat v Borland C++ a jatyce C++. 2. vyd.v Computer Press, Brno 2004.385 s. ISBN 80-7226-550-4.

Seznam obrázků

- Obr. 2.1 Diagram možného postupu při návrhu kmitočtových filtrů.
Obr. 2.2 Modulová charakteristika Besselovi aproximace (využívaná pro určení řádu filtru).
Obr. 2.3 Filtr s vázanými rezonančními obvody s kapacitní vazbou (5. řád).
Obr. 2.4 PP s vázanými obvody impedanční přizpůsobení kapacitní odbočkou.
Obr. 2.5 PP s vázanými obvody impedanční přizpůsobení vazebním kapacitorem.
Obr. 2.6 PP s vázanými obvody impedanční přizpůsobení vazebním induktorem.
Obr. 3.1 Úvodní obrazovka programu.
Obr. 3.10 Záložka toleranční analýza.
Obr. 3.2 Záložka volby typu filtru a jeho aproximace.
Obr. 3.3 Záložka Vlastnosti filtru.
Obr. 3.4 Obrazovka koeficientů DP_n při příčkové struktuře,
Obr. 3.5 Obrazovka koeficientů DP_n při struktuře vázaných obvodů
Obr. 3.6 Volba zakončovacích rezistorů.
Obr. 3.7 Výsledný filtr příčkové struktury (obrázek odpovídá PP 3. řádu, Butterworthově aproximaci a volbě PI článku).
Obr. 3.8 Výsledný filtr struktury vázaných filtrů (obrázek odpovídá PP 3. řádu, Butterworthově aproximaci a je bez přizpůsobení)
Obr. 3.9 Vzhled záložky grafy.
Obr. 4.1 Vývojový diagram funkce Postfix.
Obr. 5.1 Zapojení obvodu v simulační prostředí Pspice (obvod PP, Butterworthova aproximace, řád 3, $R_1 = R_2$).
Obr. 5.2 Test č. 1, $f_m = 30$ MHz, $f_p = 200$ MHz, $A_{max} = 3$ dB, $A_{min} = 50$ dB-
Obr. 5.3 Test č. 2, $f_m = 70$ kHz, $f_p = 110$ kHz, $A_{max} = 3$ dB, $A_{min} = 30$ dB.
Obr. 5.4 Test č. 3 $f_m = 2$ MHz, $f_p = 70$ MHz, $A_{max} = 0,5$ dB, $A_{min} = 40$ dB.
Obr. 5.5 Test č. 4 $f_p = 20$ MHz, $f_m = 150$ MHz, $A_{min} = 30$ dB, $A_{max} = 50$ dB.
Obr. 5.6 Test č. 5 $f_p = 20$ kHz, $f_m = 60$ kHz, $A_{min} = 1$ dB, $A_{max} = 50$ dB. viz
Obr. 5.7 Test č. 6 $f_{m1} = 50$ MHz, $f_{m2} = 100$ MHz, $f_{p1} = 15$ MHz, $A_{max} = 2$ dB, $A_{min} = 40$ dB.
Obr. 5.8 Test č. 7 $f_{m1} = 90$ MHz, $f_{m2} = 200$ MHz, $f_{p1} = 50$ MHz, $A_{max} = 1$ dB, $A_{min} = 20$ dB.
Obr. 5.9 Test č. 8 $B_m = 8$ MHz, $B_p = 30$ MHz, $f_0 = 208$ MHz, $A_{max} = 3$ dB, $A_{min} = 30$ dB, 48
Obr. 5.10 Test č. 9 $f_{m1} = 250$ kHz, $f_{m2} = 400$ kHz, $f_{p1} = 285$ kHz, $A_{max} = 1$ dB, $A_{min} = 20$ dB
Obr. 5.11 Test č. 10 $f_{m1} = 10$ kHz, $f_{m2} = 100$ kHz, $f_{p1} = 40$ kHz, $A_{max} = 1,5$ dB, $A_{min} = 30$ dB.
Obr. 5.12 Test č. 11 $f_m = 30$ kHz, $f_p = 140$ MHz, $A_{max} = 3$ dB, $A_{min} = 30$ dB-
Obr. 5.13 Test č. 12 $B_m = 200$ kHz, $B_p = 1$ MHz, $f_0 = 2$ MHz, $A_{max} = 3$ dB, $A_{min} = 50$ dB.
Obr. 5.14 Test č. 13 $f_p = 60$ MHz, $f_m = 160$ MHz, $A_{max} = 3$ dB, $A_{min} = 40$ dB.
Obr. 5.15 Test č. 14 $f_m = 70$ kHz, $f_p = 130$ kHz, $A_{max} = 2$ dB, $A_{min} = 30$ dB.
Obr. 5.16 Test č. 15 $B_m = 8$ MHz, $B_p = 30$ MHz, $f_0 = 208$ MHz, $A_{max} = 3$ dB, $A_{min} = 30$ dB
Obr. 5.17 Test č. 16 $f_{m1} = 340$ kHz, $f_{m2} = 800$ kHz, $f_{p1} = 480$ kHz, $A_{min} = 3$ dB, $A_{max} = 50$ dB.
Obr. 5.18 Test č. 17 $B_m = 1$ MHz, $B_p = 200$ kHz, $f_0 = 10,7$ MHz, $A_{max} = 3$ dB, $A_{min} = 40$ dB.
Obr. 5.19 Test č. 18 $B_m = 8$ MHz, $B_p = 30$ MHz, $f_0 = 208$ MHz, $A_{max} = 3$ dB, $A_{min} = 30$ dB.
Obr. 5.20 Test č. 19 $B_m = 8$ MHz, $B_p = 30$ MHz, $f_0 = 208$ MHz, $A_{max} = 3$ dB, $A_{min} = 30$ dB.
Obr. 5.21 Test č. 20 $B_m = 8$ MHz, $B_p = 30$ MHz, $f_0 = 208$ MHz, $A_{max} = 3$ dB, $A_{min} = 30$ dB.