

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV TEORETICKÉ A EXPERIMENTÁLNÍ
ELEKTROTECHNIKY**

Ing. Zdeněk Zapletal

**MODERNÍ METODY OPTIMALIZACE RLC
PROTOTYPŮ KMITOČTOVÝCH FILTRŮ**

**MODERN METHODS OF THE OPTIMIZATION OF
FREQUENCY RLC FILTER PROTOTYPES**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Teoretická elektrotechnika
Školitel: Doc. Ing. Jiří Sedláček, CSc.
Oponenti: Prof. Ing. Tomáš Dostál, CSc.
Prof. Ing. Čestmír Vlček, CSc.
Datum obhajoby: 10.12.2004

Klíčová slova

Optimalizace, filtr, syntéza, přenos, aproximace, citlivost, tolerance, RLC prototyp, ARC filtr, variační metoda syntézy, cíleně řízená syntéza ztrátové struktury.

Keywords

Optimization, filter, synthesis, transfer, approximation, sensitivity, tolerance, RLC prototype, ARC filter, multiple filter solution method, goal – directed lossy synthesis.

Práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Údolní 53, Brno, 602 00

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY.....	5
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	9
4 OPTIMALIZACE V ETAPĚ APROXIMACE.....	9
4.1 Tranzitivní aproximace	10
4.1.1 Nová tranzitivní aproximace TICGA	10
4.1.2 Nestandardní TICGA aproximace	10
4.2 Syntéza vázaných pásmových propustí s nulami přenosu	11
4.3 Ucelený systém standardních aproximací.....	12
4.4 Dílčí závěr.....	13
5 OPTIMALIZACE V PROCESU SYNTÉZY PŘÍČKOVÝCH FILTRŮ RLC	14
5.1 Variační metoda v klasickém procesu syntézy	14
5.2 Numerická modifikační metoda syntézy.....	14
5.2.1 Numerická modifikační metoda syntézy dolních propustí.....	14
5.2.2 Numerická modifikační metoda syntézy pásmových propustí.....	15
5.3 Dílčí závěr.....	16
6 SYNTÉZA ZTRÁTOVÝCH STRUKTUR RLC PROTOTYPŮ	16
6.1 Princip a možnosti využití syntézy ztrátových struktur	17
6.2 Metoda syntézy cíleně ztrátových příčkových struktur	17
6.3 Programy pro syntézu cíleně ztrátových příčkových struktur	17
6.4 Optimalizace RLC prototypů pomocí cíleně ztrátových příčkových struktur	18
6.4.1 Kompenzace ztrát reálných prvků.....	18
6.4.2 Minimalizace rozsahu hodnot parametrů prvků a citlivostí	19
6.5 Cíleně ztrátové prototypy při optimalizaci ARC filtrů	21
7 ZÁVĚR.....	21
8 LITERATURA	23
9 CURRICULUM VITAE	25
10 ABSTRAKT	26

1 ÚVOD

Elektrické frekvenční (kmitočtové) filtry jsou důležitou součástí mnoha zařízení elektrotechniky. Rozumíme jimi obvykle obvody, které umožňují oddělení jednotlivých přenášených frekvenčních pásem. Protože se nároky, kladené na filtry neustále zvyšují, vyvíjejí se stále nové postupy pro jejich syntézu.

Metody syntézy elektrických frekvenčních filtrů můžeme podle jejich principů rozdělit celkem do pěti skupin: elementární, empirické, exaktní, využití tabulek a iterační. Elementární a empirické metody syntézy jsou většinou silně jednoúčelové a nelze je užít k vytváření obecnějších postupů. Naproti tomu exaktní metody mají obecnější teoretický základ a iterační postupy jsou již takřka zcela obecné a lze jimi řešit mnoho značně rozdílných případů.

Iterativní metody v zásadě představují takový přístup k řešení problematice, který se plně opírá o využití výpočetní techniky. Ostatní metody syntézy ovšem neztrácejí svůj význam a využívají se především pro rychlé a orientační řešení, které lze poté iterativními metodami zpřesňovat. Exaktní metody syntézy také dávají nutný teoretický základ pro budování iterativních procesů.

V návrhu (syntéze) kmitočtových filtrů uvažujeme dvě základní úlohy. Je to návrh přenosové funkce (aproximální úloha) a realizace přenosové funkce (realizační úloha). V realizační úloze se optimalizační postupy a kritéria uplatňují poměrně jednoduše. V aproximační úloze je uplatnění optimalizace obtížnější, neboť při specifikaci požadavků a při řešení úlohy je nutno brát v úvahu různá důležitá hlediska.

Úloha optimální syntézy elektrických obvodů představuje velmi náročný problém, je i značně časově náročná a dosud ani pomocí velkých výkonných počítačů nebyla plně zvládnuta. V běžné praxi je proto dosud velmi málo využívána. Při optimalizaci návrhu filtru se proto jeví výhodné nastavit úlohu optimalizace obecně, ale rozdělit ji na dílčí kroky, v nichž lze snáze najít optimální řešení. Jako velmi efektivní při komplexní optimalizaci filtru se jeví možnost vstupu uživatele do průběhu procesu návrhu. Ten může na základě dílčích výsledků návrhu případně upřesňovat a doplňovat optimalizační kritéria a určovat efektivní směr další optimalizace s aktivním využitím výpočetní techniky a moderních numerických metod.

2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

Z hlediska postupu návrhu filtru, lze celý proces rozdělit na etapu návrhu a optimalizace:

- aproximační úlohy,
- procesu syntézy prototypu RLC,
- realizace prototypu RLC,
- realizace aktivního (ARC,ASC) filtru.

Složitost celého procesu návrhu filtru a jeho optimalizace spočívá v komplexní provázanosti všech jeho jednotlivých etap [1], [7]. První krok návrhu již předurčuje i základní vlastnosti a možnosti optimalizace posledních etap a mnohdy je třeba pro úspěšné zvládnutí celého procesu opakovat návrat k předcházejícím etapám. V průběhu celého procesu optimalizace se ukazuje jako nezbytné efektivní využití výpočetní techniky, která může přispět výrazně ke komplexnímu vyřešení optimalizace obvodu na základě uživatelsky zadávaných a v procesu návrhu případně modifikovaných optimalizačních kritérií.

Vzhledem k zaměření tématu doktorské disertační práce bude věnována pozornost hlavně prvním dvěma etapám návrhu a optimalizace filtrů, které se bezprostředně vztahují k optimalizaci zvolených příčkových struktur RLC prototypů. Dílčím způsobem se dotkne i možností a výsledků optimalizace aktivních filtrů (ARC,ASC), jejichž realizace budou přímo vycházet z těchto prototypů RLC filtrů a jejichž parametry budou vlastnostmi výchozích RLC prototypů přímo určeny.

a) Optimalizace v etapě aproximace

Optimalizace aproximační úlohy se řeší nejčastěji vhodným výběrem některého ze standardních typů aproximací. Optimalizačními kritérii jsou obvykle požadavky minimalizace počtu prvků (řádu) filtru a požadovaný průběh přenosových charakteristik v kmitočtové a časové oblasti [1]. V případě využití návrhových katalogů je optimalizace aproximační úlohy značně omezena zejména: malým rozsahem uvedených typů aproximací, malým rozsahem uváděných parametrů (potlačení a zvlnění), malým rozsahem typů struktur (u jednostranně zakončených filtrů sudých řádů s nulami přenosu jsou uváděny pouze transformované struktury, často nejsou sudé řády těchto typů uváděny vůbec), malým rozsahem možných zakončovacích rezistorů (zpravidla pouze jednotkové, jen někdy mezní hodnoty 0, ∞), malým rozsahem uváděných řádů filtrů (u filtrů s nulami přenosu často jen liché řády), a malým rozsahem uváděných typů charakteristik (chybí časové odezvy, citlivosti).

Optimalizace aproximační úlohy vyžaduje navíc časté opakování návrhu filtru s následnou analýzou, což je časově značně náročné. Z těchto důvodů je pro řešení úlohy optimální využití PC techniky s vhodným softwarovým vybavením. V současné době je možné využít řadu univerzálních běžně dostupných programů pro analýzu (MATLAB, MC 7), které mají zabudované možnosti návrhu aproximačních funkcí. Šíře nabídky aproximačních funkcí je však velmi malá a pro řešení problémů optimalizace nedostačuje. Ani poměrně málo dostupné komerční programy pro návrh filtrů však často nemají potřebný rozsah aproximačních funkcí pro úspěšné vyřešení optimalizace aproximační úlohy. Nejširší nabídku aproximačních funkcí z dostupných návrhových programů poskytuje ještě i dnes již poněkud zastaralý (pracuje pod DOSem) program NAFID [12]. Optimální výběr aproximační funkce je, vzhledem k velkému množství typů a variant aproximací a

mnohdy protichůdných požadavků a různé váhy kritérií pro porovnání, poměrně složitý úkol. Z hlediska úspěšné optimalizace v etapě aproximace je proto výhodné provést předběžný výběr aproximační funkce pomocí uceleného systému standardních aproximačních funkcí, který byl vytvořen na základě zkušeností a komplexního porovnání vlastností jednotlivých aproximačních funkcí [2],[22]. Navržený ucelený systém obsahuje pět nejobvyklejších a standardně používaných aproximací (Besselovy, Butterworthovy, Čebyševovy, inverzní Čebyševovy a Caurovy aproximace), využívá také méně známou Feistelovu – Unbehauenovu aproximaci s nulami a je doplněn o dvě přechodné (tranzitivní) aproximace (Besselovu – Butterworthovu [3] a novou TICFU [4] aproximaci).

