

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH A REALIZACE SYMETRICKÝCH PŘEVODNÍKŮ U/I A I/U

DESIGN AND REALIZATION OF V/I AND I/V SYMMETRICAL CONVERTERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

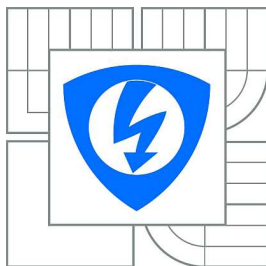
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB CHRÁST

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JAN JEŘÁBEK

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Jakub Chrást
Ročník: 2

ID: 78532
Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a realizace symetrických převodníků U/I a I/U

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku převodníků napětí na proud a proud na napětí pro účely měření kmitočtových filtrů v proudovém módu. V rámci diplomové práce navrhnete možná variantní řešení plně diferenčních převodníků s různými integrovanými obvody dostupnými na trhu. Vlastnosti převodníků ověřte prostřednictvím simulace s dostupnými modely použitých prvků v OrCadu. Vybraná řešení zkonstruuje a vlastnosti ověřte měřením.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Hanspeter Schmid: Single-Amplifier Biquadratic MOSFET-C Filters, Dissertation ETH Zürich, Konstanz, Series in Signal and Information Processing, Vol. 1, ISBN 3-89649-616-6, ISSN 1616-671X, 2000.
- [2] Jeřábek J., Vrba K. Převodníky U/I a I/U s proudovými konvejory pro měření obvodu v proudovém módu. In Research in Telecommunication Technology 2006. Research in Telecommunication Technology 2006. Brno: FEKT UTKO, 2006. s. 125-128. ISBN: 80-214-3243-8.

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 26.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jan Jeřábek

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku c.40/2009 Sb.

Anotace

Diplomová práce pojednává o návrhu symetrických převodníků napětí na proud a proud na napětí. Tyto převodníky slouží pro měření kmitočtových charakteristik diferenčních filtrů v proudovém módu, protože k dispozici nejsou měřicí přístroje s proudovým buzením. Cílem práce je, aby navržené převodníky co nejméně ovlivňovaly měřenou charakteristiku diferenčního kmitočtového filtru. Jako aktivní prvek byl zvolen CFA, tedy operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou. Byla vytipována některá zapojení vhodná pro plnění těchto funkcí. Do vybraných zapojení byly vkládány různé integrované obvody typu CFA. Dle simulací v programu Orcad byly vybrány nejvhodnější varianty. Jedna z těchto variant byla prakticky zkonstruována a byla provedena kontrolní měření pro ověření funkčnosti.

Klíčová slova: převodník, napětí, proud, symetrie, proudový mód, operační zesilovač

Abstract

Master's thesis deals about design of symmetrical converters voltage on current and current on voltage. These converters will be used for measuring frequency characteristics of differential frequency filters. Current feedback amplifier was used as active element. Some circuits useful for this function were chosen. Various integrated circuits were put into these circuits. All variations were simulated in computer program Orcad. In terms of computer simulations the best variation was chosen. Selected variants were practically verified and control measuring were realized.

Keywords: converter, voltage, current, symmetry, current mode, operational amplifier

