

Aktivní kmitočtové filtry pro vyšší kmitočty

prof. Ing. Dalibor Biolek, CSc., UMEL FEKT VUT Brno, Technická 3058/10, 616 00 Brno
biolek@feec.vutbr.cz

Jádro disertace je jasně vymezeno do tří okruhů: Aktivní filtry se strukturou Leap-Frog, vázané ARC filtry a univerzální filtry 2. řádu. Ve všech třech případech a zejména v případě prostředním je zřejmý značný, a je třeba říci, že velmi pozitivní, vliv školitele doc. Sedláčka, který se dlouhodobě zabývá zejména syntézou filtrů, vycházejících z příčkových článků. Doktoranda proto nasměroval k tématům, které jsou v oblasti aktivních filtrů aktuální i v dnešní době: Z nekaskádní syntézy jsou to postupy, vedoucí k aktivním filtrům s nízkými citlivostmi (Leap-Frog) a k filtrům s relativně nízkými rozptyly parametrů prvků i pro vysoké činitele jakosti (vázané obvody), z kaskádní syntézy pak orientace na struktury typu Ackerberg-Mossberg. Další významnou pomoc získal doktorand ve formě přístupu k zdrojovému kódu programu NAF pro návrh filtrů, jehož je doc. Sedláček spoluautorem. Doktorandovi se tak otevřela možnost implementace vyvíjených postupů syntézy přímo do prostředí tohoto známého návrhového programu.

Je mně sympatické, že se doktorand zaměřil na aktivní filtry, využívající klasické operační zesilovače, a že nepodlehł současným trendům návrhu filtrů s využitím jiných aktivních obvodových prvků, které sice mohou za jistých podmínek vykazovat lepší vlastnosti, avšak tyto prvky nejsou komerčně vyráběny. Výjimkou jsou OTA zesilovače a proudové konvejory CCII či transimpedanční zesilovače (AD844). Zde vyčítám autorovi, že o možnosti syntézy filtrů typu Leap-Frog, univerzálních bikvadů a dalších s využitím těchto aktivních prvků není v disertaci alespoň zmínka. U LF filtrů se například nabízejí aktivní prvky pro bezproblémovou realizaci jak invertujících, tak i neinvertujících integrátorů, což by v tomto případě přispělo k zjednodušení konstrukce.

Po prostudování práce mohu konstatovat, že tři hlavní cíle práce, které korespondují s trojicí výše uvedených odborných okruhů, byly splněny. Téma je velmi široké a k jeho řešení musel doktorand vynaložit značné úsilí. V rámci každého odborného okruhu bylo provedeno jak teoretické řešení problému, tak počítačové simulace a na závěr i realizace funkčních vzorků a měření. Připojeny jsou i srovnávací analýzy a z toho plynoucí závěry.

Za nezpochybnitelné a nejvýznamnější přínosy autora považuji:

- 1) Vytvoření metodiky sestavování struktur LF s operačními zesilovači s využitím grafů signálových toků.
- 2) Závěry plynoucí ze srovnávacích analýz ve všech třech odborných okruzích.
- 3) Tvorba nadstavby programu NAF.

Na druhou stranu je třeba vidět, že části, popisující dosažené výsledky, jsou psány poměrně stručně a místy s vynecháním detailů, jejichž zařazení do práce by lépe ozřejmilo záměry autora a hodnotu výsledků, jichž dosáhl. Některé podrobnosti uvádím níže.

Po grafické stránce je disertace na dobré, obvyklý průměr převyšující úrovni, s výjimkami, které jsou popsány níže. Práce je napsána poměrně dobrým jazykem s minimem překlepů (nalezl jsem jich méně než 10, což je pro soudobou disertační práci daného rozsahu neobvykle málo).

K disertaci mám následující konkrétní připomínky:

Terminologie, koncepční a formální nedostatky.

Seznam použitých zkratk: Všechny anglické zkratky by měly být doplněny plnými anglickými termíny, např. FDNR, ASC, GIC apod.

