



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Užití aktivních filtrů pro zpracování rádiového signálu

Autor práce: Matěj Vaněk
Vedoucí práce: Ing. Jiří Lahoda

Plzeň 2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Matěj VANĚK**
Osobní číslo: **E10B0358P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Užití aktivních filtrů pro zpracování rádiového signálu**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Svou práci zaměřte zejména do oblasti zpracování rádiového signálu.

1. Uveďte základní vlastnosti aktivních filtrů, popište principy jejich funkce a oblasti použití.
2. Zhodnoťte typy aktivních filtrů a diskutujte jejich výhody a nevýhody pro různý způsob využití.
3. Sestavte funkční vzorek zvoleného filtru a ověřte jeho vlastnosti. Své výsledky porovnejte s teoretickými předpoklady.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Lahoda, Ph.D.

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Jiří Lahoda, Ph.D.

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**



L.S.

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan

Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o využití aktivních filtrů pro zpracování vysokofrekvenčních signálů nebo využití v aplikacích související s rádiovým přenosem. Rozebírají se zde druhy aktivních prvků a jejich základní vlastnosti a využití. Dále se tato bakalářská práce snaží ověřit, jestli jednoduchý aktivní filtr s operačním zesilovačem lze použít jako antialiasingový filtr v rádiovém přijímači.

Klíčová slova

Aktivní filtr, rádiový přijímač, softwarevé rádio, homodyn, zesilovač.

Abstract

Vaněk, Matěj. *Using active filters for radio signal processing* [*Užití aktivních filtrů pro zpracování rádiového signálu*]. Pilsen, 2013. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Jiří Lahoda

This Bachelor thesis deals with the use of active filters for radio signal processing or for applications related to wireless transmission. There are analyzed an active elements and their properties and uses in thesis. Furthermore, the thesis seeks to determine if simple active filter with operational amplifier can be used as an antialiasing filter in the radio receiver.

Keywords

Active filter, radio receiver, software radio, homodyn, amplifier.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci 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 závěrečné 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 § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 4. června 2013

Matěj Vaněk

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	v
Seznam tabulek	vi
Seznam symbolů a zkratk	vii
1 Úvod	1
1.1 Problematika použití aktivních filtrů	1
1.1.1 Aktivní filtr dolní propusti pro mobilní aplikace	1
1.2 Realizace aktivního filtru	2
2 Princip funkce aktivních filtrů RC	3
2.1 Náhrada cívky aktivním prvkem	3
2.1.1 Způsob přímé náhrady cívky	3
2.1.2 Nepřímá náhrada cívky	4
3 Aktivní prvky	5
3.1 Operační zesilovače	5
3.1.1 S napěťovou zpětnou vazbou	6
3.1.2 S proudovou zpětnou vazbou	6
3.2 Transimpedanční zesilovače	6
3.3 Transkonduktanční zesilovače	7
3.4 Transformační dvojbrany	7
3.4.1 Impedanční konvertory	7
3.4.2 Impedanční invertory	7
4 Realizace filtru	9
4.1 Parametry aktivního filtru	9
4.2 Vypočtené hodnoty	11
4.3 Simulace frekvenčních charakteristik	11
5 Závěr	13
Reference, použitá literatura	14

Seznam obrázků

1.1	Rekonfigurovatelná struktura mnohonásobného G_m filtru dolní propusti. Převzato z [4]	2
2.1	Obvody a) ARC filtr s OZ, b) ekvivalentní RLC filtr s oddělovacím OZ. Převzato z [2]	4
3.1	Základní typy zapojení filtrů s jedním OZ. Varianta a) dolní propust (DP), b) horní propust (HP), c) a d) pásmové propusti (PP). Převzato z [1].	5
3.2	Symbol transimpedančního zesilovače	6
3.3	Transkonduktanční zesilovač	7
3.4	Obvod simulující syntetický induktor nebo dvojný kapacitor. Převztaho z [1].	8
3.5	Impedanční invertor. Převztaho z [1]	8
4.1	Rádiový přijímač typu homodyn s číslicovým zpracováním dat	9
4.2	Zapojení aktivního filtru s OZ (dolní propust). Převzato a upraveno z literatury [3]	10
4.3	Závislosti přenosu aktivního filtru na frekvenci pro zvolené parametry	12

Seznam tabulek

4.1	Hodnoty jednotlivých prvků obvodu pro různé poměry $\frac{C_2}{C_1}$	11
-----	--	----

Seznam symbolů a zkratek

A_I	Proudové zesílení operačního zesilovače.
A_p	Zesílení přenosové funkce.
A_U	Napětové zesílení operačního zesilovače.
ARC	Struktura aktivní RC filtrů.
A/D	Analogový digitální převodník.
a_1	Koeficient přenosové funkce.
α	Konstanta.
b_1	Koeficient přenosové funkce.
Bluetooth	Standard pro bezdrátovou komunikaci k výměně dat na krátkou vzdálenost.
C	Kapacitor.
C_1	Kapacitor.
C_2	Kapacitor.
C_3	Kapacitor.
CDMA2000	Skupina 3G standardů pro mobilní technologie.
dB	Decibel. Logaritmická jednotka udávající poměr fyzikální veličiny.
D_{EKV}	Ekvivalentní syntetický dvojný kapacitor.
DP	Dolní propust.
E12	Standartizovaná řada rezistorů.
f_{max}	Maximální frekvence.
f_{min}	Minimální frekvence.
F_0	Rezonanční frekvence.
F_T	Tranzitní kmitočet.
F_{dB}	Přenosová funkce přepočítaná na dB.
$F_{j\omega}$	Přenosová funkce.
G	Gyrátor; impedanční invertor.
G_m	Značení transkonduktančního zesilovače.
g_m	Transkonduktance (strmost) transkonduktančního zesilovače.
$G\Omega$	Gigaohm. Násobek základní jednotky měrného odporu.
$G_m - C$	Struktura filtru tvořeného z transkonduktančních zesilovačů a spínaných kapacitorů.
GIC	General impedance converter. Obecný impedanční konvertor.
GSM	Global system for mobile communications. Globální systém pro mobilní komunikaci.
GNU	GNU is Not UNIX. Projekt vytvářející volně šířitelný software.
HP	Horní propust.
j	Imaginární jednotka komplexního čísla.