CHRÁST, J. *Návrh a realizace symetrických převodníků U/I a I/U* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Jeřábek.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Návrh a realizace symetrických převodníků U/I a I/U jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Janu Jeřábkoví za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	- 9 -
1 Převodníky U/I a I/U	- 10 -
1.1 Obecný popis	- 10 -
1.2 Obecné přenosové funkce	- 10 -
1.3 Použití převodníků	- 10 -
2 Dělení převodníků	- 11 -
2.1 Dělení převodníků podle použitých prvků	- 11 -
2.1.1 Pasivní převodníky	- 11 -
2.1.2 Aktivní převodníky	- 12 -
2.2 Další dělení převodníků	- 12 -
2.2.1 Nesymetrické vedení	- 13 -
2.2.2 Symetrické vedení	- 13 -
3 Měření kmitočtových filtrů v proudovém módu	- 15 -
3.1 Proudový mód	- 15 -
3.2 Měření nesymetrických kmitočtových filtrů	- 15 -
3.3 Symetrické (diferenční) kmitočtové filtry	- 16 -
3.4 Měření diferenčních kmitočtových filtrů v proudovém módu	- 16 -
4 Struktury jednotlivých segmentů převodníků	- 18 -
4.1 Symetrické převodníky U/I	- 18 -
4.1.1 Převod jednoduchého napětí na symetrické	- 18 -
4.1.2 Převod symetrických napětí na proudy	- 19 -
4.2 Symetrické převodníky I/U	- 20 -
5 Použité integrované obvody	- 22 -
5.1 CFA (Current feedback amplifier)	- 22 -
5.1.1 OPA694 (Wideband, Low-power Current Feedback Operational Amplifier)	- 22 -
5.1.2 AD8011 (Current Feedback Amplifier)	- 22 -
5.1.3 EL5167 (Current feedback amplifier)	- 22 -
5.1.4 AD8002 (Current Feedback Amplifier)	- 23 -
5.1.5 AD8001 (Current feedback amplifier)	- 23 -
5.1.6 OPA861 (Operational Transconductance Amplifier)	- 23 -
6 Simulace převodníků	- 24 -
6.1 Simulace symetrických převodníků U/I	- 24 -
6.1.1 Simulace převodníků jednoduchého napětí na symetrické	- 24 -

6.1.2	Simulace jednoduchého převodníku napětí na proud	- 29 -
6.2	Simulace symetrických převodníků I/U	- 30 -
6.2.1	Simulace převodníku symetrických proudů na jednoduché napětí.....	- 30 -
6.3	Simulace kompletního symetrického převodníku U/I a I/U	- 34 -
7	Praktická realizace	- 37 -
7.1	Realizace symetrického převodníku U / Idif	- 37 -
7.1.1	Realizace převodníku jednoduchého napětí na symetrické.....	- 37 -
7.2	Realizace převodníku napětí na proud	- 39 -
7.3	Realizace symetrického převodníku Idif / U	- 39 -
7.4	Měření sériového zapojení U / Idif a Idif / U	- 40 -
Závěr		- 42 -
Použitá literatura		- 44 -
Seznam použitých veličin, symbolů a zkratk		- 46 -
Seznam příloh		- 47 -
Příloha 1.....		- 48 -
Příloha 2.....		- 50 -

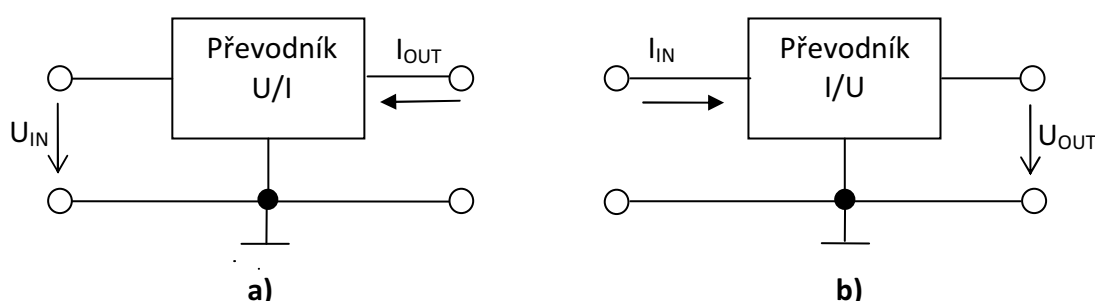
Úvod

V dnešní době se čím dál častěji setkáváme s obvody pracujícími v proudovém módu, protože tento mód poskytuje oproti napětovému mnoho výhod. Nejčastěji se proudový mód využívá u kmitočtových filtrů, kde můžeme jeho výhod velmi využít. Protože na trhu se neobjevují měřicí přístroje s proudovým buzením, budu se v této práci zabývat návrhem převodníků napětí na proud a proud na napětí určených právě k měření kmitočtových filtrů v proudovém módu. Tyto převodníky budou specifické, protože budou určeny k měření diferenčních kmitočtových filtrů. Jako aktivní prvek těchto převodníků poslouží zejména operační zesilovač. Z dostupné literatury budou vybrány obvody, které budou upraveny tak, aby co nejlépe plnily požadovanou funkci. V úvodních dvou kapitolách jsou obsaženy obecné informace o převodnících a jejich dělení. Následující kapitola popisuje měření obvodů v proudovém módu. Čtvrtá kapitola se zabývá konkrétními zapojeními převodníků. V další kapitole jsou vypsány a podrobně popsány integrované obvody použité při simulacích. Kapitola šestá obsahuje výsledky všech provedených simulací. Na závěr práce je popsána praktická konstrukce vybraných zapojení včetně všech provedených měření.