Správný termín pro filtr T-T je zřejmě Tow-Thomas a ne Towa-Thomas.

Závorky, čísla a jednotky veličin se neformátují stylem *italic*.

V česky psané disertaci by měl být operátor Laplaceovy transformace označován symbolem p , nikoliv s . V posuzované práci se objevují na různých místech oba symboly.

Před slovní spojení „a to“ se píše čárka. Čárka se rovněž píše před slovo „neboli“, ne za něj, atd. atd.

Přenos snížíme o 3dB, nikoliv o -3dB.

Obrázky sejmuté z grafického postprocesoru PROBE s černým pozadím a drobným písmem jsou velmi obtížně čitelné.

Namísto cívky by bylo vhodné používat termín induktor a namísto kondenzátoru kapacitor. Na některých místech je provedena záměna mezi obvodovým prvkem a jeho parametrem (např. na str. 80 se hovoří o rezistoru namísto o odporu).

Zkracování běžných slov, např. param. namísto parametr (str. 80) je v odborném textu neobvyklé.

Nejasnosti odborného charakteru, polemické body.

Domnívám se, že po stránce odborné není možné v práci nalézt **závažná** pochybení. Z dílčích postřehů uvádím pro potřeby disertanta následující:

Výklad kolem GST integrátoru na str. 14 mně připadá poněkud nejasný. Domnívám se, že by zde měl být zařazen odkaz na graf integrátoru z obr. 1.2.

Nelíbí se mně, že obyčejný převodník proudu na napětí s jedním OZ a rezistorem na obr. 2.20 je nazýván invertujícím integrátorem, byť je připojena podmínka nulové integrační kapacity.

V zájmu přehlednosti by bylo vhodné vyznačovat v zapojeních aktivních filtrů LF uzely, kde se nachází výstup po provedené transformaci pasivních příčkového filtru.

Optimalizace horní hranice dynamického rozsahu aktivních LF struktur na str. 24 je sice nastíněna na konkrétním příkladu, stálo by ale za to danou metodu postavit „na vědecký základ“ a formulovat, na základě přesného matematického rozboru, obecný postup, resp. pravidla přepočtu parametrů příslušných prvků. Jak se po této optimalizaci změní citlivostní vlastnosti filtru? Nedojde k zhoršení oproti stavu před optimalizací?

Na závěr části 2.3.1 byla provedena statistická analýza struktur LF v prostředí Cadence PSpice. V disertaci je nesprávně označována jako citlivostní analýza. Protože jde o dolní propusti, bylo by žádoucí analyzovat nejen histogramy mezního kmitočtu, ale i DC přenosu. V práci chybí údaj, zda byla analýza realizována pro individuální (DEV) či skupinové (LOT) či kombinované tolerance prvků. Správná varianta je DEV. Obávám se však, že byla použita metoda LOT. Nasvědčují tomu nízké rozptyly kmitočtu třídecibellového poklesu kolem teoretické hodnoty. Připomínám, že tolerance byla 5 procent pro rezistory a 10 procent pro kapacitory, což jsou poměrně vysoké hodnoty. V tom případě by příslušné závěry o citlivostech byly založeny na nesprávných datech. Danou metodiku jste jednotně aplikovali na srovnávání různých struktur filtrů v celé disertační práci.

Při studiu rozsáhlé kapitoly 2.3 mně nebylo zřejmé, jaké modely operačních zesilovačů byly použity ve všech SPICE analýzách, zda si autor vytvořil vlastní SPICE model „ideálního OZ“, nebo zda použil model některého komerčního OZ. Až v posledním odstavci na str. 53 je uvedeno, že šlo o model zesilovače CLC440. Podle mne by bylo vhodnější realizovat analýzy nejprve s ideálními OZ, aby byly korektně porovnávány citlivosti ideálních pasivních i aktivních struktur, a až poté provést případné analýzy s uvažováním reálných vlastností aktivních prvků.

