

Syntéza moderních struktur kmitočtových filtrů

Předložená disertační práce se zabývá metodami syntézy vybraných struktur kmitočtových filtrů, jejich optimalizací a možnostmi praktické aplikace. Důraz práce je položen především na aktivní filtry se syntetickými prvky jako jsou frekvenčně závislé negativní rezistory (FDNR) a syntetické indukty (SI), se zaměřením na méně rozpracovanou oblast jejich nekaskádní syntézy. I když patří zvolené téma práce ke klasickým disciplinám teorie elektronických obvodů, potažmo filtrů, v kontextu požadavků na zpracování analogových signálů o stále vyšších frekvencích a technologického pokroku ve vývoji analogových funkčních bloků, zejména operačních zesilovačů, **považuji téma za stále velmi aktuální a zapadající do oboru disertace Teoretická elektrotechnika.**

Disertační práce je poměrně rozsáhlá, s celkovým počtem **135 stran**. Kromě úvodu, který rovněž zahrnuje rozbor současného stavu problematiky a cíle disertační práce, závěru, seznamu literatury a příloh, sestává práce ze tří hlavních částí – kap. 2. *Aktivní bloky II. řádu*, kap. 3. *Filtry vyšších řádů* a kap. 4. *Návrh kmitočtových filtrů pro konkrétní aplikace*. Z hlediska posuzování přínosu disertanta k vědní oblasti považuji za klíčové 2. a 3. kapitulu, kap. 4. je z mého pohledu spíše doplňující, kdy navíc ze čtyř příkladů návrhu filtrů dva s jádrem disertace nemají přímou souvislost, viz dále.

V úvodu autor disertace analyzuje vlastnosti a optimalizuje návrhy aktivních funkčních bloků s napěťovými zesilovači realizující dvojný kapacitor (FDNR) a syntetický induktor (SI), které jsou dále využity při syntéze filtrů 2. i vyšších řádů. Jak autor správně uvádí, pro ekonomický návrh filtrů je výhodnější vycházet ze ztrátových variant výše uvedených syntetických prvků, které vyžadují použití menšího počtu zesilovačů. Právě na výběr a optimalizaci vhodných zapojení ztrátových syntetických prvků je zaměřena první část práce, kap. 2. Autor analyzuje 5 nejběžnějších zapojení s napěťovými zesilovači, především s ohledem na dosahovaný činitel jakosti Q a citlivosti na změnu obvodových parametrů. K analýze je využito standardních nástrojů - program pro symbolickou analýzu obvodů SNAP a simulační program PSpice. Jako jeden z výsledků autor uvádí optimalizaci velikosti zesílení K použitého zesilovače s ohledem na dosažení nízkých citlivostí na změny obvodových parametrů, vedoucí ke snížení nutného poměru odporů (u FDNR) nebo kapacit (u SI) z hodnoty $4Q^2$ na $3Q$. Zvýšením zesílení K nad jeho nominální hodnotu, tzv. kompenzovaným zapojením, lze takto docílit vyššího činitele jakosti Q . U zapojení HP se ztrátovými SI je rovněž simulován vliv šířky pásma použitého zesilovače (přesněji parametr GBW) a porovnán dynamický rozsah jednotlivých zapojení. Na základě citlivostní analýzy je konečně proveden výběr dvou zapojení (typy I a V), která se jeví pro další aplikace jako nejvhodnější. Kapitola 2 je zakončena rozбором vlastností syntetického bezeztrátového rezonančního obvodu (RD), který lze s výhodou využít k syntéze pásmových zádrží, příp. dolních propustí vyšších řádů s nulami přenosu. Simulacemi je zde ověřena řada užitečných vlastností obvodu, včetně možnosti nezávislého nastavování rezonanční frekvence a činitele jakosti či zjištění malých citlivostí na změny obvodových parametrů, nevyjímaje zesílení a šířku pásma aktivního prvku.