1 Převodníky U/I a I/U

1.1 Obecný popis

V technické praxi mohou nastat případy, kdy potřebujeme převést proud na napětí nebo napětí na proud. Tyto převodníky jsou tedy elektrické obvody, které, jak už jejich názvy vypovídají, převádějí proud na napětí a napětí na proud (obr. 1.1). Ohmův zákon říká, že napětí a proud jsou neoddělitelné. Jde tedy jen o to, která z těchto veličin je nositelem informace. Převodníky mění nositele informace u přenášeného signálu mezi těmito dvěma veličinami [1, 2].



Obr. 1.1 . Jednoduché blokové schéma a) převodník U/I , b) převodník I/U

1.2 Obecné přenosové funkce

Převodník napětí na proud má přenosovou funkci

$$K = \frac{U_{OUT}}{I_{IN}}. \quad (1.1)$$

Převodník proudu na napětí má přenosovou funkci

$$K = \frac{I_{OUT}}{U_{IN}}. \quad (1.2)$$

1.3 Použití převodníků

V elektronice se více používá jako nositel informace napětí, a proto většina zařízení má napěťové vstupy a výstupy, pracují v napěťovém módu. Avšak některé signály jsou reprezentovány proudem. Z toho vyplývá potřeba mít obvody a zařízení, která proud dokážou zpracovat nebo převést na napětí. Typickou situací je měření proudu u zařízení, která mají napěťové vstupy nebo měření napětí u obvodu s proudovými výstupy [1, 2].

2 Dělení převodníků

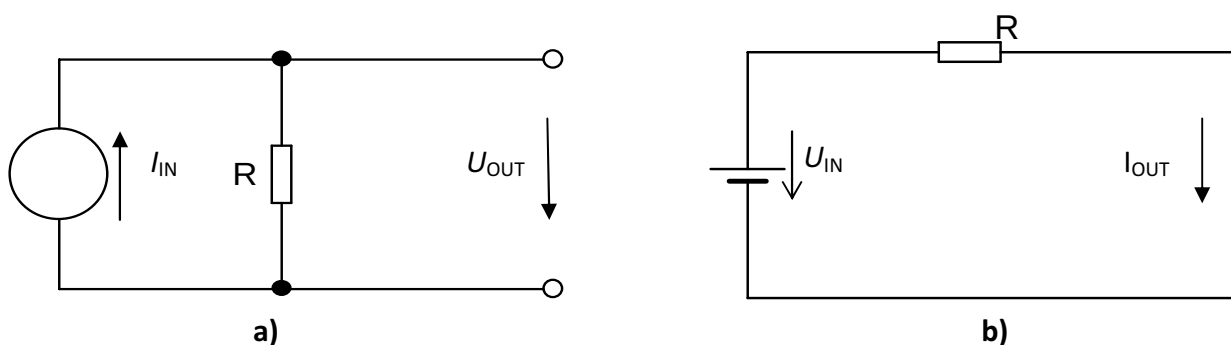
2.1 Dělení převodníků podle použitých prvků

Podle použitých prvků dělíme převodníky na:

- Pasivní – obsahují pouze pasivní prvek (rezistor R)
- Aktivní – obsahují jeden nebo více prvků aktivních

2.1.1 Pasivní převodníky

Pasivní převodníky (obr. 2.1) jsou velmi jednoduché a obsahují pouze pasivní prvky, ty nejjednodušší pouze rezistor. Pasivní převodník proud na napětí se používá jako výstupní část proudového zdroje, výstupní část kombinovaného voltmetru, vstupní část invertujícího operačního zesilovače nebo také v jednoduchých obvodech jako je integrátor nebo derivátor. Pasivní převodník napětí na proud můžeme na druhou stranu použít jako výstupní část napěťového zdroje, kde vstupní část bude zdroj proudový. Další využití je jako vstupní část kombinovaného ampérmetru. U moderních multimetrů jsou použity pro měření velkých proudů. Velkou výhodou těchto zapojení je nepochybně jejich jednoduchost. Tyto pasivní obvody mají ovšem i velké nevýhody. Jednou z nevýhod je, že jejich vlastnosti jsou ovlivňovány druhem obvodu, který k nim připojíme. To je způsobeno velikostí vstupní impedance toho připojeného obvodu, která ovlivňuje chování převodníku [1, 2].