V každém případě by bylo žádoucí provést korektní citlivostní analýzu, případně nepřímou citlivostní analýzu prostřednictvím analýzy statistické, a z toho plynoucí srovnání tří různých citlivostí: výchozího příčkového filtru, filtru ARC před optimalizací dynamického rozsahu, a téhož filtru po optimalizaci dynamického rozsahu. Rovněž by bylo užitečné analyzovat vliv normování a tudíž i souvislost mezi navrženými rozptyly parametrů pasivních prvků a citlivostmi. Na str. 60 (čtvrtý řádek shora) k tomu uvádíte pouze nejasnou poznámku.

V části 2.5 provádíte srovnání metody LF s metodou PRB. O metodě PRB se však v úvodním rozboru současného stavu vůbec nezmiňujete.

Odchyly mezi simulovanou a změřenou kmitočtovou charakteristikou na obr. 2.188 by mohly být vysvětleny podrobněji. Jaká je příčina nízkofrekvenčního útlumu cca 70 dB na obr. 2.192 a 2.195?

Vzorec (3.18) na str. 80 je upraven nesprávně a nelze jej redukovat na součet odporu a induktivní reaktance.

Ve vzorci (3.24) na obr. 81 není definována kapacita C . V následujícím vzorci (3.24) jsou smíchány symboly s a p a vztah nelze upravit na zde uváděný konečný tvar.

Celá kapitola 3.2.3 „Využitelnost jednotlivých prvků pro vázané ARC obvody“ vychází z poměrně málo známých technik vázaných pasivních filtrů RLC, u nás rozvíjených na přelomu 80. a 90. let 20. století prof. Hájkem a doc. Sedláčkem. Autor při koncipování této kapitoly vynechává popis vlastní filozofie vázaných obvodů a přechází přímo k popisu výsledků, tj. schémat zapojení pasivních vázaných filtrů. Pro čtenáře tak může být překvapující, že kmitočtové charakteristiky jednotlivých zapojení, která vycházejí z jednoho zadání, se velmi liší. Přitom stačilo vysvětlit, že metoda má smysl pro návrh úzkopásmových filtrů, kde jde především o shodu vlastností v úzkém okolí maxima přenosu. Je rovněž na pováženou, proč autor pokračuje v takto „úsporném“ stylu výkladu, kdy navrhuje na obr. 3.9 ARC ekvivalent vázaného obvodu a kombinuje přitom, aniž by připojil alespoň náznak vysvětlení, zakončovací rezistory s rezistory z náhradního zapojení ztrátových syntetických induktorů. Úvaha, že je možné využít jako alternativní výstup filtru výstup OZ v syntetickém induktoru, je zajímavá, přesto by si příslušné závěry (že jde o „čistou“ pásmovou propust) zasloužily seriózní rozbor a vyjasnění, do jaké míry by příslušná charakteristika korespondovala s charakteristikou, která byla původním cílem návrhu.

Jaký smysl má rezistor R_{mod} ve schématech na obr. 3.9 a 3.45?

Text, který začíná na str. 83 pod obr. 3.10 a končí u obrázků 3.11-3.16, je velmi málo srozumitelný, protože neobsahuje detaily, potřebné k pochopení. To se týká vesměs všech podobných analýz na následujících stranách až po str. 91.

Jak bylo prováděno měření kmitočtových charakteristik realizovaných filtrů v případě, že výstupy měly vysokou impedanci? Jaké jste používal meziobvody pro snímání signálů obvodovým analyzátozem?

Jak jste hlídal tolerance součástek při výrobě ARC vázaných obvodů s vysokými činiteli jakosti?

Čím si vysvětlujete konečné nízkofrekvenční útlumy, změřené u pásmových propustí na obr. 3.74 až 3.77? Prováděl jste jednoduché rozborů reálných vlivů?