$K(p)$	Přenosová funkce dvojbranu.
k_g	Gyrační konstanta.
$k\Omega$	Kiloohm. Násobek základní jednotky měrného odporu.
k	Konstanta.
L_{EKV}	Ekvivalentní syntetická indukčnost.
L	Induktor.
MHz	Megahertz. Násobek základní jednotky frekvence.
$M\Omega$	Megaohm. Násobek základní jednotky měrného odporu.
OTA	Operational transconductance amplifier. Transkonduktanční zesilovač.
OZ	Operační zesilovač.
PP	Pásmová propust.
PP_R	Pásmová propust a hlavním prvkem R.
PP_C	Pásmová propust a hlavním prvkem C.
pF	Pikofarad. Základní jednotky kapacity.
Q	Činitel jakosti.
R	Rezistor.
R_1	Rezistor.
R_2	Rezistor.
R_3	Rezistor.
R_{IN}	Vstupní odpor.
R_{OUT}	Výstupní odpor.
RCD	Speciální struktura aktivních RC filtrů se syntetickým prvkem D.
RLC	Klasická rezonanční struktura pasivních filtrů.
S	Rychlost přeběhu.
TIA	Transimpedance amplifier. Transimpedanční zesilovač.
U_1	Vstupní napětí.
U_2	Výstupní napětí.
v_{IN}	Vstupní signál.
v_{OUT}	Výstupní signál.
νf	Vysokofrekvenční.
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access. Širokopásmový vícenásobný přístup s kódovým dělením.
Ω_0	Rezananční úhlová frekvence.
p	Parametr přenosové funkce.
kHz	Kilohertz. Násobek základní jednotky frekvence.
Z	Impedance.
Z_{VST}	Vstupní impedance.
Z_Z	Zatěžovací impedance.
μF	Mikrofarad. Násobek základní jednotky kapacity.
ω	Úhlová frekvence.

Kapitola 1

Úvod

Problematika filtrů pasivních či aktivních je důležitou součástí pro elektronická zařízení v mnoha oblastech. Příklady těchto oblastí mohou být následující; přenos signálu, automatizace, zaznamenávání a zpracování obrazu i zvuku, rádiové systémy a další. V mé bakalářské práci se budu dále zabývat pouze aktivními filtry pro zpracování rádiových, čili vysokofrekvenčních signálů.

1.1 Problematika použití aktivních filtrů

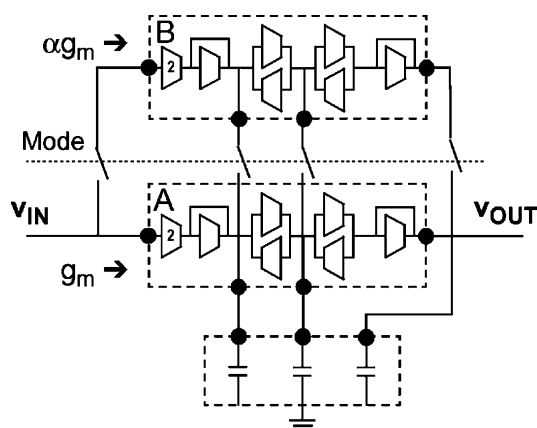
Pokud hodláme zpracovávat vysokofrekvenční signály od jednotek MHz a vyšší pomocí aktivních filtrů, objevuje se zde technologický problém součástek. Nebavíme se nyní o pasivních součástkách jako jsou kondenzátory, rezistory a cívky. Zajímají nás aktivní prvky, které jsou nedílnou součástí aktivních filtrů. Tyto prvky jsou frekvenčně závislé a jejich dobré vlastnosti rychle klesají se zvyšujícím se kmitočtem. Z toho vyplývá, že přímé užití aktivních filtrů je možné maximálně do desítek MHz (v závislosti na technologii). Navíc filtry pro tak vysoké frekvence jsou velice drahé. Z tohoto důvodu se upravuje systém jako celek tam, kde je nutné nebo vyhovující použití aktivních filtrů. Například u softwarového rádia. V aktivních filtrech pro mobilní aplikace lze využít transkonduktanční zesilovače.

1.1.1 Aktivní filtr dolní propusti pro mobilní aplikace

Ve článku [4] se můžete dočíst o využití $G_m - C$ filtru dolní propusti pro mobilní aplikace. Hlavním cílem je poskytnout filtr dolní propusti s plynulým laděním přes velmi široký ladící rozsah frekvencí a vhodný pro přijímač s nulovou mezifrekvenčí. Tímto způsobem lze pokrýt různé komunikační standardy, např. GSM, BlueTooth, CDMA2000 a W-CDMA.

Tento filtr vykazuje nízkou citlivost na změnu teploty a stárnutí, když se přidruží na čip s automatickým ladícím systémem. Nespornou výhodou je plynulé ladění přes široké frekvenční pásmo. Toto pásmo může být rozšířeno realizací spínaných kapacitorů nebo spínáním G_m . Spínání G_m má důležitou výhodu oproti spínaným kapacitorům. Vždy je využita maximální hodnota kapacity pro maximální odstup signál šum.