Ucelený systém aproximačních funkcí umožňuje snadnou orientaci při řešení první etapy návrhu a optimalizace kmitočtových filtrů pro většinu obvykle zadávaných požadavků. Zkušenosti z praxe však ukázaly, že při návrhu a optimalizaci filtrů impulsních systémů, které vyžadují přechodnou odezvu bez jakýchkoliv překmitů, je nutno mnohdy pro splnění požadovaných parametrů (i při vhodně zvolených typech aproximací jako jsou Besselova, Feistelova-Unbehauenova a TICFU aproximace) dodatečně modifikovat zvolené aproximační funkce [2]. Z tohoto hlediska se tedy ukazuje potřeba navrženou řadu aproximačních funkcí uvedeného systému vylepšit, případně ji doplnit dalšími typy aproximačních funkcí, které by snadněji (bez nutnosti dodatečné modifikace) splnily specifické požadavky návrhu těchto filtrů, neboť pro méně zkušeného konstruktéra dodatečná modifikace vybrané aproximační funkce může představovat značnou časovou ztrátu.

Při návrhu a optimalizaci pásmových propustí s malou šířkou pásma dochází u příčkových článků k neúnosnému zvětšení rozsahu hodnot parametrů prvků. Proto se v tomto případě optimalizují filtry pomocí obvodů vázaných pásmových propustí, které jsou však omezeny pouze na aproximační funkce s monotónní charakteristikou útlumu v nepropustném pásmu [7] [22]. V literatuře [19] se objevil náznak možnosti optimalizace těchto obvodů (zlepšení strmosti přenosové funkce nebo zvětšení útlumu v určitém pásmu kmitočtů mimo propustné pásmo) dodatečnou modifikací, která realizuje nulový bod přenosu, mění však původní přenosovou funkci v závislosti na poloze vloženého nulového bodu funkce. Z tohoto důvodu je uvedená modifikace velmi obtížně realizovatelná, návrh a optimalizace je náročným iteračním procesem. Pro její širší praktické využití by bylo potřeba vypracovat metodu syntézy, která by umožňovala efektivněji realizovat požadovanou modifikaci obvodů v závislosti na všech ostatních požadovaných parametrech.

Pro praktické využití optimalizačních postupů využívajících nové aproximační funkce a modifikace obvodů by bylo též zapotřebí zpracovat algoritmus matematických postupů pro výpočet těchto aproximačních funkcí a modifikací do podoby programových procedur, které by bylo možné využít také pro rozšíření možností stávajícího programu NAFID.

b) Optimalizace v procesu syntézy příčkových filtrů RLC

V procesu syntézy prototypu RLC příčkového filtru jde o návrh struktury a výpočet hodnot parametrů jednotlivých prvků filtru. Syntéza vychází ze zadaných vstupních požadavků a zvoleného typu aproximační funkce. V případě návrhu na základě katalogových hodnot normovaných dolních propustí je možnost optimalizace procesu syntézy velmi omezena, neboť tabulky jsou sestaveny pouze pro jeden druh struktury příčkového článku a uživatel může volit obvykle pouze mezi typem struktury tvaru T nebo π článku.

Počítačové metody návrhu umožňují oproti tomu širší výběr variant zapojení obvodové struktury filtru, kterou realizují v procesu syntézy změnou algoritmu výpočtu. Během vlastního procesu syntézy může být při nich využita variační metoda syntézy prototypu [21], [10]. Pomocí rozkladu charakteristické funkce a využitím permutační metody variace nulových bodů získáme tak touto metodou značný počet rozdílných sad filtrů shodných přenosových vlastností, ale s různými hodnotami parametrů prvků, z nichž může být automaticky vybrána optimální varianta filtru podle požadovaného optimalizačního kritéria zadaného na počátku procesu syntézy uživatelem.

Pro širší uživatelské využití by však bylo třeba praktické využití výše uvedených principů u některých druhů aproximací matematicky dořešit a řízení celého optimalizačního procesu zejména z uživatelského hlediska propracovat a tím i lépe zpřístupnit využití těchto možností při optimalizaci.

V posledních letech byla v literatuře publikován princip nové numerické variační metody syntézy obvodů [9] umožňující získat další nové sady řešení RLC prototypů příčkových článků dolních propustí, slibujících další rozšíření možností optimalizace těchto obvodů (minimalizace poměru součástí, minimalizace citlivostí, vlivu tolerancí) a syntézy optimální požadované varianty obvodu výchozí struktury v procesu syntézy. Pro ověření nových možností optimalizace obvodů pomocí numerické variační metody a její praktické využití je však nutné navrhnout, vypracovat a ověřit vhodné matematické postupy k jejímu řešení. Při využití numerických iteračních metod bude potřeba také ověřit a odladit ve vhodném programovém prostředí všechny navržené algoritmy, které by umožnily efektivní využití nového principu metody syntézy, neboť detailní postupy řešení syntézy pomocí naznačeného principu dosud publikovány v žádné literatuře nebyly. Výsledky získané novou numerickou variační metodou bude třeba zhodnotit a přínos propracované metody srovnat s dosud (poměrně málo) používanou variační metodou v klasickém procesu syntézy filtrů.

V návaznosti na výsledky řešení některých problémů z oblasti optimalizace aproximačních funkcí (jak bylo stručně naznačeno v předchozím odstavci) by bylo zapotřebí vyřešit řadu problémů z oblasti procesu syntézy příčkových struktur realizujících uvedené aproximační funkce.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Z uvedeného stručného přehledu stavu problematiky syntézy a optimalizace RLC prototypů kmitočtových filtrů a jejího vývoje vyplynuly hlavní cíle disertační práce:

- V oblasti optimalizace procesu aproximace - zlepšit stávající ucelený systém aproximačních funkcí,
- v oblasti optimalizace RLC prototypu v procesu syntézy – propracovat širší možnosti využití variačních metod syntézy a optimalizace.

Předpokladem splnění hlavního cíle práce je vyřešení řady dílčích úkolů, zejména:

- Vypracování metody syntézy nového typu tranzitivní aproximace doplňující stávající ucelený systém aproximačních funkcí,
- návrh a zpracování metody syntézy pásmových propustí s nulovými body přenosu,
- vypracování a ověření nové numerické variační metody syntézy, zhodnocení jejich přínosů k optimalizačnímu procesu, srovnání dosažených výsledků s dosavadní variační metodou,
- návrh a vypracování metody syntézy RLC prototypů standardních aproximačních funkcí s ohledem na ztráty reálných prvků,
- zpracování algoritmu matematických postupů pro výpočet těchto aproximačních funkcí, modifikací a metod syntézy do podoby algoritmů programových procedur, které by bylo možné využít také pro rozšíření možností stávajícího programového vybavení pro návrh a optimalizaci kmitočtových filtrů.

4 OPTIMALIZACE V ETAPĚ APROXIMACE

Optimální volba aproximační funkce není jednoduchý úkol a mnohdy řešení optimalizační úlohy není ani zcela jednoznačné. Vzhledem k velkému množství typů a variant aproximačních funkcí a mnohdy protichůdných požadavků a různým váhám kritérií pro porovnání je řešení poměrně obtížné. Optimalizaci návrhu však komplikuje také to, že stanovená optimalizační kritéria jsou obvykle navzájem protichůdná. Z těchto důvodů se v procesu optimalizace aproximační úlohy jeví využití PC techniky s vhodným softwarovým vybavením jako nezbytné. Umožňuje nabídnout široký výběr aproximačních funkcí s okamžitou následnou analýzou a zobrazením a možností porovnání jednotlivých typů odezev a umožňuje i využití

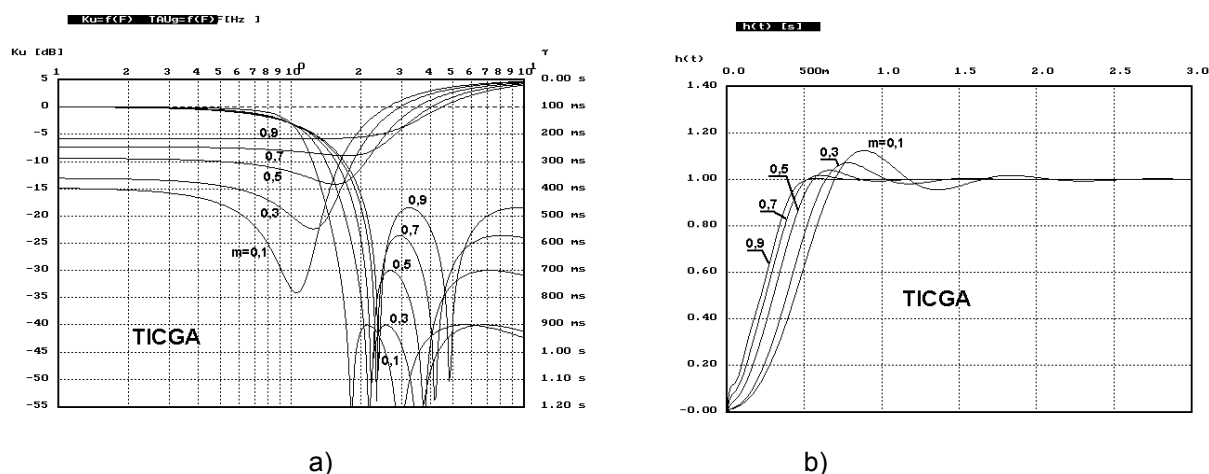
tranzitivních typů filtrů, jejichž použití představuje velmi často vhodný kompromis při optimalizaci aproximační úlohy[1], [5].

4.1 TRANZITIVNÍ APROXIMACE

4.1.1 Nová tranzitivní aproximace TICGA

Po řadě předběžných experimentů s modifikací uvedených aproximací byla na základě zkušeností s tranzitivní aproximací TICFU navržena nová tranzitivní aproximace nazvaná TICGA (Tranzitivní - Inverzní Čebyšev – Gauss) [28]. Ta využívá výborných vlastností Gaussovy aproximace v časové oblasti, ale umožňuje (pomocí volby koeficientu transformace m) zvolit vhodné odezvy filtru v celé šíři mezi typy aproximací Gauss s nulami přenosu, která má lepší odezvu v kmitočtové oblasti než samotná Gaussova aproximace při zachovaných výborných vlastnostech odezvy v časové oblasti a aproximací typu inverzní Čebyšev, která má dobré vlastnosti v oblasti kmitočtové. Syntéza tranzitivní aproximace TICGA vychází z přenosových funkcí obou využitých aproximačních typů.