Obr. 2.1 a) Nejjednodušší převodník I/U, b) nejjednodušší převodník U/I

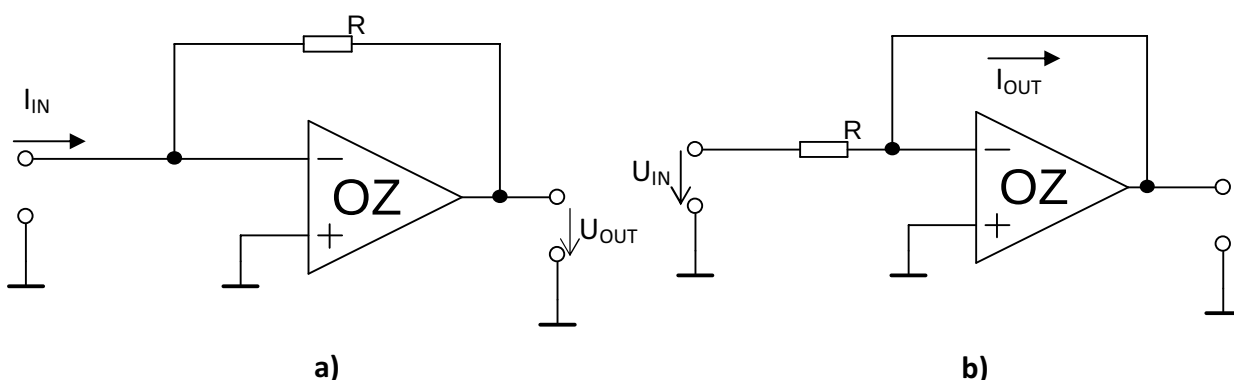
Pro pasivní převodníky platí

$$U_{OUT} = I_{IN} R, \quad (2.1)$$

$$I_{OUT} = \frac{U_{IN}}{R}. \quad (2.2)$$

2.1.2 Aktivní převodníky

Protože pro většinu použití jsou vlastnosti pasivních převodníků nedostačující, používáme převodníky aktivní. Tyto převodníky obsahují pasivní prvky (rezistor, kapacitor), ale také jeden nebo více prvků aktivních. Jejich výhodou je, že přenos může být větší než 1, což je v některých situacích výhodné. Další výhodou je, že u aktivních obvodů lze dosáhnout lepších vstupních a výstupních parametrů (impedancí). Jako aktivní prvek se nejčastěji používá operační zesilovač. Nejjednodušší aktivní převodníky jsou znázorněny na obr. 2.2 [1, 2].