Na obrázku 1.1 můžete vidět mnohonásobnou G_m konfigurovatelnou strukturu dovolující významný nárůst poměru $\frac{f_{max}}{f_{min}}$. V našem případě dvě transkonduktanční buňky jsou paralelně spojeny do jednoho integrovatelného bloku, tak aby efektivní transkonduktanční hodnota byla součtem jednotlivých buněk. Uvnitř jedné buňky mají všechny



Obrázek 1.1: Rekonfigurovatelná struktura mnohonásobného G_m filtru dolní propusti.
Převzato z [4]

transkonduktanční zesilovače stejnou hodnotu g_m .

Více podrobností se dozvíte s příslušného článku [4]. Mohu jen dodat, že tento druh analogové filtrace v základním pásmu se povoluje v mnoha standardech mobilních komunikačních systémech.

1.2 Realizace aktivního filtru

Rozhodl jsem se ověřit parametry jednoduchého aktivního filtru s operačním zesilovačem. Tento filtr bude tvořit mezifrekvenční stupeň v rádiovém přijímači typu homodyn (obr. 4.1). Dále se informace bude zpracovávat číslicově. Ve své podstatě se jedná o antialiasingový filtr (dolní propust), který propouští jen zvolenou šířku pásma v přeloženém základním spektru.

Použil jsem zapojení z učebnice [3]. Vybral jsem si aktivní filtr 2. řádu s jedním operačním zesilovačem a s vícenásobnou zápornou zpětnou vazbou (obr. 4.2). Díky silné záporné vazbě se znatelně neovlivňují vlastnosti filtru. Za prvé budu muset určit teoretické parametry pro co možná největší propustné pásmo. Dále daný filtr realizovat jako model a naměřit příslušné frekvenční charakteristiky. Tyto charakteristiky by sloužily jako podklad pro případnou změnu návrhu filtru nebo k budoucímu sestavení celého rádiového přijímače.

Kapitola 2

Princip funkce aktivních filtrů RC

2.1 Náhrada cívky aktivním prvkem

Aktivní filtry vznikly pro zlepšení vlastností z RLC filtrů pro nízké kmitočty. U klasických RLC filtrů je největší problém s kvalitou, rozměry a cenou cívek. Proto se nahrazují filtry ARC, kde cívku nahrazuje specifické zapojení aktivního prvku (operační zesilovač, tranzistor, atd.). Náhrada cívky se koná zásadně dvěma způsoby. První způsob je nahradit cívku přímo jako dvojpól, který vykazuje mezi svými svorkami příslušnou indukčnost. Druhým způsobem je nahradit cívku nepřímou, pomocí transformace výchozího RLC obvodu na ekvivalentní se chovající strukturu RCD, která indukční prvek neobsahuje, ale vyžaduje syntetický prvek D (dvojný kapacitor, což je kmitočtově závislý negativní rezistor).

2.1.1 Způsob přímé náhrady cívky

Nejčastější pohled na přímou náhradu indukčnosti RLC filtru je takový, kdy se vytváří celý obvod ARC filtru stejného řádu jako RLC filtru. Z literatury [1] si můžeme ukázat příklad filtru ARC 2. řádu typu dolní propusti, známý jako obvod Sallena a Keye. Obvod s OZ, dvěma rezistory a dvěma kapacitami má přenosovou funkci ve tvaru

$$K(p) = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{p^2 + \frac{p(R_1 + R_2)}{C_2 R_1 R_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} = \frac{\Omega_0^2}{p^2 + \frac{p\Omega_0}{Q} + \Omega_0^2}. \quad (2.1)$$

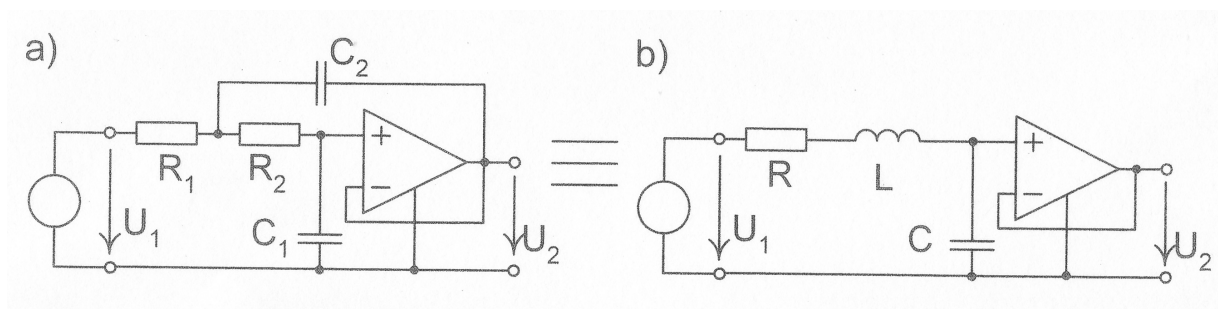
Hodnoty činitele jakosti Q a rezonančního kmitočtu F_0 lze vyjádřit vztahy

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}, \quad (2.2)$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{R_1 + R_2} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \Big|_{R_1=R_2}. \quad (2.3)$$

Hodnoty rezistorů se často rovnají. Přenosová funkce je ekvivalentní s klasickým obvodem RLC (Obr. 2.1).

Operační zesilovač na obrázku funguje jako simulovaná indukčnost a také jako oddělovací zesilovač. Tím je dosaženo malého výstupního odporu a přenosová funkce není závislá na impedanci zátěže. Díky takto impedančně oddělenému výstupu lze vytvářet jednoduché kaskádní spojování filtrů.