Pro návrh filtru byly ověřeny metody výpočtu, navržen algoritmus výpočtu a odladěn jako programová procedura v programovém prostředí Borland Pascal v experimentální verzi programu NAFID.



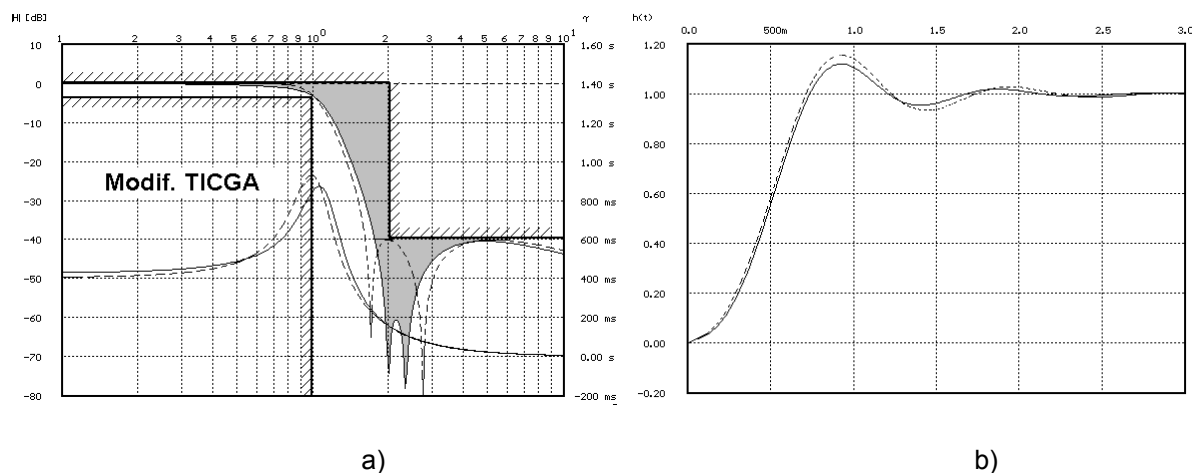
Obr.4.1 Příklady rozsahu charakteristik TICGA aproximace ($n=5$):
a) v kmitočtové oblasti. b) v časové oblasti

Příklady rozsahu odezev TICGA filtru v kmitočtové a časové oblasti (řád filtru $n=5$) pro různé transformační koeficienty m jsou zachyceny pro představu na obr.4.1 a,b.

4.1.2 Nestandardní TICGA aproximace

Při optimalizaci aproximační funkce filtrů speciálních požadavků se mohou uplatnit nestandardní typy aproximací. Ty mohou být získány modifikací jednotlivých parametrů filtrů navržených pomocí základní standardní modifikace. V

případě speciálních požadavků na tranzitivní aproximaci s nulovými body může být využito také modifikace tranzitivní aproximace TICGA.

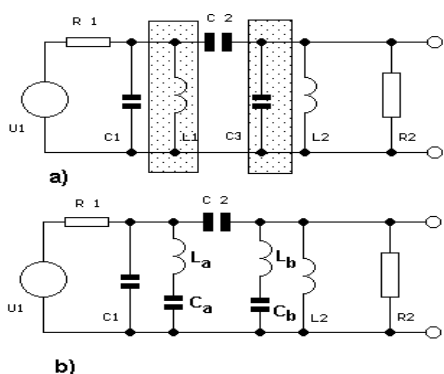


Obr.4.2 Optimalizace aproximace pomocí nestandardní tranzitivní TICGA aproximace
a) modulová přenosová charakteristika, b) přechodná charakteristika

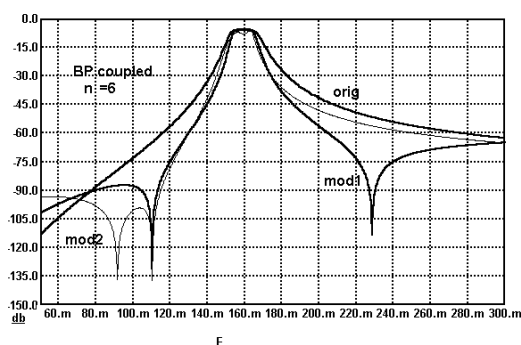
Příklad využití této aproximační funkce, která má široké možnosti využití díky možnosti volby transformačního koeficientu m , je pro filtr dolní propusti pátého řádu zachycen na obr.4.2a,b.

4.2 SYNTÉZA VÁZANÝCH PÁSMOVÝCH PROPUSTÍ S NULAMI PŘENOSU

Filtry pásmových propustí příčkových struktur navržené klasickou metodou vykazují nepříznivě široký rozptyl hodnot navržených prvků zvláště v případě velmi malých šířek pásma. Proto se v praxi často používá vázaných obvodů s kapacitními nebo induktivními vazbami. Tyto obvody s menšími rozptyly hodnot parametrů jednotlivých prvků jsou vhodné i pro realizaci úzkopásmových propustí



Obr.4.3 Zapojení PP vázaných obvodů:
a) původní b) zapojení s nulami

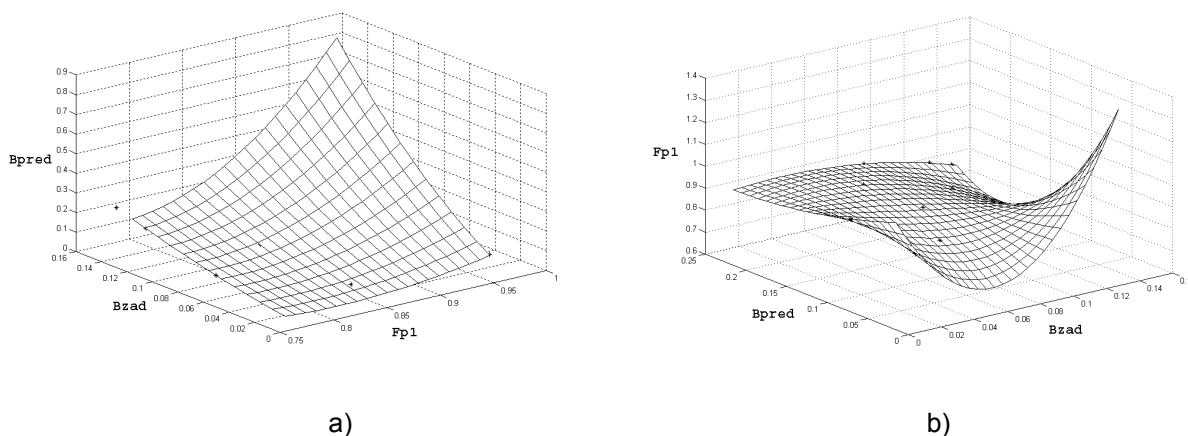


Obr. 4.4 Modulová přenosová charakteristika obvodů PP

konstruovaných pro vysoké kmitočty [7], [22]. Novou možností optimalizace těchto obvodů přináší dodatečné vložení nulových bodů přenosu, které umožňuje zvýšení

strmosti modulové charakteristiky filtru. Svými vlastnostmi se takto optimalizovaný filtr může přiblížit struktuře příčkového článku s nulami přenosu (Cauerova aproximace nebo Inverzní Čebyševova aproximace), ale s výrazně menším a tedy konstrukčně výhodnějším rozptylem parametrů stavebních prvků [27].

Pro návrh a optimalizaci těchto typů obvodů byla proto vyvinuta metoda urychlující potřebné výpočty [27] [29]. V prostředí programu MATLAB byla vypočtena postupně cyklickou záměnou uvedených parametrů (B_{poz} , F_{P1} , K , B_{pred}) sada všech potřebných matic koeficientů c sloužících pro univerzální návrh filtru pásmové propusti s požadovanými parametry. Na obr.4.5 jsou pro ilustraci graficky znázorněny některé ze sad vypočtených parametrů potřebných pro návrh obvodu. Oproti iteračnímu způsobu návrhu je uvedený proces podstatně rychlejší a umožňuje univerzální návrh z různých výchozích požadavků. Umožňuje také snadno a rychle požadavky návrhu modifikovat.



Obr.4.5a,b Grafické znázornění závislostí jednotlivých proměnných při modifikaci vázaných pásmových propustí

4.3 UCELENÝ SYSTÉM STANDARDNÍCH APROXIMACÍ

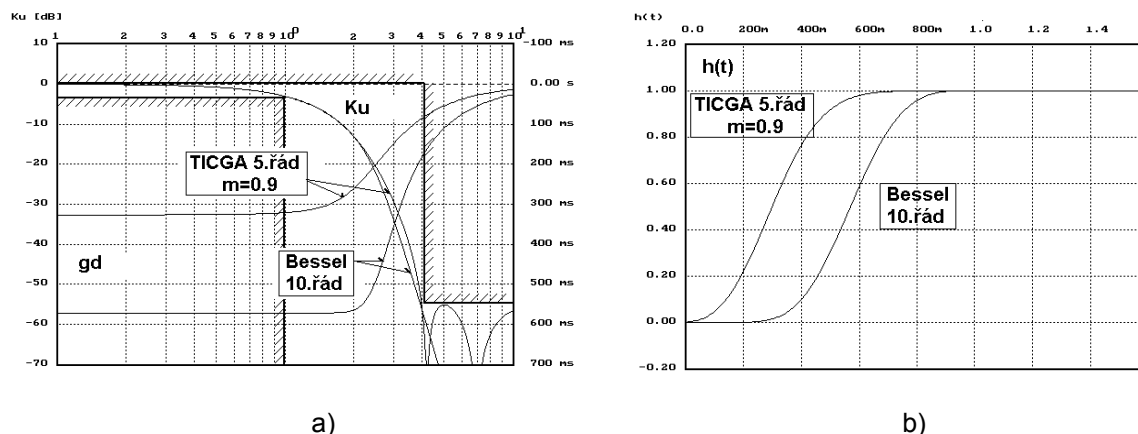
Z hlediska úspěšné optimalizace v etapě aproximace je výhodné provést předběžný výběr aproximační funkce pomocí uceleného systému standardních aproximačních funkcí, který byl vytvořen na základě zkušeností a řady porovnání jednotlivých aproximačních funkcí [2] [22].