Obr. 2.2. a) Jednoduchý převodník I/U s OZ, b) Jednoduchý převodník U/I s OZ

Funkci obvodů popisují následující rovnice

$$U_{\text{OUT}} = -I_{\text{IN}} R, \quad (2.3)$$

$$I_{\text{OUT}} = \frac{U_{\text{IN}}}{R}. \quad (2.4)$$

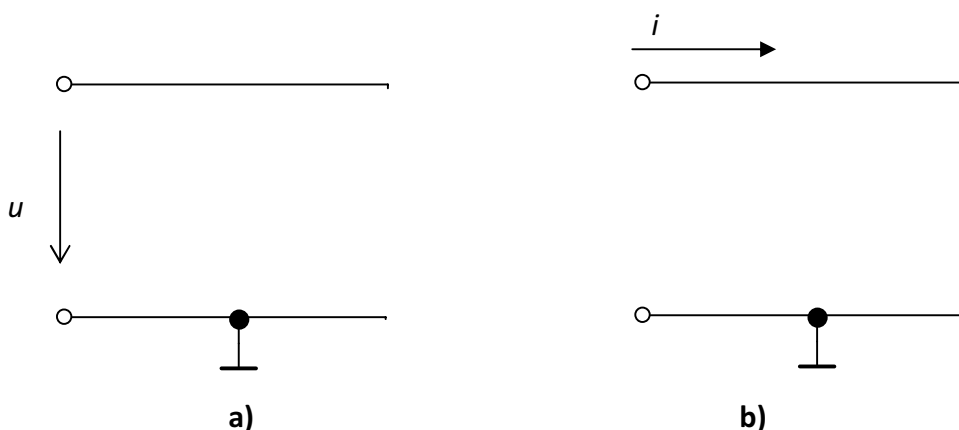
2.2 Další dělení převodníků

Další dělení souvisí se způsobem vedení signálu. Způsoby vedení signálu jsou popsány v následujících podkapitolách.

- Nesymetrické – mají pouze jeden vstup a jeden výstup,
- Symetrické (diferenční) – podle typu převodníku, buď dva symetrické vstupy a jeden výstup, jeden vstup a dva symetrické výstupy, případně symetrické vstupy i výstupy

2.2.1 Nesymetrické vedení

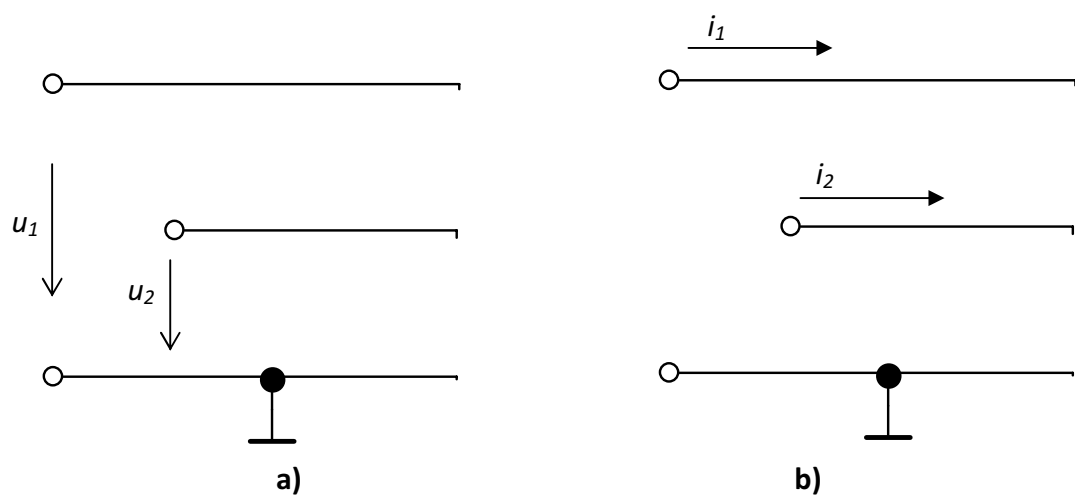
Nejjednodušší formou vedení signálu je tzv. nesymetrické vedení (obr. 2.3), tedy jeden signálový vodič vztažený k zemi, který má nenulovou impedanci k ostatním signálovým vodičům. Zásadní nevýhodou tohoto způsobu vedení signálu je rušení a aditivní šum, který může být způsoben například silovým vedením, a který se superponuje na hodnotu signálu. V audio technice tento jev způsobuje známé bzučení a hučení [3].



Obr. 2.3. Nesymetrické vedení a) v napěťovém módu, b) v proudovém módu

2.2.2 Symetrické vedení

Výše zmíněnou nevýhodu vedení nesymetrického řeší vedení symetrické (obr. 2.4). Tato vedení jsou navržena tak, aby nebyla ovlivňována přeslechy z elektroinstalace, případně z jiných signálových vodičů. Toho bylo docíleno tak, že výsledný signál je dán rozdílem dvou signálových vodičů vztažených k zemi. Teoreticky to znamená, že každý nevyžádaný signál přičtený k oběma signálovým vodičům je odstraněn odčítáním těchto signálů. V praxi není toto odečítání zcela dokonalé, protože zisk těchto dvou vodičů není nikdy stejný. S tím souvisí pojem CMRR (Common-Mode Rejection Ratio), tedy potlačení souhlasného rušivého signálu, které vyjadřuje míru zkreslení signálu, ke kterému může dojít. Jeden ze signálů (tzv. hot) je ve fázi a druhý (tzv. cold) mimo fázi, jinak řečeno mají vůči sobě opačnou fázi. Tohoto vedení signálu se hojně využívá při přenosu dat (např. UTP cat 5), v audio technice nebo u hudebních nástrojů [4].