Obrázek 2.1: Obvody a) ARC filtr s OZ, b) ekvivalentní RLC filtr s oddělovacím OZ. Převzato z [2]

Cívku můžeme také simulovat složitějším dvojpólem, který obsahuje více aktivních i pasivních prvků. Vždy obvod na vstupních svorkách vykazuje induktivní reaktanci. Takto dosáhneme velké hodnoty simulované indukčnosti. Takto vytvořený syntetický induktor se dělí podle dvou hledisek, ztrátovosti a vztahu ke společnému (zemnímu) uzlu. Ztrátové obvodu patří mezi jednodušší. U složitějších obvodů dosahujeme takřka ideálních beze-ztrátových syntetických induktorů.

2.1.2 Nepřímá náhrada cívky

Pro nepřímou náhradu cívky se používá Brutonova transformace. Základní úvahou je to, že napěťový přenos je dán poměrem impedancí jednotlivých prvků obvodu. Násobení stejným koeficientem všech impedancí se přenos nezmění. Mění se pouze funkce jednotlivých prvků. Struktura rezonančních prvků skládající se z kapacitoru a induktoru se změní na nové, rezistor a dvojný kapacitor. Jako dvojný kapacitor uvažujeme frekvenčně závislý záporný rezistor. Díky tomu se mění pouze impedanční vlastnosti obvodu, ale nikoli napěťový přenos. Více se dočtete v literatuře [1].

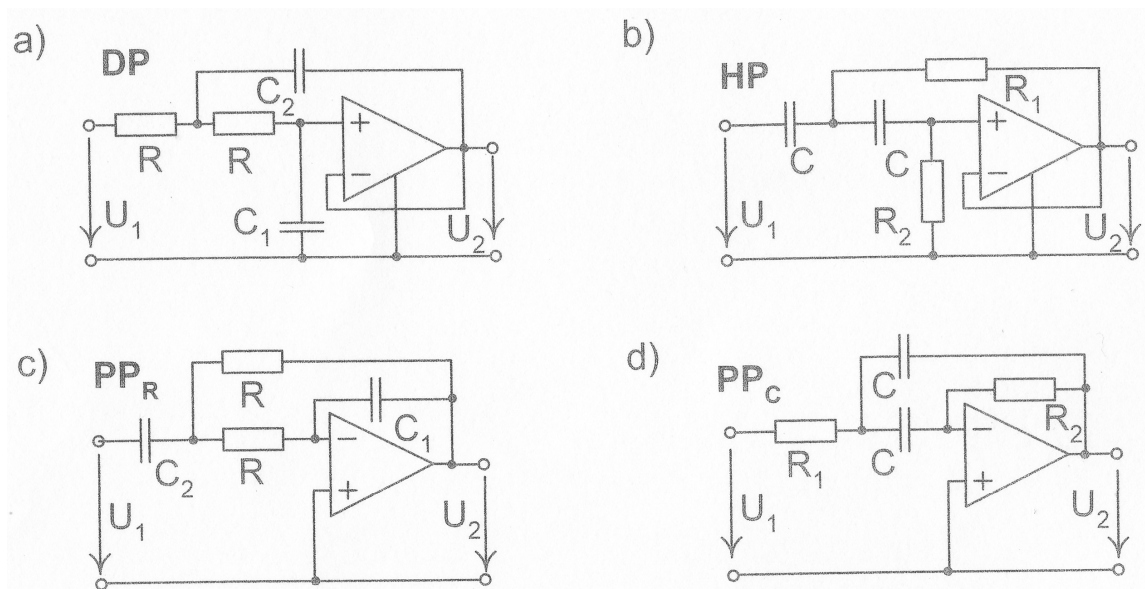
Kapitola 3

Aktivní prvky

Pro navrhování aktivních filtrů je důležité znát druhy a vlastnosti aktivních prvků, které jsou nejdůležitější součástí celého filtru. Dále jsou popsány nejpoužívanější aktivní prvky použitelné zpracování signálu až do desítek či stovek MHz.

3.1 Operační zesilovače

Základní a pravděpodobně nejjednodušší prvek použitelný v aktivních filtrech je operační zesilovač (OZ). Historicky nejstarší operační zesilovače jsou s napětovou zpětnou vazbou. Jelikož tyto typy zesilovačů mají poměrně malý mezní kmitočet a nejsou tak vhodné pro kmitočty zpravidla nad 1 MHz. Vynalezli se nové typy operačních zesilovačů s proudovou zpětnou vazbou, které jsou mnohem vhodnější do oblasti vyšších kmitočetů.



Obrázek 3.1: Základní typy zapojení filtrů s jedním OZ. Varianta a) dolní propust (DP), b) horní propust (HP), c) a d) pásmové propusti (PP). Převzato z [1].

Na obrázku 3.1 můžete vidět základní typy filtrů s jedním operačním zesilovačem. Použití jednoduchého aktivního filtru s operačním zesilovačem pro konkrétní aplikaci uvidíte v kapitole 4.

3.1.1 S napěťovou zpětnou vazbou

Jak už bylo řečeno, operační zesilovače s napěťovou zpětnou vazbou mají oblast pracovních kmitočtů do 1 MHz. Přesto jsou velmi často používány hlavně pro běžné aplikace. Jejich nespornou výhodou je snadná dostupnost a nízká cena.