K této části práce mám následující připomínky. Především, u vzorec (2.1), str. 7, pro impedanci dvojného kapacitou nemá být znaménko minus. Dále mi není zcela jasný důvod pro zavedení speciální funkce $f_{(K)}$, viz tab. 2.3 a 2.10, která je totožná s činitelem jakosti Q_K , s nímž bylo tedy možno přímo pracovat. V tab. 2.2 a 2.9 chybí vysvětlení veličin, není např. vůbec specifikován druh zesilovače (předpokládám, že se jedná o ideální napěťový zesilovač se zesílením K , ale mělo to být uvedeno). Citlivostní analýzy jsou provedeny pouze přibližně, simulacemi v programu PSpice, a to i při použití idealizovaných aktivních prvků. Vzhledem k celkové jednoduchosti obvodů bych očekával, že budou odvozeny analytické vztahy těchto citlivostí, které by umožnily obecnější pohled na chování obvodů. V práci jsou v podstatě odvozeny pouze přenosové funkce s obecnou hodnotou zesílení K . U simulací zapojení s konkrétními typy operačních zesilovačů není jejich volba nijak zdůvodněna, viz AD8044 u obvodů FDNR a SI či $\mu A741$ u horní propusti se SI. Autor používá pojem „úhlová frekvence“ pro její speciální případ ω_0 (uvedeno rovněž v seznamu symbolů), což je ovšem pojem obecný. V kap. 2.7, která se týká porovnání dynamických rozsahů obvodů ztrátových SI, hovoří autor o dolní propusti, ačkoliv se jedná o propust horní.

Kapitola 3 je věnována syntéze vybraných typů ARC filtrů vyšších řádů, přičemž je využíváno poznatku z kapitoly předešlé, tedy rozboru vlastností a optimalizace aktivních filtrů 2. řádu. Úvodní část kapitoly je věnována syntéze ARC filtrů 5. řádu na základě RLC přičkových prototypů, dolní propusti (DP) se ztrátovými FDNR a horní propusti (HP) se ztrátovými SI. Na základě počítačových simulací kmitočtových charakteristik, vč. toleranční analýzy metodou Monte Carlo, a také měření na funkčních vzorcích, bylo prokázáno účelné použití kompenzovaných ztrátových prvků diskutovaných v kap. 2. Chybí mi bližší zdůvodnění volby řádu filtrů, jakož i výběru typů operačních zesilovačů pro praktickou realizaci, použitelnost zapojení do frekvencí jednotek MHz je navíc demonstrována pouze pro druhý případ HP. Na obr. 3.21 a 3.23, str. 53, je dále chybně uváděna DP namísto HP.

Následující část práce se zabývá návrhem ARC filtrů vyšších řádů se ztrátovými prvky FDNR a SI založené na vázaných RLC prototypech, vedoucí na optimalizované ARC pásmové propusti (PP) s úzkým pásmem propustnosti. Zajímavou myšlenkou je zde zahrnutí zakončovacích rezistorů filtrů do cíleně ztrátových syntetických prvků. Vlastní návrhy byly ověřeny simulacemi induktivně i kapacitně vázaných PP, resp. rezistivně a kapacitně vázaných aktivních PP po příslušných náhradách, i měřeními funkčních vzorků. Na základě toleranční analýzy byla prokázána mnohem menší závislost na rozptylu hodnot použitých prvků v okolí rezonančního kmitočtu ve srovnání s konvenční kaskádní PP typu Sallen Key. Zajímavou aplikací ztrátových dvojných kapacitorů je syntéza filtrů vyšších řádů s nulami přenosu, která předpokládá zavedení cílených ztrát do přičkové struktury RLC prototypu, vedoucí po Brutonově transformaci na ARC filtry se ztrátovými FDNR. Autor práce zde podrobně analyzuje dolní propusti 3. až 9. řádu, s inverzní Čebyševovou aproximací a předepsaným potlačením v nepropustném pásmu. Jsou zkoumány souvislosti velikosti ztrát a potlačení nuly přenosu, jakož i velikosti činitele jakosti a jsou činěny doporučení pro praktické aplikace. Zde bych chtěl upozornit na chybně značený parametr „z“ v grafu na obr. 3.74, kde je mylně uváděn jako R_z , srov. tab. 3.2 a vzorec (3.19). Vyústěním této části práce je návrh obecnějšího přístupu k syntéze uvedených typů filtrů, s názornou ukázkou její aplikace na konkrétní filtr DP 5. řádu s nulami přenosu.

V závěrečné teoretické části práce se autor zabývá syntézou DP s nulami přenosu s bezeztrátovým rezonančním obvodem RD a uvádí praktický příklad návrhu DP 3. a 5. řádu doplněný počítačovými simulacemi. Srovnání je provedeno s výsledky kaskádní syntézy filtrů stejných parametrů pomocí programů NAF a MicroCAP. Oba výsledky klasické syntézy vedly na složitější ARC struktury, navíc s patrnými většími rozptyly přenosových funkcí získaných při toleranční analýze.