Z předchozích rozborů a zkušeností s využitím uceleného systému aproximací v praxi vyplynula potřeba vylepšení uvedeného systému aproximací.

Do stávajícího systému aproximačních funkcí s monotónním poklesem modulové charakteristiky tedy navrhuji použít Gaussovu aproximaci a využít ji jako alternativní k Besselově funkci při optimalizaci nejpřísnějších požadavků impulsních filtrů bez překmitů přechodné charakteristiky (má menší strmost modulové charakteristiky a užší pásmo, ve kterém je charakteristika skupinového zpoždění konstantní).

V řadě stávajících aproximačních funkcí systému navrhuji na základě předchozích rozborů a porovnání vlastností aproximačních funkcí s nulovými přenosovými body

nahradit ze stejného důvodu - možnosti splnění nejnáročnějších požadavků v časové oblasti - stávající tranzitivní funkci TICFU novou tranzitivní aproximací TICGA [28], která má širší možnost změny rozsahu charakteristik a tím umožňuje pokrýt i požadavky velmi náročných filtrů, které se musely dosud řešit například modifikací TICFU aproximace.



Obr. 4.6 Příklad využití TICGA aproximace při optimalizaci aproximace
 a) odezvy v kmitočtové oblasti, b) odezvy v časové oblasti

Pro návrh příčkových struktur úzkopásmových propustí je navržený systém doplněn návrhem pásmových propustí pomocí vázaných obvodů, které vykazují podstatně příznivější rozsah parametrů stavebních prvků. Možnost tohoto řešení je uživateli automaticky nabídnut v procesu návrhu optimalizace aproximační úlohy v případě kritického zmenšení šířky propustného pásma. Při návrhu těchto struktur za pomoci navrženého programového vybavení je možné využít nové rozšíření optimalizačního procesu a navrhnout struktury vázaných pásmových propustí s vloženými nulovými body (viz předchozí kap.4.2).

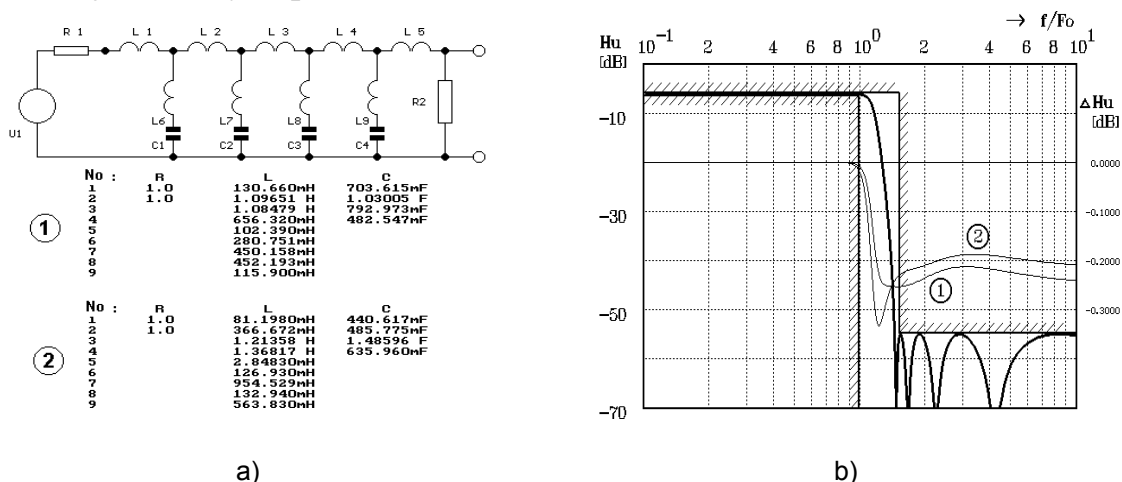
4.4 DÍLČÍ ZÁVĚR

Na základě předchozích rozborů byl stávající ucelený systém standardních aproximací modifikován tak, aby byly rozšířeny možnosti jeho využití. V oblasti aproximací s lineárními fázovou charakteristikou bylo navrženo systém doplnit o Gaussovu aproximaci, která umožňuje lépe splnit požadavky při návrhu filtrů s náročnými požadavky v časové oblasti. Navrhovaný systém používá jako tranzitivní aproximaci s nulovými body přenosu novou tranzitivní aproximaci (TICGA), která má širší možnosti využití než dosud užívaná aproximace TICFU. Pro návrh úzkopásmových propustí s vázanými obvody byla navržena nová metoda syntézy těchto obvodů s vloženými nulovými body přenosu, která umožňuje optimalizaci těchto struktur. Pro nově navržené metody syntézy stejně jako pro obě nově využitě aproximace (Gaussova a TICFU) navrhované v nové modifikaci uceleného systému aproximací byly navrženy algoritmy výpočtů, následně byly realizovány jako procedury podprogramů v prostředí Pascal a ověřeny v experimentální verzi programu NAFID.

5 OPTIMALIZACE V PROCESU SYNTÉZY PŘÍČKOVÝCH FILTRŮ RLC

5.1 VARIČNÍ METODA V KLASICKÉM PROCESU SYNTÉZY

Variační metoda využívá v klasickém procesu syntézy příčkových článků rozklad charakteristické funkce na kořeny a permutaci nulových bodů a tím umožňuje získat velký počet sad filtrů shodných přenosových vlastností, ale různých hodnot parametrů jednotlivých prvků [21].



Obr.5.1 Prototyp inverzního Čebyševa 9.řádu –a) schéma zapojení s parametry optimalizované varianty 1 ($k_L=10,7$) a neoptimalizované varianty 2 ($k_L=480,3$), b) modulová charakteristika a průběh semirelativní citlivosti na tolerance indukčností L_1 až L_5

Výrazný přínos a využití variační metody syntézy v optimalizačním procesu při minimalizaci poměru prvků dokumentuje přesvědčivě příklad syntézy prototypu filtru inverzního Čebyševa 9.řádu, který je zobrazen včetně následné analýzy vlastností na obr.5.1.

5.2 NUMERICKÁ MODIFIKAČNÍ METODA SYNTÉZY

Princip metody vychází ze srovnání požadované (známé) aproximační přenosové funkce určené numerickými hodnotami parametrů polynomu přenosové funkce s přenosovou funkcí filtru určenou obecně obvodyovými prvky. Protože průběh citlivostních funkcí závisí také na nominálních hodnotách jednotlivých stavebních prvků prototypu filtru, mají takto získané modifikace filtrů i poněkud rozdílné citlivosti (a kmitočtové závislosti průběhů citlivostí) přenosových funkcí na změny jednotlivých parametrů filtru.

5.2.1 Numerická modifikační metoda syntézy dolních propustí

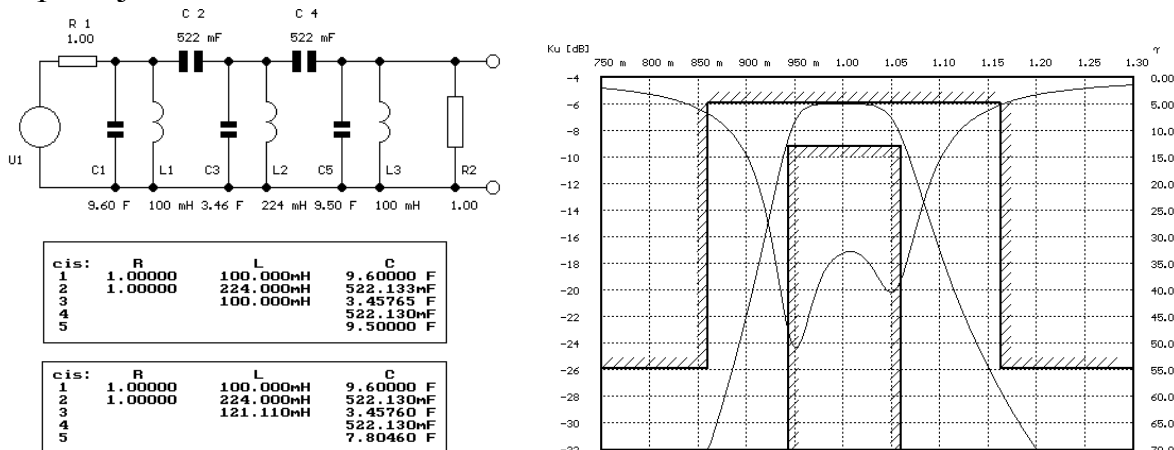
Pro řešení syntézy normovaných dolních propustí požadované aproximační funkce byl navržen a odladěn program [24]. Soustava nelineárních rovnic je řešena pomocí Newtonovy iterační metody, která pro dané typy funkcí dostatečně rychle

konverguje. Rozdílné modifikace filtrů jsou postupně získávány pomocí náhodně generovaného počátečního vektoru koeficientů prvků a ukládány do paměti.