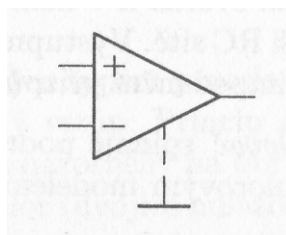
Při realizaci takového filtru je důležité dbát na parametry operačního zesilovače především při použití ve vyšších kmitočtech. Neboť tyto parametry se mohou měnit s frekvencí, teplotou a časem. Příkladem parametrů jsou napěťové zesílení (A_U), tranzitní kmitočet (F_T), rychlost přeběhu (S). Další parametry jako vstupní a výstupní odpor (R_{IN}, R_{OUT}), vstupní napěťový a proudový offset, drift můžeme většinou zanedbat, neboť vliv na vlastnosti filtru není až tak podstatný, nebo se projevuje především ve stejnosměrné oblasti. Je důležité si uvědomit, že u operačních zesilovačů s vysokým tranzitním kmitočtem musí být patřičná rychlost přeběhu. Tyto parametry mají přímou úměrnost.

3.1.2 S proudovou zpětnou vazbou

Jelikož běžné operační zesilovače s napěťovou zpětnou vazbou nestačí pro zpracování signálu nad 1 MHz, vymysleli se zesilovače s proudovou zpětnou vazbou. Neliší se moc od klasických zesilovačů s napěťovou zpětnou vazbou, ale jejich závislost na frekvenci je mnohonásobně lepší než u klasických operačních zesilovačů. Jejich mezní kmitočet se udává ve stovkách MHz. Dále mají vysoké proudové zesílení (A_I). Tyto zesilovače lze charakterizovat jako proudem řízené zdroje proudu.

Zajímavou variantou operačních zesilovačů s proudovou zpětnou vazbou je transimpedanční zesilovač (TIA).

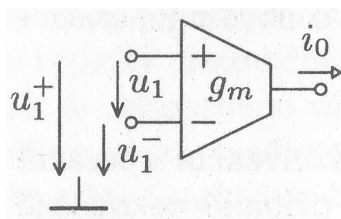
3.2 Transimpedanční zesilovače



Obrázek 3.2: Symbol transimpedančního zesilovače

Vznik transimpedančních zesilovačů byl hlavně pro rychlé analogové obvody. Díky jejich struktuře, která je řešena v proudovém módu, můžeme dosáhnout vysokého tranzitního kmitočtu a rychlosti přeběhu. Od operačních zesilovačů se liší charakterem vstupních svorek. Neinvertující svorka je napěťová a invertující svorka je proudová. Zesilovač tedy pracuje ve smíšeném módu. Prodrobnější popis funkce najdete v [2].

Důležité je zmínit jejich výhody spočívající v dobrých kmitočtových vlastnostech a možnosti zavedení zpětné proudové vazby. Díky této vazbě můžeme vylepšit vlastnosti zesilovače a rozšířit pracovní kmitočtové pásmo.



Obrázek 3.3: Transkonduktanční zesilovač

3.3 Transkonduktanční zesilovače

Dalším typem aktivního prvku jsou transkonduktanční zesilovače (OTA) také vhodné pro použití ve vyšších kmitočtových oblastech. Zesilovače lze charakterizovat jako ideální zdroj proudu řízené napětím. Kmitočtová závislost transkonduktance (strmosti) g_m je lepší než kmitočtová závislost zesílení běžných operačních zesilovačů. Pracovní kmitočtová oblast se pohybuje od stovek kHz až do jednotek MHz. U speciálních konstrukcí zesilovačů se pohybujeme do oblasti až 100 MHz. Vzhledem ke struktuře transkonduktančního zesilovače má jeho proudový výstup odporovou i kapacitní složku. Vstup zesilovače má kapacitní charakter. Na to je důležité myslet u návrhu aktivního filtru. Transkonduktanční zesilovač mění vstupní diferenční napětí na diferenční výstupní proud. Ten je zpracován proudovými zrcadly na výstup zesilovače.

3.4 Transformační dvojbrany

Využití transformačních vlastností dvojbranů lze změnit hodnotu impedance Z prvku připojeného na vstup dvojbranu. Tedy podle určitého vztahu dvojbran transformuje zatěžovací impedanci. Typickými transformačními dvojbrany jsou impedanční konvertor (GIC) a impedanční invertor (gyrátor).

3.4.1 Impedanční konvertory

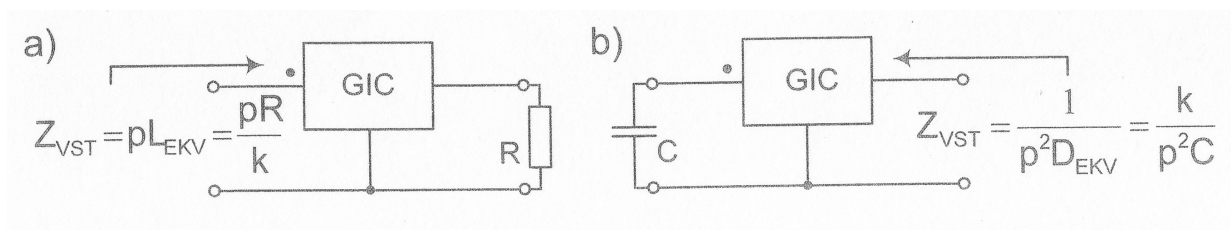
Tento obvod přímo realizuje Brutonovu transformaci (z jedné strany násobí nebo z druhé dělí zatěžovací impedanci kmitočtem a konstantou podle

$$Z_T = Z \frac{k_T}{p} \quad (3.1)$$

Rovnice je převzata z [1]. Dvojbran je z hlediska vstupů nesymetrický a umožňuje přímou simulaci uzemněných syntetických induktorů a dvojných kapacitorů podle obrázku 3.4. Pokud k výstupním svorkám připojíme rezistor, na vstupu bude mít impedance indukční charakter (obr. 3.4a). Pokud na vstupní svorky připojíme kapacitor, tak na výstupních svorkách budeme simulovat dvojný kapacitor, neboli frekvenčně závislý záporný rezistor (obr. 3.4b).