Poslední částí disertace je kap. 4., věnovaná příkladům návrhů filtrů pro konkrétní aplikace: *ARC filtr pro zpracování NMR signálů*, *Filtr s nulami přenosu pro indukčnostní snímače*, *Čtyřkvadrantový univerzální filtr LTC1562 pro systém nukleární magnetické rezonance* a konečně *Digitálně řízený antialiasingový filtr*. Zatímco první dvě aplikace filtrů mohou být pokládány za vhodné doložení praktické použitelnosti metod syntézy filtrů z teoretických částí práce, poslední dva filtry, založené na komerčně dostupných integrovaných obvodech, nemají dle mého názoru s jádrem disertace přímou souvislost a jsou nadbytečné, poukazující spíše na projekty řešené na pracovišti disertanta.

Disertant provedl mnoho dílčích analýz i návrhových prací s ohledem na aplikaci syntetických ztrátových prvků FDNR a SI a bezeztrátového prvku RD při syntéze ARC filtrů vyšších řádů. Práce obsahuje řadu užitečných výsledků simulací, tabulek i praktických doporučení, které mohou být jistě velmi užitečné pro zájemce o syntézu filtrů založených na diskutovaných principech. Na druhou stranu práce obsahuje mnoho konkrétních příkladů se spoustou různých číselných parametrů, u kterých mně mnohdy chybí zdůvodnění jejich volby a orientace v nich je často obtížná. Je to typické pro celou disertaci, kdy jsou na základě analýzy mnoha konkrétních případů filtrů činěny obecnější závěry. Až na výjimky jsou např. mezní kmitočty filtrů voleny v řádech jednotek až desítek kHz, volba typů aktivních prvků při praktických realizacích není podrobněji diskutována apod. Některé části disertace, např. podrobný popis realizací filtrů v kap. 4, včetně návrhů desek plošných spojů, nepovažuji za nutné uvádět, hodí se spíše pro kvalifikační práce magisterské. I přes uvedené výtky však **považuji vytyčené cíle disertace za splněné**. Za původní přínosné části považuji především myšlenku využití kompenzovaných ztrátových syntetických prvků FDNR a SI, které mohou být dále využity při návrhu filtrů vyšších řádů, včetně optimalizovaných vázaných ARC pásmových propustí. Po formální stránce je práce velmi pečlivě zpracována a má vysokou grafickou úroveň.

Na disertanta mám následující doplňující dotaz:

- Pokuste se srovnat parametry filtrů navržených diskutovanou metodikou syntézy, při které byly použity operační zesilovače s napěťovou zpětnou vazbou, s aplikací dalších moderních aktivních funkčních bloků, např. pracujících v proudovém či smíšených módech.

Jádro disertace bylo publikováno především na mezinárodních zahraničních konferencích, vč. konferencí indexovaných ve Web of Science nebo SCOPUS, a v tuzemských vědeckých časopisech. Publikační aktivity by mohly být výraznější, především směrem k impaktovaným časopisům, přestože jsou požadované kvantitativní ukazatele s vysokou rezervou překročeny. Disertant je spoluautorem jednoho článku v časopise *Radioengineering*, zaměření práce se však s tématem disertace míjí. Ve světové databázi Web of Science lze dohledat 6 záznamů, s H-indexem 1, v databázi SCOPUS pak 15 záznamů. Z celkového počtu doložených 37 publikačních výstupů je disertant u 14 hlavním autorem, figuruje dále u 15 hodnocených produktů, s hlavním autorstvím u 9 z nich. Na základě výše uvedených skutečností mohu konstatovat, že je disertant **dostatečně vědecky erudovanou osobností**, s perspektivou dalšího odborného růstu.

Závěrem chci konstatovat, že **disertační práce přispívá k rozvoji vědního oboru Teoretická elektrotechnika a dokládá schopnosti autora k další samostatné vědecké práci.**

Doporučuji proto, aby byl panu **Ing. Martinu Friedlovi** po úspěšné obhajobě předložené disertační práce udělen akademický titul **doktor (Ph.D.)**.

V Brně 10.3.2014

prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.
Ústav radioelektroniky FEKT VUT v Brně