Ukazuje se, že počet reálných řešení (s kladnými parametry) je vždy shodný s počtem řešení klasické variační metody, to znamená $2^{n/2}$ variant řešení pro sudé a $2^{(n-1)/2}$ řešení pro liché řády filtrů bez přenosových nul. U filtrů s přenosovými nulami se počet řešení násobí také zcela ve shodě s klasickou metodou počtem $(n/2)!$ permutací filtrů pro sudé řády a $(n-1)/2!$ permutací pro liché řády. Řešení pomocí klasické variační metody je však nesrovnatelně rychlejší než řešení pomocí numerické variační metody. Její rychlost je podstatně menší jak vzhledem k použitým iteračním numerickým metodám, tak vzhledem k mnohonásobně opakovaným výpočtům, které vedou i s odlišným počátečním vektorem v konečném výsledku ke shodným řešením, které je nutno v konečné fázi eliminovat.

5.2.2 Numerická modifikační metoda syntézy pásmových propustí

Využití variační metody syntézy v tomto směru bylo ověřováno na několika typech pásmových propustí, pro ilustraci uvedeme pro srovnání výsledky optimalizace pásmové propusti struktury vázaných obvodů. Srovnáním zadané přenosové funkce pásmové propusti (Butterworthova aproximace 6.řádu) s obecnou přenosovou funkcí zvolené struktury obvodu byla získána soustava nelineárních rovnic, jejichž řešením byly výsledné numerické hodnoty normovaných parametrů uvedené pásmové propusti. Na základě výše uvedeného principu byl sestaven program pro řešení syntézy normovaných pásmových propustí požadované aproximační funkce. Jedno z použitých řešení získaných uvedeným iteračním postupem je uvedeno na obr.5.2.



Obr.5.2 Pásmová propust struktury vázaných obvodů - schéma zapojení, přenosové vlastnosti, parametry obvodu optimalizované pomocí variační metody

Dosažené výsledky prokazují, že uvedená metoda může být při optimalizaci uvedených struktur použita [25]. Výsledky získané pomocí numerické modifikační metody (oproti řešení získaných pomocí Nortonovy transformace) dále rozšiřují

sady řešení této struktury filtrů o další možnosti. Pro její plné praktické využití však bude zapotřebí ještě vyřešit řadu problémů, které se zde vyskytují. Rychlost konvergence se zatím však jeví nedostatečná pro praktické univerzální použití v proceduře programu pro optimalizaci v reálném čase [25].

5.3 DÍLČÍ ZÁVĚR

Využitím variační metody syntézy (pomocí rozkladu charakteristické funkce a metody variace nulových bodů) lze získat značný počet rozdílných variant RLC prototypů filtrů shodných přenosových vlastností, ale s různými hodnotami parametrů prvků, z nichž může být automaticky vybrána optimální varianta filtru podle požadovaného optimalizačního kritéria zadaného na počátku procesu syntézy uživatelem [2] [21] .

Výsledky rozsáhlých srovnání syntézy RLC prototypů všech typů aproximačních funkcí z navrženého uceleného systému aproximací realizované pro filtry normovaných dolních propustí však jednoznačně ukázaly, že nová numerická modifikační metoda nepřináší očekávané výsledky, neboť neumožňuje získat další nové varianty řešení obvodů. V oblasti syntézy RLC prototypů dolních propustí nová numerická modifikační metoda syntézy tedy neznamená žádný praktický přínos pro další možnost optimalizace RLC prototypů. Variační (klasickou) metodou syntézy pomocí rozkladu charakteristické funkce mohou být shodné výsledky řešení získány snadněji a rychleji, jak bylo prokázáno při srovnávacích výpočtech.

V oblasti syntézy a optimalizace struktur pásmových propustí představuje uvedená metoda určitý přínos. Výsledky získané pomocí numerické modifikační metody (oproti řešení získaných pomocí Nortonovy transformace) rozšiřují sady řešení této struktury filtrů o další možnosti [25].

6 SYNTÉZA ZTRÁTOVÝCH STRUKTUR RLC PROTOTYPŮ

Klasická syntéza příčkových (bezeztrátových) LC filtrů používá nejčastěji oboustranné zakončení filtru se shodnými hodnotami zakončovacích rezistorů, které obvykle představují vnitřní odpor zdroje a vstupní odpor následujícího obvodu. Proces syntézy využívá těchto zakončovacích ztrátových prvků současně jako tlumících prvků, které nastavují potřebné hodnoty pracovních činitelů jakosti Q dílčích (ideálních, tj. bezeztrátových) částí příčkových filtrů, které jsou složeny z bezeztrátových induktorů a kapacitorů.

Jak se však ukazuje, u příčkových struktur filtrů je možné realizovat i jiný systém zatlumování jednotlivých článků struktury, který při vhodném rozprostření ztrátových prvků do celé struktury příčkových článků (cíleně řízená syntéza ztrátové struktury) [20], může přinést v řadě případů nové možnosti v systému syntézy a optimalizace vlastností příčkových RLC prototypů.

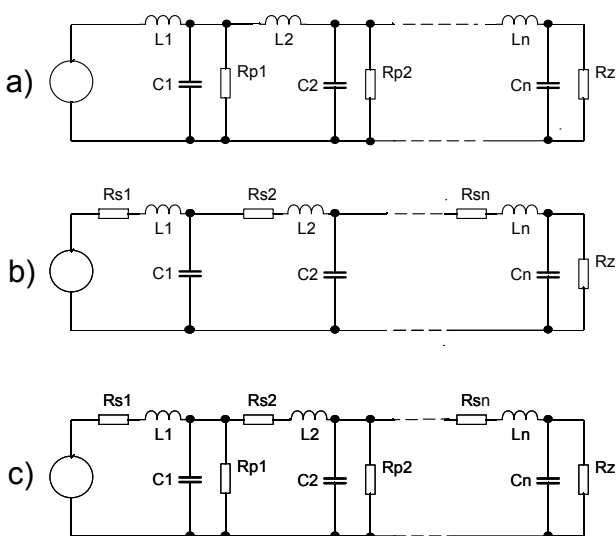
6.1 PRINCIP A MOŽNOSTI VYUŽITÍ SYNTÉZY ZTRÁTOVÝCH STRUKTUR

Při syntéze ztrátových struktur je možné využít příčkových LC filtrů, u kterých jsou ztráty rozprostřeny do celé struktury obvodu, jak je to naznačeno na obr.6.1.

V minulosti byla syntéza ztrátových LC filtrů použita (vzhledem k obtížnosti syntézy pouze ojediněle) zejména k eliminaci nežádoucího vlivu ztrát reálných stavebních prvků pasivních filtrů [13], [16], [17].

Syntéza cíleně ztrátových RLC prototypů příčkových filtrů přináší však v oblasti realizace ARC a SC filtrů významnou možnost optimalizace těchto typů filtrů realizovaných na základě prototypů ztrátových příčkových LC filtrů. Zvláště výhodné je využití cíleně ztrátových struktur při realizacích ARC filtrů s malou hodnotou činitele jakosti Q stavebních bloků.

6.2 METODA SYNTÉZY CÍLENĚ ZTRÁTOVÝCH PŘÍČKOVÝCH STRUKTUR



Obr.6.1 Cíleně ztrátové příčkové struktury s rozloženými ztrátami

Při volbě a optimalizaci cíleně ztrátových příčkových struktur je důležité vycházet z vhodných typů zapojení ARC a ASC obvodů pro simulaci ztrátových induktorů či dvojných kapacitorů a na základě požadavků těchto struktur volit výchozí typ struktury a rozložení ztrát. Z tohoto hlediska se jeví jako výhodná pro realizaci ARC filtrů pomocí dvojných kapacitorů zejména struktura cíleně ztrátových prototypů se ztrátami rozprostřenými pouze do příčných větví (obr.6.1a). Symbolická forma metody řešení je velmi efektivní a rychlá, není ji však možné využít pro řešení soustav rovnic v případě vyšších hodnot řádů

filtrů. Symbolický výraz pro přenos je v tom případě u ztrátové varianty článku neúnosně složitý. Pro tyto případy je nutno použít kombinované semisymbolické nebo numerické formy metody řešení soustavy rovnic.

6.3 PROGRAMY PRO SYNTÉZU CÍLENĚ ZTRÁTOVÝCH PŘÍČKOVÝCH STRUKTUR

Byly navrženy numerické postupy a ověřeny algoritmy pro obě formy iterační metody řešení soustavy nelineárních rovnic umožňující syntézu cíleně ztrátových struktur RLC prototypů. Symbolickou formu metody řešení využívají vyvinuté programy SYNTLOSS 7, SYNTLOSS 10P a SYNTLOSS 10S, numerickou metodu

řešení používá program nazvaný SYNTLOSS 10 a jednoduché programy GICLOSS a FILTR.

Programy umožňují realizovat cíleně ztrátovou syntézu RLC příčkových prototypů filtrů normovaných dolních propustí se ztrátovými prvky rozmístěnými v příčných větvích (struktura RLC z obr. 6.1a) pro aproximace s monotónní charakteristikou útlumu v nepropustném pásmu:

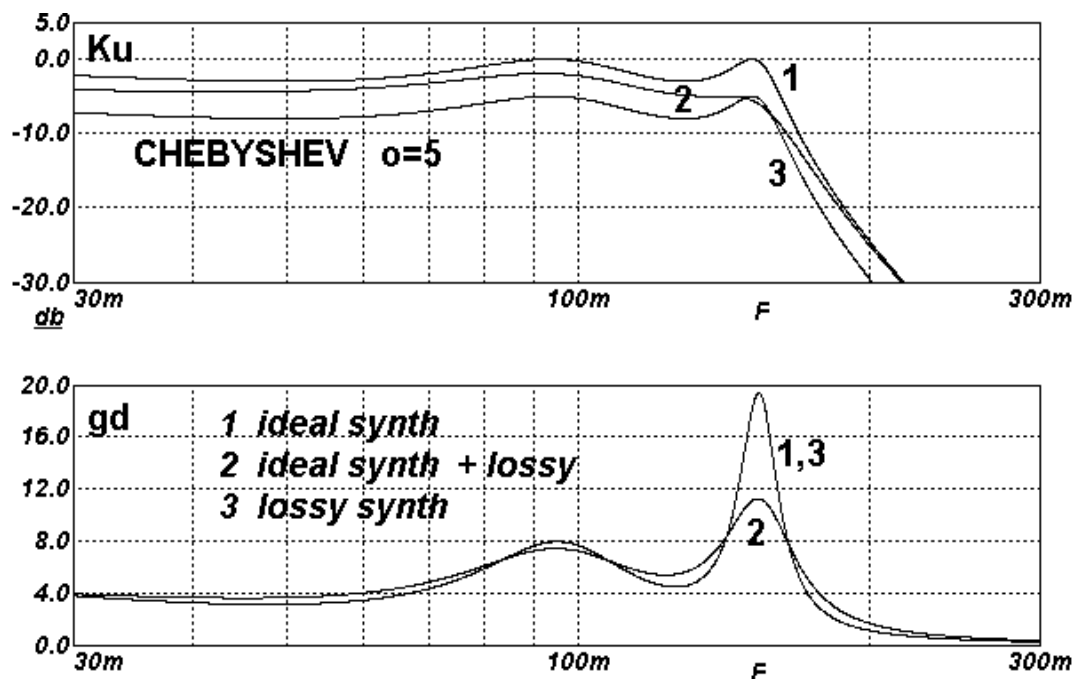
- SYNTLOSS 7 – umožňuje návrh a optimalizaci RLC prototypů do 7. řádu se ztrátovými prvky libovolně rozmístěnými ve všech sériových i paralelních větvích struktury
- SYNTLOSS 10P, SYNTLOSS 10S – umožňuje návrh a optimalizaci RLC prototypů do 10. řádu se ztrátovými prvky libovolně rozmístěnými ve všech sériových (SYNTLOSS 10S) nebo ve všech paralelních (SYNTLOSS 10P) větvích struktury filtrů
- SYNTLOSS 10 – umožňuje návrh a optimalizaci RLC prototypů do 10. řádu se ztrátovými prvky libovolně rozmístěnými ve všech sériových i paralelních větvích struktury, vzhledem k formě (numerická metoda) řešení je nutno počítat u vyšších řádů filtrů s menší rychlostí řešení
- GICLOSS - umožňuje návrh a optimalizaci ARC dolních propustí s dvojnými kapacitami
- FILTR - umožňuje zobrazení a tisk parametrů vybraných modifikací získaných řešením cíleně ztrátových struktur normovaných dolních propustí

6.4 OPTIMALIZACE RLC PROTOTYPŮ POMOCÍ CÍLENĚ ZTRÁTOVÝCH PŘÍČKOVÝCH STRUKTUR

Využití nové metody syntézy cíleně ztrátových RLC prototypů příčkových filtrů v oblasti syntézy ARC a SC filtrů přináší významnou možnost optimalizace některých typů filtrů a umožňuje zlepšení parametrů těchto filtrů realizovaných na základě prototypů ztrátových příčkových LC filtrů.

6.4.1 Kompenzace ztrát reálných prvků

Příklad využití programů pro syntézu ztrátových struktur umožňujících kompenzaci ztrát reálných stavebních prvků filtru ukazuje obr.6.2. Je vidět, že modulová charakteristika i charakteristika skupinového zpoždění ztrátové struktury zcela odpovídají ideálnímu a reálné ztráty použitých prvků jsou tedy plně kompenzovány. Cíleně ztrátové prototypy mohou být využity i k eliminaci nepříznivého dopadu vlivu ztrátových prvků, které se nepříznivě projevují i v časové oblasti.



Obr.6.2 Přenosové vlastnosti Čebyševova filtru 5.řádu
 (1 –ideální charakteristiky, 2- charakteristiky filtru s reálnými ztrátami prvků , 3 - charakteristiky kompenzovaného filtru s reálnými ztrátami navrženého cíleně ztrátovou syntézou)

6.4.2 Minimalizace rozsahu hodnot parametrů prvků a citlivosti

a) Minimalizace rozsahu hodnot parametrů prvků

Nová metoda syntézy a využití cíleně ztrátových struktur příčkových prototypů přináší nové možnosti pro minimalizaci rozsahu hodnot jednotlivých stavebních prvků filtrů. Vhodným rozmístěním a optimalizací hodnot ztrátových (tlumících) rezistorů struktury lze dosáhnout u cíleně ztrátových prototypů minimalizace rozsahů hodnot kapacitorů a induktorů (minimalizace k_L a k_C) [20].

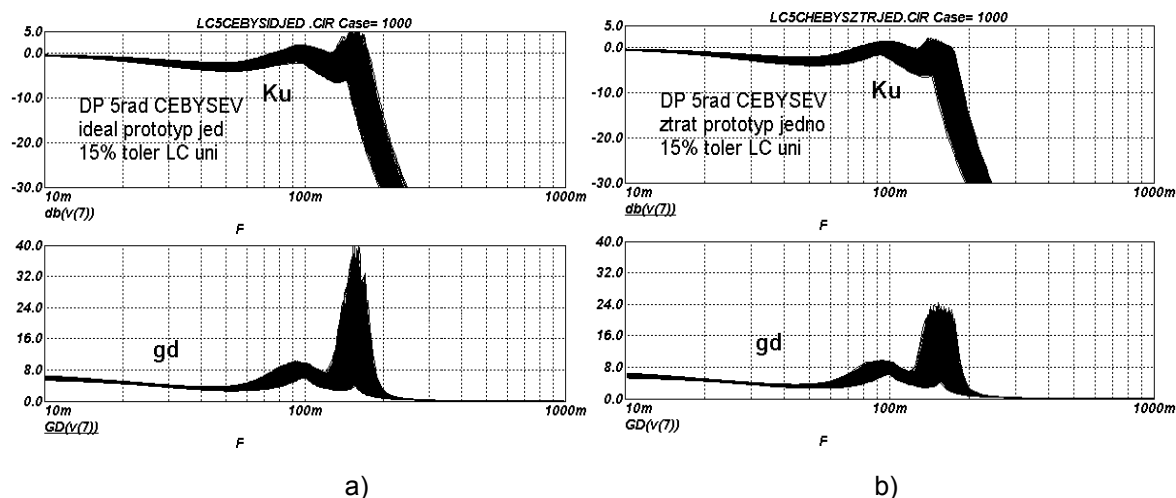
U navržených cíleně ztrátových struktur byla podrobně vyšetřena závislost parametrů k_L a k_C na činiteli jakosti Q .

Metodou ztrátové syntézy je možné dosáhnout výrazného zmenšení rozsahu hodnot parametrů prvků zejména u Besselovy a také Butterworthovy aproximace. U filtrů Čebyševovy struktury, která má přísnější požadavky na činitele jakosti, je poměr hodnot prvků daleko více svázán ze strukturou a možnost optimalizace je zde v tomto směru určitým způsobem omezena.

b) Minimalizace citlivosti na změny parametrů prvků

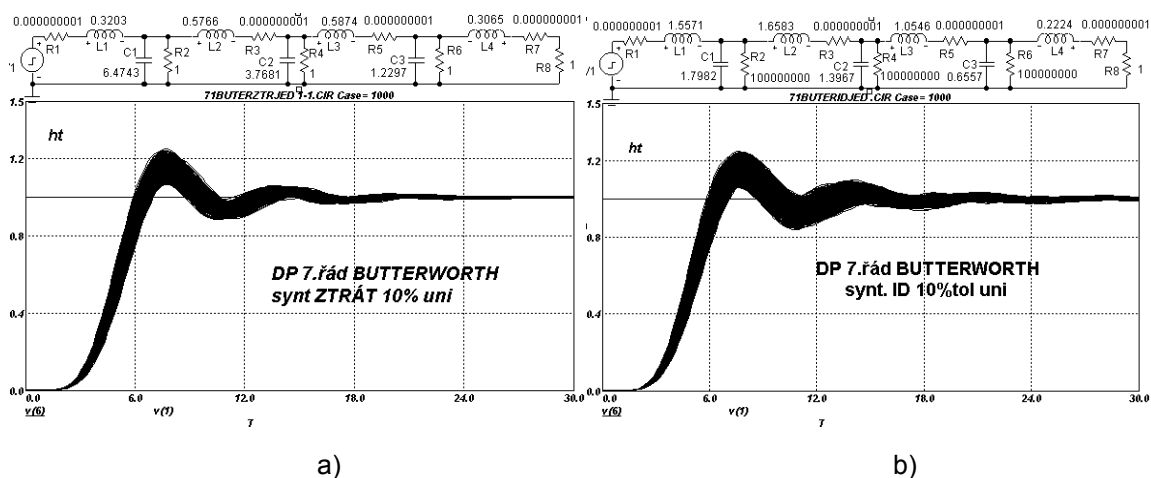
Struktury filtrů vycházející z cíleně ztrátových prototypů mají ve všech případech menší citlivosti na tolerance LC prvků než struktury vycházející z bezztrátových

(ideálních) prototypů, největší citlivosti na tolerance prvků jsou podle očekávání v oblasti okolo mezního kmitočtu.



Obr.6.3 Porovnání charakteristik pro jednostranné zakončení bezztrátového (a) a ztrátového (b) prototypu Čebyševovy aproximace

Obdobně jako v kmitočtové oblasti se menší citlivost na tolerance prvků projevuje u cíleně ztrátových struktur ve srovnání s ideálními prototypy i v časové oblasti. Také zde je možno pozorovat tím větší rozdíly, čím je vyšší řád filtru, jak je vidět z obr.6.4.