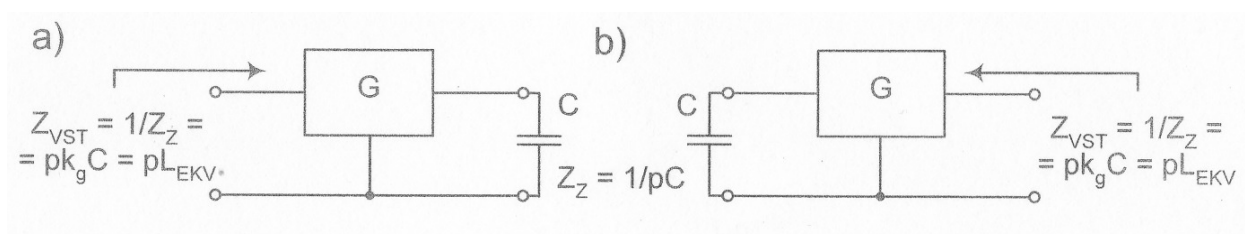
3.4.2 Impedanční invertory

Další méně používaný transformační dvojbran je impedanční invertor. Provádí inverzi hodnoty zatěžovací impedance a násobí je tzv. gyační konstantou k_g . Simulaci induktoru se provádí převrácením hodnoty zatěžovací impedance (kapacitoru). V dnešní době se



Obrázek 3.4: Obvod simulující syntetický induktor nebo dvojný kapacitor. Převztaho z [1].

gyrátor realizuje pomocí GIC nebo pomocí zdrojů proudu řízených napětím (využíváno v integrovaných realizacích). Důležité je upozornit, že impedanční inverze mění i konfiguraci obvodu (paralelní prvky na sériové a naopak).

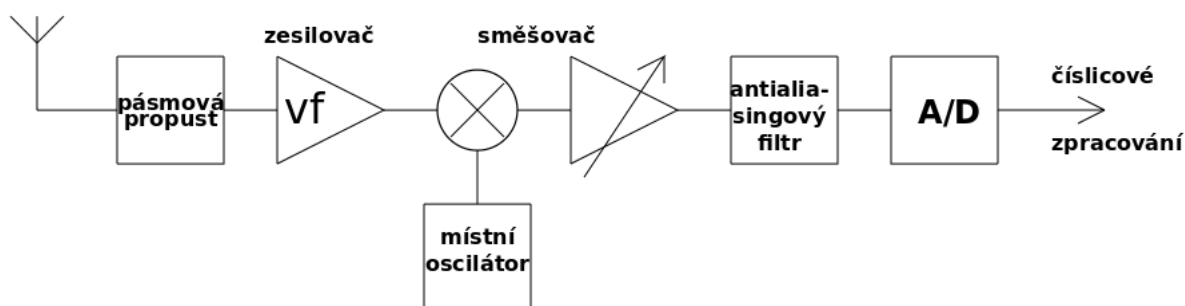


Obrázek 3.5: Impedanční invertor. Převztaho z [1]

Kapitola 4

Realizace filtru

V této kapitole se hodlám věnovat samotné realizaci aktivního filtru pro výběr mezifrekvenčního pásma pro další číslicové zpracování. Na obrázku 4.1 vidíte obecné blokové schéma homodynu. Jelikož směšovač přenesse vstupní signál do základního frekvenčního pásma, aktivní filtr zde funguje jako antialiasingový a vybírá pouze požadovanou oblast pro číslicové zpracování.



Obrázek 4.1: Rádiový přijímač typu homodynu s číslicovým zpracováním dat

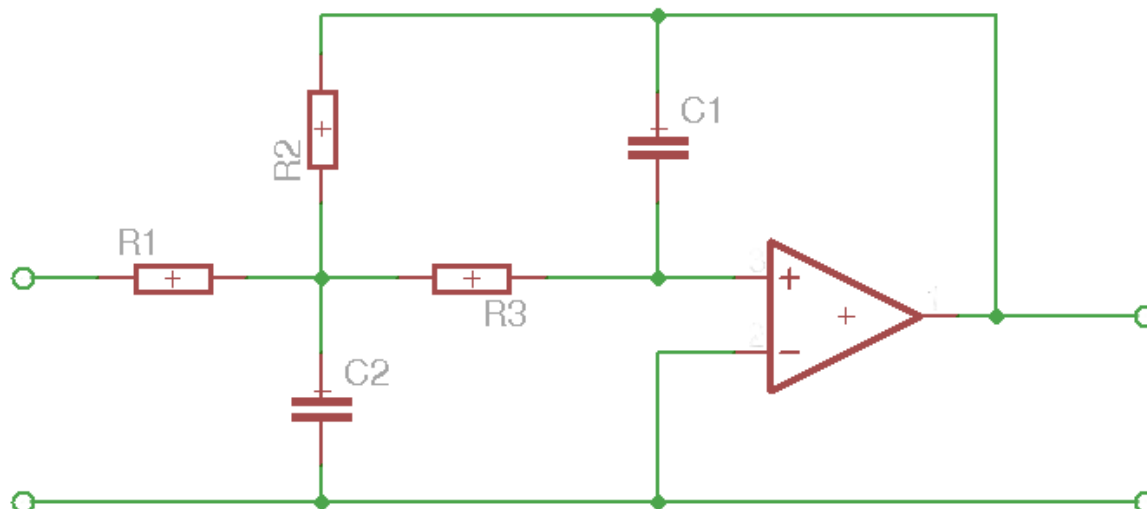
Požadavky na antialiasingový filtr jsou následující: potlačení všech rušivých nežádoucích signálů, mezní frekvence filtru dostatečně velká pro přenos nezkresleného užitečného signálu a zvlnění propustného pásma maximálně 3 dB.