Obr. 2.4. Symetrické vedení a) v napěťovém módu, b) v proudovém módu

Pro symetrické vedení platí

$$u = u_1 - u_2, \quad (2.5)$$

$$i = i_1 - i_2. \quad (2.6)$$

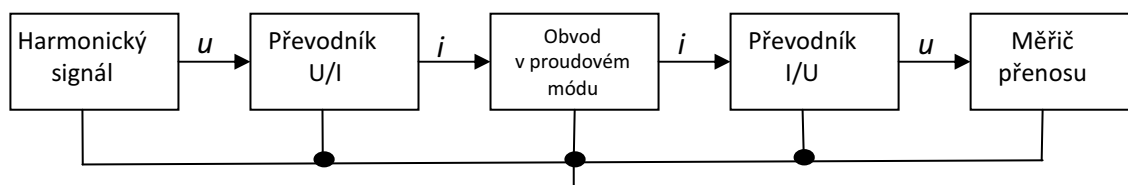
3 Měření kmitočtových filtrů v proudovém módu

3.1 Proudový mód

U kmitočtových filtrů se v současné době hojně využívá již zmíněného proudového módu, protože tento mód přináší mnoho výhod. Filtr pracující v proudovém módu má proudové vstupy i výstupy. Mezi jeho výhody patří větší šířka frekvenčního pásma, velká rychlost, velký dynamický rozsah a jednoduchá struktura obvodu [5].

3.2 Měření nesymetrických kmitočtových filtrů

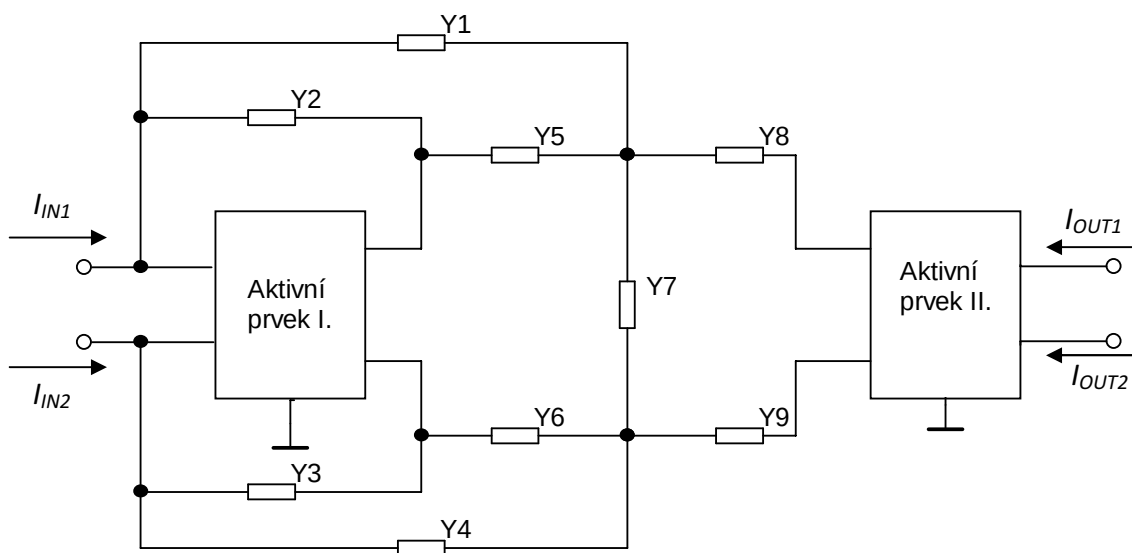
S použitím proudového módu ovšem vystává problém s měřením přenosu těchto kmitočtových filtrů, protože na trhu se nevyskytují přístroje s přímým proudovým buzením a měřením výstupního proudu v širokém kmitočtovém rozsahu. Řešením je použití tradičních zařízení pro měření kmitočtových filtrů v napěťovém módu doplněných o převodníky napětí na proud a proud na napětí (obr. 3.1). Jako zdroj signálu je použit generátor harmonického signálu, následuje převodník napětí na proud, kterým získáme budící proud přímo úměrný napětí generátoru. Na výstup prvního převodníku je připojen proudový vstup měřeného filtru. Mezi proudový výstup filtru a měřič přenosu vkládáme převodník proudu na napětí, který převádí výstupní proud filtru na napětí mu přímo úměrné. Tyto převodníky mohou velmi zásadně ovlivnit změřenou kmitočtovou charakteristiku filtru, a proto je žádoucí, aby jejich vlastnosti byly co nejlepší [6].