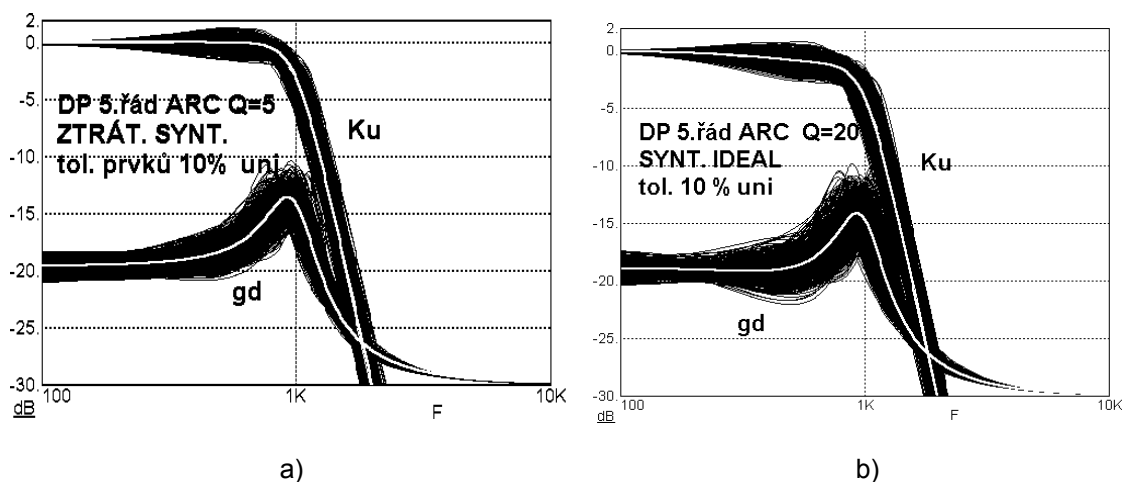


Obr.6.4 Přenosové charakteristiky prototypů 7.řádu Butterworthovy aproximace
a) cíleně ztrátového, b) bezztrátového prototypu

Za pomoci normovaných prototypů cíleně ztrátových RLC příčkových struktur je možno klasickým způsobem kmitočtové transformace získat odpovídající charakteristiky filtrů horních propustí, pásmových propustí a pásmových zádrží, které také odrážejí lepší vlastnosti cíleně ztrátových RLC příčkových struktur i u těchto filtrů.

6.5 CÍLENĚ ZTRÁTOVÉ PROTOTYPY PŘI OPTIMALIZACI ARC FILTRŮ

Můžeme konstatovat, že filtry ARC vycházející ze ztrátové struktury mají odezvy v kmitočtové i časové oblasti prakticky totožné s teoretickými. Zapojení vycházející ze ztrátových prototypů však umožňuje dosáhnout oproti zapojení vycházejícímu z ideálního bezztrátového prototypu větší dynamiku přenosu a je výrazně méně citlivé na vliv reálných parametrů aktivních prvků. Byla provedena rozsáhlá srovnání filtrů realizovaných pomocí ztrátových a bezztrátových struktur. Citlivost struktur na tolerance stavebních prvků byla analyzována pomocí metody Monte Carlo pro 10% tolerance všech prvků schématu za předpokladu rovnoměrného rozložení pravděpodobnosti odchylek.



Obr.6.5 Přenos ARC filtrů dolních propustí 5.řádu – a) navrženého z cíleně ztrátové výchozí struktury, b) navrženého z výchozího ideálního prototypu RLC

Z porovnání rozptylu přenosových charakteristik obou modifikací ARC filtrů vyplývá, že filtry navržené na základě ztrátového prototypu (příklad na obr.6.5a) mají menší citlivost na tolerance jednotlivých prvků, než filtry navržené na základě bezztrátového prototypu (obr.6.5b).

7 ZÁVĚR

Předložená práce si vytkla za cíl v oblasti optimalizace procesu aproximace zlepšit stávající ucelený systém aproximačních funkcí. Navrhuje modifikaci systému který odstraňuje nedostatky, které se projevovaly v některých případech při návrhu filtrů s náročnějšími požadavky v časové oblasti.

Navržený modifikovaný systém doplňuje o Gaussovou aproximaci, která umožňuje řešit požadavky i při návrhu filtrů s náročnými požadavky na časové odezvy. Pro navržený systém využívá novou tranzitivní aproximaci s nulovými body (TICGA) [28], která má širší možnosti využití než dosud používaná aproximace TICFU. Systém doplňuje o návrh optimalizovaných pásmových propustí s nulovými body přenosu [26], [27], [29]. Pro obě nově využívané aproximace (Gaussova a TICGA)

byly navrženy algoritmy výpočtů, které byly realizovány jako ucelené procedury podprogramů v prostředí PASCAL a ověřeny v pracovní verzi programu Nafid.

V oblasti optimalizace procesu syntézy RLC prototypu bylo cílem práce propracování širších možností variačních metod syntézy a optimalizace, jejichž využití umožňuje současná výpočetní technika. Výsledky získané novou numerickou modifikační metodou byly porovnávány s výsledky získanými variační metodou syntézy v klasickém procesu syntézy filtrů. Výsledky rozsáhlých srovnání syntézy RLC prototypů různých typů aproximačních funkcí pro filtry normovaných dolních propustí však jednoznačně ukázaly, že nová numerická modifikační metoda nepřináší očekávané výsledky, neboť neumožňuje získat další nové varianty řešení obvodů.

Přínos této metody v oblasti filtrů dolních propustí by mohl spočívat spíše v možnosti dodatečné modifikace již navrženého funkčního filtru zejména ve formě aktivní realizace ARC filtru, která by mohla být touto metodou dodatečně optimalizována například na citlivost k některému z požadovaných stavebních prvků filtru. Určitý přínos představuje uvedená numerická variační metoda v oblasti syntézy a optimalizace struktur pásmových propustí [25].

Jak ukázaly výsledky srovnávacích analýz, metoda cíleně ztrátové syntézy RLC prototypů, kterou se zabývá poslední část předložené práce (kap.6), přináší velmi zajímavé výsledky a umožňuje účinně optimalizovat vlastnosti RLC článků příčkových struktur. Zejména v případě Besselovy aproximace a částečně i u Butterworthovy aproximace umožňuje výrazně zmenšit rozsah hodnot parametrů stavebních prvků filtru (optimalizovat poměr k_L).

U všech typů aproximací s monotónní charakteristikou útlumu v nepropustném pásmu umožňují cíleně ztrátové prototypy zmenšit citlivost filtrů na tolerance stavebních prvků s výrazným přínosem zvláště u filtrů strmějších aproximačních typů a filtrů vyšších řádů.

Cíleně ztrátové prototypy mohou být s výhodou použity při realizacích ARC filtrů využívajících výhodných vlastností RLC příčkových prototypů. Jak ukázaly výsledky srovnávacích analýz a modelování vlastností ARC filtrů pomocí počítačové analýzy, filtry ARC vycházející z těchto cíleně ztrátových prototypů vykazují menší citlivosti na tolerance stavebních prvků, což se příznivě projevuje v kmitočtových i časových odezvách filtrů.

Rozbor vlivu reálných vlastností na výsledné parametry ARC filtrů prokázal také výrazně menší citlivosti těchto filtrů i na reálné vlastnosti aktivních prvků – operačních zesilovačů. Tyto obvody mají také výrazně větší rozsah dynamiky oproti obvodům navrhovaným na základě bezeztrátových prototypů. Metodou syntézy, která byla podrobně rozpracována v této části práce, je možné navíc realizovat ARC filtry s jednoduššími dvojnými kapacitami s menší potřebnou hodnotou činitele jakosti Q , které je možné realizovat s menším počtem aktivních prvků – operačních zesilovačů - bez jakékoliv (dosud obvyklé) deformace přenosových charakteristik

filtru , ke které nutně dosud docházelo z principu při návrhu ARC filtrů vycházejících z bezeztrátových příčkových RLC prototypů [14], [15].

Pro bezprostřední možnost aplikace nově navržené metody cíleně ztrátové syntézy širší odbornou veřejností byly vypracovány podrobné tabulky ztrátových RLC prototypů Besselovy, Butterworthovy a Čebyševovy aproximace využitelné zejména pro návrh dolních propustí ARC filtrů [31], [32], které umožňují tyto ARC filtry realizovat s lepšími vlastnostmi a podstatně efektivněji – s polovičním počtem aktivních prvků - než umožňovala dosavadní metoda syntézy při použití bezeztrátových RLC prototypů.

8 LITERATURA

- [1] Lanne,A.,A.:Optimální syntéza lineárních elektrických obvodů. SNTL. Praha, 1973.
- [2] Hájek, K., - Sedláček,J.: Strategy of Filter Design and Optimization. Proceedings XX SPETO 1997, Gliwice-Ustroń Poland, s. 23 -28.
- [3] Peles,Y.-Murakami,T.: Analysis and synthesis of transitional Butterworth – Thomson filters. RCA Review18, March 1957.
- [4] Hájek, K.- Sedláček, J.: The New TICFU Transitional Approximation. Proc. of ECCTD'95, Istanbul, 1995, Vol. 2, pp. 913-916.
- [5] Hájek, K., - Sedláček,J.: Effective Design of the Antialiasing Filters. Proceedings SPETO 96, Gliwice-Ustroń Poland,1996, s.417-420.
- [6] Hájek, K., - Sedláček,J.: An Iterative Solution of the Characteristic Equations of Transitive Filter Types, Konference XXIII SPETO 2000, Gliwice- Ustroń, May 2000, p.201 – 204,
- [7] Tomlinson,G.,H.: Electrical networks and filters. Theory and design. Prentice Hall Int. UK, Ltd, 1991.
- [8] Saal, R: Handbuch zum filterenwurf. AEG - Telefunken, 1979.
- [9] Yiachung Sun-Way Lung Lee.: Multiple Solutions and Sensitivity Comparison of Passive LC Filters, ECCTD 99,Italy, Stresa 1999, p.807-810.
- [10] Sedláček, J.: Modifikační syntéza standardních LC filtrů. Sborník přednášek KTEM 2000, Praha 2000, s.67-70.
- [11] Sedláček,J.: A New TICFU Filter Variations . Konference XXI I SPETO 1999, Gliwice- Ustroń, May 1999, pp.331 – 334.
- [12] Hájek, K., - Sedláček,J.: Nafid Program as Powerful Tool in Filter Education Area. CBLIS97,Leicester July 1997,K4.
- [13] Desoer, C., A. - Mitra S., K.: Design of Lossy Ladder Filters by Digital Computer. IRE Trans. on CT, Vol. 8, No. 3, Sept. 1961, pp. 192-202.
- [14] Gorski, J. - Popiel, A.: RC-active synthesis using PIC. Electronic letters, August 1967, vol. 3, p. 381-382.
- [15] Rollett, J. M.: Economical RC active lossy ladder filters, Electron. Lett., vol. 9, no. 3, pp. 70–72, Feb. 1973.
- [16] Sobhy, M. I.: Elements of lossy ladder networks. IEEE Trans. on CT, Vol. 20, No. 5, September 1973, pp. 614-615