Jádrem kapitoly 4 je zjištění, že z řady vybraných bikvadů pouze dva splňují podmínku nezávislého řízení charakteristického kmitočtu a činitele jakosti, a to AM a KHN. Tyto dvě známé struktury jsou pak podrobeny srovnávací analýze. Na podmínku nezávislého řízení f_0 a Q je usuzováno na základě zjednodušení (4.1). Je třeba si ale uvědomit dva aspekty tohoto zjednodušení: 1) ztrátu několika stupňů volnosti při optimalizaci obvodu, 2) realizační problémy spojené se zajišťováním rovností odporů a kapacit, zejména při elektronickém ladění.

V kapitole 4 není uvedeno, odkud pochází 9 zapojení bikvadů, které byly použity k analýzám, a proč byly vybrány zrovna tyto obvody. Copak neexistují další bikvady (kromě AM a KHN), které by umožňovaly nezávislé řízení f_0 a Q ?

V části 4.2 je provedeno srovnávání kmitočtových charakteristik filtrů AM a KHN pro ideální OZ a pro OZ CLC440, bohužel pouze simulacemi v PSpice.

Při použití modelů ideálních OZ a přesných hodnot R a C , které vzešly z návrhu, musí z principu kmitočtové charakteristiky přesně odpovídat ideálním charakteristikám. Z tabulek 4.1 a 4.2 však vyplývají nezanedbatelné odchylky, např. přes 12% pro odečet $Q=1$. To mne vede k závěru, že ve skutečnosti se jedná o chyby, které nemají nic společného s analyzovanými bikvadů, ale zřejmě jde o směs numerických chyb (včetně vlivu konečného kroku při výpočtu kmitočtových charakteristik), chyb způsobených modelováním „ideálního“ OZ (jaký model byl v PSpice zvolen, neuvádíte), a případných chyb při odečítání parametrů f_0 a Q z křivek (jakou metodu jste zvolil pro odečet Q , zejména pro nízké činitele jakosti?).

Protože pro reálný OZ mají chyby v tabulkách 4.3 a 4.4 podobnou tendenci (velké pro nízké Q), je pravděpodobné, že i tato data jsou zatížena toutéž „chybou metody“. Uvažte prosím, zda OZ s tranzitním kmitočtem 750MHz může ovlivnit kmitočtovou charakteristiku filtru s $f_0 = 10$ kHz tak, jak ukazujete v tabulce 4.4.

Otázky pro doktoranda:

Na doktoranda mám následující otázky, na které by mohl reagovat v průběhu obhajoby.

- 1) Vysvětlete princip optimalizace dynamického rozsahu struktur ARC LF. Lze metodu využít i k modifikaci rozptylu R a C ? Jaké jsou důsledky optimalizace pro citlivost filtru?
- 2) Které reálné vlastnosti operačních zesilovačů jsou zodpovědné za problémy filtrů AM se stabilitou? Jakým způsobem je lze kompenzovat?

Závěr:

Závěrem konstatuji, že

- a) Zvolené téma je aktuální.
- b) Cíle disertační práce byly splněny v mnohých ohledech nadstandardním způsobem. Výsledky zde prezentované představují značné množství vysoce odborné práce, kvantitou i kvalitou převyšující obvyklou úroveň běžných disertací.
- c) Zvolené metody zpracování disertace odpovídají běžným zvyklostem, co se týče metodologie i formy.
- d) Disertační práce přináší nové výsledky, vyjmenované na str. 1 tohoto posudku pod body č. 1), 2) a 3).

Výše uvedené připomínky poukazují na dílčí formální a věcné nedostatky, které nesnižují celkovou vědeckou hodnotu disertace. Jsem přesvědčen, že pan Ing. Fröhlich prokázal všechny předpoklady k získání titulu PhD. **Práci proto doporučuji k obhajobě.**

Dalibor Bítel

V Brně dne 8.9.2014

Prof. Ing. Dalibor Bielek, CSc.