Obr. 3.1. Blokové schéma pro měření obvodů v proudovém módu

3.3 Symetrické (diferenční) kmitočtové filtry

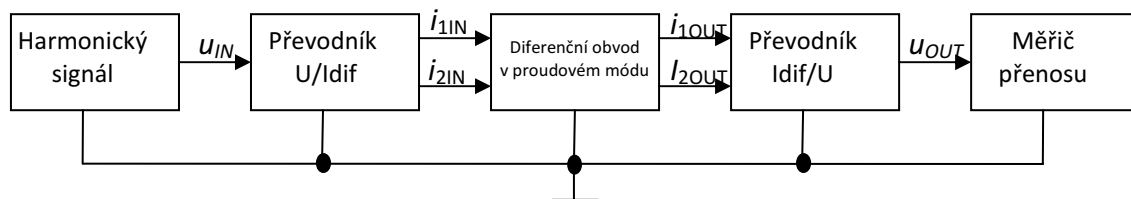
Jak už bylo řečeno, diferenční filtry mají dva symetrické vstupy a dva symetrické výstupy (obr. 3.2). Také už víme, že výsledný nosný signál těchto filtrů je daný rozdílem vstupních nebo výstupních signálů. V našem případě to bude rozdíl vstupních a výstupních proudů. Symetrické filtry se začaly využívat z důvodu rostoucích nároků na funkci a kvalitu filtrů. Tyto struktury přinášejí několik výhod, jako jsou zvětšení procenta potlačení soufázového signálu, zlepšení přenosu, zvětšení dynamického rozsahu, odstranění harmonického zkreslení a omezení efektů výkonového zesílení. Jejich nevýhodou je složitost návrhu a přenosových funkcí [7].



Obr. 3.2 . Princip plně diferenčního kmitočtového filtru v proudovém módu

3.4 Měření diferenčních kmitočtových filtrů v proudovém módu

Měření diferenčních filtrů je principiálně stejné jako měření filtrů nesymetrických. Pouze je třeba upravit doplněné převodníky. Převodník napětí na proud převádí vstupní napětí z generátoru harmonické signálu na dva symetrické proudy. To znamená, že v první části obvodu se jednoduché napětí převede na rozdíl dvou napětí a teprve potom se tato napětí převedou na rozdíl dvou proudů. Převodník proudu na napětí bude naopak převádět dva symetrické výstupní proudy filtru na napětí, tak jak naznačuje obr. 3.3.