- [17] Pavlovic, V. - Popovic, M.: An iterative method for lossy LC ladder filter Synthesis, Proc. 1987 ECCTD, Vol. 1, Paris, France, September 1987, pp. 185-190.
- [18] Martinek, P. - Přivratský D.: Elliptic Filters with Lossy FDNRs. Radioelektronika '97. Bratislava, Slovak University of Technology, 1997, p. 58-61.
- [19] Rosenbaum, Glen Var.: RF Capacitive-Coupled Filters. Spectrum Astro. Applied Microwave & Wireless, Oct. 98, pp. 74-83.
- [20] Hájek, K. - Sedláček, J. - Sviezeny, B.: Improving of the Active RC and SC Filters by Use of Goal-Directed Lossy LC Ladder Prototypes. Proceedings of ECCTD-03, Krakow, September 2003, pp. I-381-384, ISBN 83-88-309-95-1.
- [21] Hájek, K. - Sedláček, J.: "General Multiple LC Prototype Filter Solutions and Optimization". Proc. ICECS 2002, Dubrovnik, September 2002, p. 165 - 168.
- [22] Hájek, K. - Sedláček, J.: Kmitočtové filtry. BEN, Praha 2002.
- [23] Orchard, H. J.: Loss Sensitivities in Singly and Doubly Terminated Filters. IEE Trans. on CAS, Vol. CAS-26, No. 5, May 1979.
- [24] ZAPLETAL, Z.: Variační řešení prototypů LC filtrů. Sborník prací studentů a doktorandů. CERM Brno 2000, s. 473-475.
- [25] Sedláček, J. - Zapletal, Z.: A Variable Method in the Band – Pass Filter Synthesis. Sborník konference AMTEE 2001, ZČU Plzeň 2001, B39-3, ISBN 80-7082-756-4
- [26] Zapletal, Z.: Návrh filtrů vázaných pásmových propustí s nulami přenosu. In proceedings Conference STO 8, Brno 2001, pp. 381-384.
- [27] Zapletal, Z.: The coupled bandpass filters with rejections. In proceedings Conference XXV SPETO 2002, May 2002, Gliwice- Ustroń, pp. 381-384.
- [28] Hájek, K. - Sedláček, J. - Zapletal, Z.: A new TICGA approximation, Proceedings of AMTEE '03, ZČU Plzeň 2003, B29-32, ISBN 80-7082-756-4
- [29] Sedláček, J. - Zapletal, Z.: Universal Design of Coupled Bandpass Filters with Rejections In proceedings of XXVI SPETO 03, Gliwice-Niedzica, May 2003, p. 181 – 184
- [30] Zapletal, Z.: An iterative solution of goal – directed lossy filters. In proceedings Conference XXVII SPETO 2004, May 2004, Gliwice- Niedzica, (printed).
- [31] Sedláček, J. - Zapletal, Z.: Synthesis of active low – pass filters using lossy GIC In proceedings of XXVII SPETO 04, May 2004, Gliwice-Niedzica, (printed)
- [32] Hájek, K. - Sedláček, J. - Zapletal, Z.: A new method of low – pass ARC filter optimization, In Proceedings of International conference Elektro 04, ZČU Plzeň 2004, (printed)
- [33] Hájek, K. - Sedláček, J. - Sviezeny, B., Zapletal, Z.: Improving of the Active RC and SC Filters by Use of Goal-Directed Lossy LC Ladder Prototypes. Proceedings of ECCTD-03, Krakow, September 2003, pp. I-381-384, ISBN 83-88-309-95-1
- [34] Zapletal, Z.: Variační řešení prototypů LC filtrů. Sborník prací studentů a doktorandů. CERM Brno 2000, s. 473-475

- [35] Sedláček,J.-Zapletal,Z.: A Variable Method in the Band – Pass Filter Synthesis. AMTEE 2001, ZČU Plzeň 2001, B39-3, ISBN 80-7082-756-4
- [36] Zapletal, Z.: Návrh filtrů vázaných pásmových propustí s nulami přenosu. In proceedings Conference STO 8 , Brno 2001, pp.381-384.
- [37] Zapletal, Z.: The coupled bandpass filters with rejections. In proceedings Conference XXV SPETO 2002, May 2002, Gliwice- Ustroň, pp.381-384.
- [38] Hájek,K.-Sedláček,J.-Zapletal,Z.:A new TICGA approximation, Proceedings of AMTEE'03, ZČU Plzeň 2003, September 03, ISBN 80-7082-960-5, p.B29-32
- [39] Sedláček,J.-Zapletal,Z.: Universal Design of Coupled Bandpass Filters with Rejections SPETO 03, Gliwice-Niedzica, May 2003, p.181-184
- [40] Zapletal,Z.:An iterative solution of goal – directed lossy filters . In proceedings Conference XXVII SPETO 2004, May 2004, Gliwice- Niedzica, (printed).
- [41] Sedláček,J.-Zapletal,Z.: Synthesis of active low – pass filters using lossy GIC In proceedings of XXVII SPETO 04, May 2004,Gliwice-Niedzica, (printed),
- [42] Hájek,K.-Sedláček,J.-Zapletal,Z.:A new method of low – pass ARC filter optimization, In Proceedings of International conference Elektro 04, ZČU Plzeň 2004, (printed)

9 CURRICULUM VITAE

Jméno: Ing. Zdeněk Zapletal
 Narozen: 7. září 1975
 Kontakt: +420603764444, zapletal.zden@volny.cz

Vzdělání

1982 – 1990	Základní škola, Kuřim
1990 – 1994	Střední průmyslová škola elektrotechnická, Brno
1994 – 1999	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ústav kybernetiky, automatizace a měření
1999 – 2002	Doktorské studium, presenční forma

Praxe

Od r. 2002 zaměstnán u firmy KME, spol. s r. o. jako vývojový pracovník v oblasti průmyslové automatizace.

Krátký odborný životopis

Zdeněk Zapletal se narodil 7.9.1975 v Brně. Již od studia na střední průmyslové škole elektrotechnické (od r. 1990) se aktivně zajímal o dění v oboru. Středoškolské studium úspěšně završil maturitou v r. 1994. Logickým pokračováním studia elektrotechniky bylo od r. 1994 studium na VUT Brno, Fakultě elektrotechniky a informatiky na Ústavu kybernetiky, automatizace a měření. Toto pětileté inženýrské studium zakončil roku 1999 získáním titulu Ing. V roce 1999 započal doktorské studium jehož završením je předložena disertační práce.

10 ABSTRAKT

Předložená práce se zabývá optimalizací RLC prototypů kmitočtových filtrů využitím uceleného systému standardních aproximací, který používá Gaussovu aproximaci, nově vyvinutou tranzitivní aproximaci s nulovými body (TICGA) a optimalizované pásmové propusti s nulovými body přenosu. Pro navržený systém byly ověřeny metody a algoritmy výpočtů aproximačních funkcí s požadovanými parametry. V oblasti optimalizace procesu syntézy RLC prototypu rozvíjí disertační práce variační metody syntézy a optimalizace založené na širším využití možností současné výpočetní techniky. Účinnou optimalizaci RLC článků příčkových struktur přinesla podrobně rozpracovaná metoda cíleně ztrátové syntézy. Pomocí uvedené metody a navržených algoritmů syntézy, je možné realizovat prototypy filtrů s menším rozsahem hodnot parametrů stavebních prvků filtru a s menší citlivostí na tolerance prvků. ARC filtry vycházející z těchto cíleně ztrátových prototypů vykazují nejen menší rozsah hodnot parametrů stavebních prvků, menší citlivosti na tolerance stavebních prvků, ale také výrazně menší citlivosti těchto filtrů na reálné vlastnosti aktivních prvků – operačních zesilovačů při podstatně větším rozsahu dynamiky. ARC filtry s dvojnými kapacitami s menší potřebnou hodnotou činitele jakosti Q je možné realizovat s polovičním počtem aktivních prvků - operačních zesilovačů - bez jakékoliv deformace přenosových charakteristik filtru, ke které dosud nutně docházelo z principu při návrhu ARC filtrů vycházejících z bezztrátových příčkových RLC prototypů.

ABSTRACT

The area of presented dissertation is the optimization of frequency RLC filter prototypes using designed system of standard approximation types with Gauss approximation type, new transient approximation TICGA type with rejections and new optimized band – pass filters with inserted rejections. In approximation procedures of system were verified new methods and algorithms, which enable to design approximation functions of required parameters. In area of RLC prototype synthesis process the works were focussed to various filter design procedures which enable to generate multiple filter solutions by wider computer aided design. As very efficiency method to filter parameter optimization were developed the goal – directed lossy design of filter prototype. Using new developed synthesis method and procedures can be designed the lossy RLC prototypes with minimized element value spread and sensitivity optimization. ARC filters designed using goal – directed lossy prototypes exhibit many advantages as element spread and element sensitivity minimization as well as sensitivity minimization to real active element effects by better dynamic range. Resulting filter responses are without any deviations due finite Q factor of GIC elements and can be designed with minimized number of active elements in comparison to filter designed using lossless RLC filter prototypes.