Z hlediska jednoduchosti byl zvolen aktivní filtr 2. řádu typu dolní propust s jedním operačním zesilovačem a s vícenásobnou zápornou zpětnou vazbou. Aktivní filtr byl vybrán z učebnice [3]. Je to velmi jednoduchý typ zapojení dostačující pro nízké frekvence (s případnou frekvenční korekcí operačního zesilovače). Zapojení dolní propusti můžete vidět na obrázku 4.2.

4.1 Parametry aktivního filtru

Důležitým prvním krokem je určení parametrů samotného filtru pro případnou simulaci frekvenčních charakteristik. Prvně musím znát přenosovou funkci filtru (převzata z učebnice [3]).

$$F(j\omega) = -\frac{\frac{R_2}{R_1}}{1 + j\omega C_1 \left(R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1} \right) + (j\omega)^2 C_1 C_2 R_2 R_3} \quad (4.1)$$



Obrázek 4.2: Zapojení aktivního filtru s OZ (dolní propust). Převzato a upraveno z literatury [3]

Jednotlivé koeficienty přenosové funkce se dají vyjádřit tímto způsobem

$$a_1 = C_1 \left(R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1} \right), \quad (4.2)$$

$$b_2 = C_1 C_2 R_2 R_3, \quad (4.3)$$

$$A_p = \frac{R_2}{R_1}. \quad (4.4)$$

Vzhledem k požadavku na potlačení všech rušivých signálů je vhodné mít co nejvíce strmý přechod z propustného pásma do přechodného. Z tohoto důvodu se použije Čebyševova aproximace, která nám také zajistí konstantní zvlnění propustného pásma ne větší než 3 dB. Z učebnice [3] (tab. 8.1 Koeficienty pro některé typické aproximace) se dočteme, že pro aktivní filtr 2. řádu s Čebyševovou aproximací jsou koeficienty

$$a_1 = 1,3022, \quad (4.5)$$

$$b_1 = 1,5515. \quad (4.6)$$

Zesílení přenosu si zvolíme. Hodnota zesílení je

$$A_p = 100. \quad (4.7)$$

Díky těmto informacím lze odvodit vzorce pro hodnoty jednotlivých součástí filtru

$$R_1 = \frac{R_2}{A_p}, \quad (4.8)$$

$$R_2 = \frac{a_1 C_2 - \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4C_2 C_1 b_1 (1 - A_p)}}{2C_2 C_1}, \quad (4.9)$$

$$R_3 = \frac{b_1}{R_2 C_2 C_1}. \quad (4.10)$$

Hodnoty součástek C_1 a C_2 se volí v poměru

$$\frac{C_2}{C_1} \geq \frac{4b_1(1 - A_p)}{a_1^2}. \quad (4.11)$$

4.2 Vypočtené hodnoty

Pro simulovaný výpočet frekvenčních charakteristik je nutné znát hodnoty prvků obvodu podle tabulky 4.1. Všechny výpočty se provedli jednoduchým dosazením do vzorečků nahoře. Hodnoty C_1 a C_2 se volily pro dané poměry v tabulce 4.1. Pro sestavení modelu aktivního filtru je nutné nejdříve hodnoty zaokrouhlit podle standartizované řady rezistorů E12. V případě velkých hodnot od desítek $M\Omega$ se spojí sériově více menších hodnot rezistorů rezistorů.

poměr [-]	C_1 [pF]	C_2 [μ F]	R_1 [k Ω]	R_2 [M Ω]	R_3 [G Ω]
500000:1	4,4	2,2	345,55	34,55	4,64
1000000:1	3,3	3,3	345,55	34,56	9,28
1500000:1	2,2	3,3	230,37	23,04	9,28
2000000:1	2,2	1	172,78	17,28	9,28

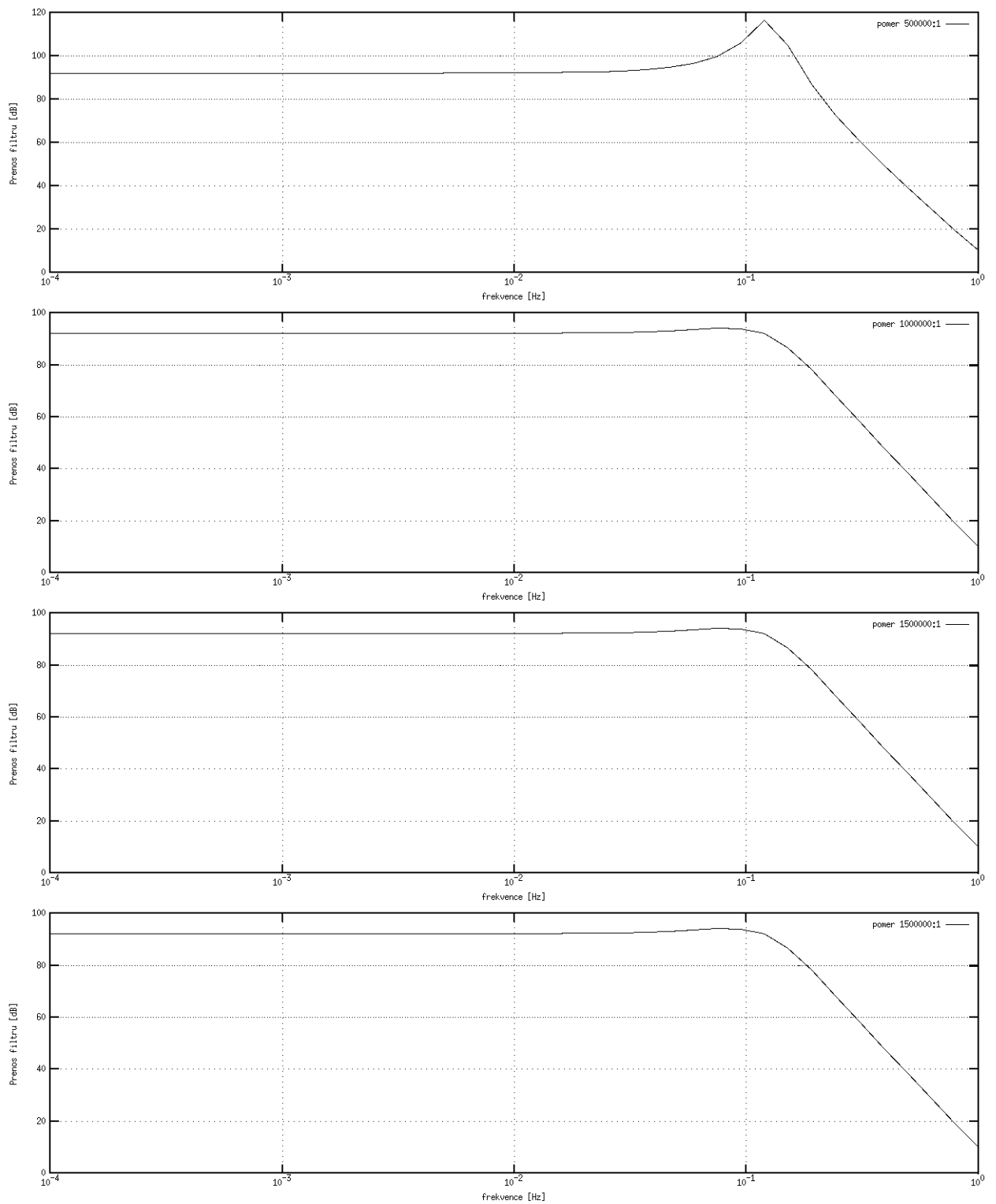
Tabulka 4.1: Hodnoty jednotlivých prvků obvodu pro různé poměry $\frac{C_2}{C_1}$

4.3 Simulace frekvenčních charakteristik

Samotný výpočet závislosti přenosu na frekvenci vyplývá z přenosové funkce 4.1. Tato funkce se převede na decibely podle vztahu

$$\begin{aligned} F_{dB} &= 20 \log(|F(j\omega)|) = \\ &= 20 \log \left(\left| -\frac{\frac{R_2}{R_1}}{1 + j\omega C_1 \left(R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1} \right) + (j\omega)^2 C_1 C_2 R_2 R_3} \right| \right) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Výsledné frekvenční závislosti (obr. 4.3) byly vytvořeny ve volně šiřitelné verzi GNU Octave.



Obrázek 4.3: Závislosti přenosu aktivního filtru na frekvenci pro zvolené parametry

Kapitola 5

Závěr

Výpočet frekvenční závislosti přenosu aktivního filtru s operačním zesilovačem dokazuje, že takový typ filtru 2. řádu není vhodný pro blok mezifrekvenčního filtru v rádiovém přijímači. Z grafů 4.3 je patrné velmi malé propustné pásmo. Z tabulky 4.1 také vyčteme nevhodné hodnoty jednotlivých prvků obvodu.

poměr [-]	C_1 [pF]	C_2 [μF]	R_1 [kΩ]	R_2 [MΩ]	R_3 [GΩ]
500000:1	4,4	2,2	345,55	34,55	4,64
1000000:1	3,3	3,3	345,55	34,56	9,28
1500000:1	2,2	3,3	230,37	23,04	9,28
2000000:1	2,2	1	172,78	17,28	9,28

Z tohoto důvodu se nekonala praktická realizace a reálné naměření frekvenčních závislostí.

V kapitole 3 je shrnuto několik variant aktivních prvků, které jsou nejdůležitějším prvkem aktivních filtrů. Jak bylo řečeno z vypočtených hodnot je patrné, že klasický napěťový operační zesilovač není vhodný jako antialiasingový filtr v rádiovém přijímači. Zejména není vhodný jako širokopásmový filtr.

Najdou se mnohem příhodnější aktivní prvky a jejich použití v příslušném obvodu n-tého řádu. Například transimpedanční zesilovače, transkonduktanční zesilovače a transformační dvojbrany. Tyto prvky mají lepší frekvenční závislost a vlastnosti, ale jsou složitější a dražší.

Při porovnání stanovených cílů bakalářské práce, které měly být dosaženy a jsou uvedeny v zadání, s výsledky bakalářské práce musím konstatovat, že jsem splnil pouze první dva. Uvedl jsem základní vlastnosti, funkci aktivních filtrů a jednotlivé typy podle použitého aktivního prvku. Třetí bod, samotné sestavení a naměření aktivního filtru jsem provedl pouze pomocí výpočtů, abych získal teoretické hodnoty a předpoklady pro případné porovnání se skutečnými naměřenými hodnotami.

Literatura

- [1] Hájek, Karel, Sedláček, Jiří. *Kmitočtové filtry*. Praha: Nakladatelství BEN - technická literatura, 2002 1. vydání. ISBN 80-7300-023-7
- [2] Pravoslav, Martínek, Boreš, Petr, Hospodka, Jiří. *Elektrické filtry*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003.
- [3] Pinker, Jiří, Koucký Václav. *Analogové elektronické systémy, 2. část* Vydavatelství Západočeská univerzita v Plzni, 2010 4. vydání.
- [4] Chamla, David, Kaiser, Andreas, Cathelin, Andreia, Belot, Didier. *A Gm-C Low-pass Filter for Zero-IF Mobile Applications With a Very Wide Tuning Range*. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 40, no. 7, July 2005