Obr. 3.3. Blokové schéma pro měření diferenčních obvodů v proudovém módu

4 Struktury jednotlivých segmentů převodníků

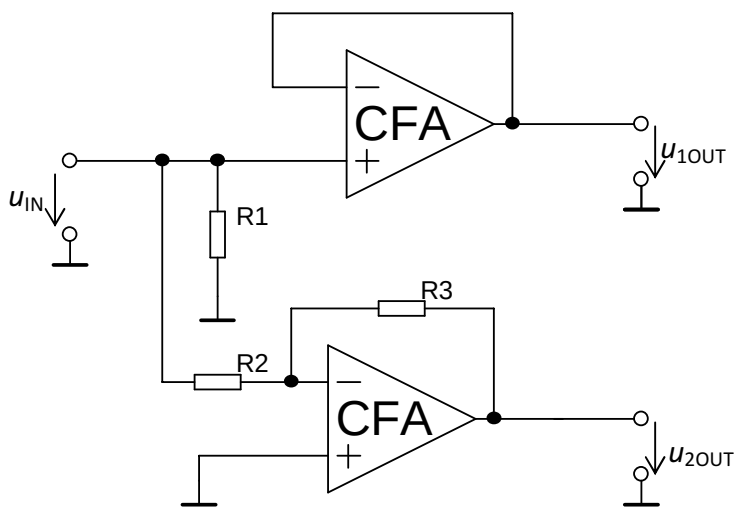
Pro realizaci těchto převodníků budou jako aktivní prvky použity operační zesilovače, případně transkonduktanční zesilovače. Konkrétně to budou operační zesilovače s proudovou zpětnou vazbou CFA (current feedback amplifier) v podobě různých integrovaných obvodů, které jsou dostupné na trhu. Popis vybraných operačních zesilovačů je možné nalézt v následující kapitole.

4.1 Symetrické převodníky U/I

Jedním z cílů práce je nalezení vhodného převodníku pro převod jednoduchého vstupního napětí na dva symetrické výstupní proudy. Tento obvod je možno rozdělit na dva základní bloky. V první řadě je třeba převést jednoduché vstupní napětí na symetrické. V dalším bloku jsou tyto dvě napětí, každé jednotlivě, převedena na dva symetrické proudy. Z dostupné literatury [4, 9, 10] bylo vytipováno několik vhodných zapojení.

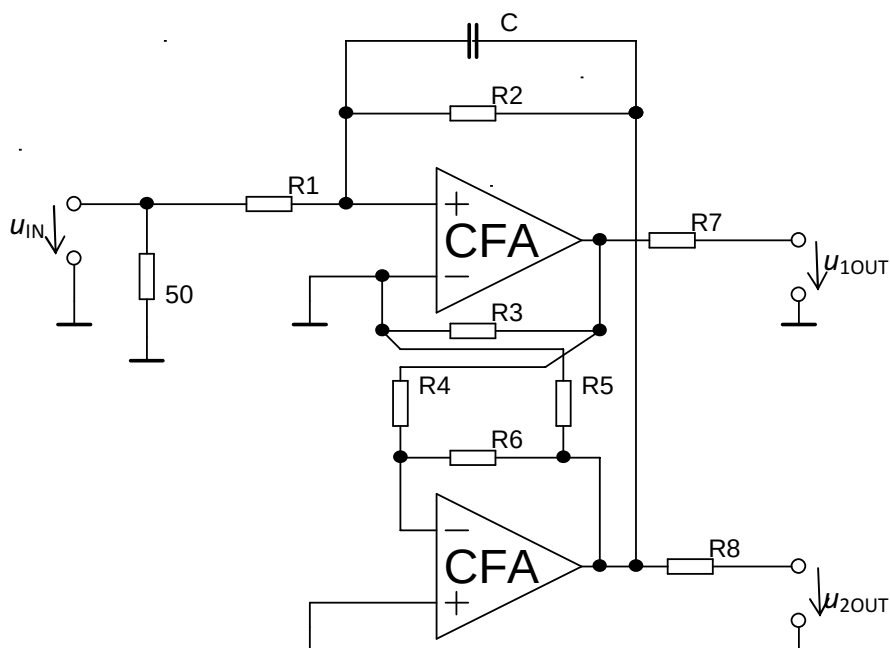
4.1.1 Převod jednoduchého napětí na symetrické

Jednoduchým řešením tohoto bloku je obvod z literatury [10] na obr. 4.1. Podmínkou funkčnosti je, že odpory R_1 a R_2 se budou rovnat. Tento obvod je uveden pouze jako jednodušší příklad tohoto bloku a nebudu s ním dále pracovat, protože jde o příliš jednoduché zapojení, které není vhodné pro naše účely.



Obr. 4.1. Jednoduchý převodník jednoduchého napětí na symetrické

Jedno z dalších možných řešení prvního bloku je na obr. 4.2. Toto zapojení bylo pro vybráno k dalšímu zkoumání pro své dobré vlastnosti, které vyplývají z literatury [9].



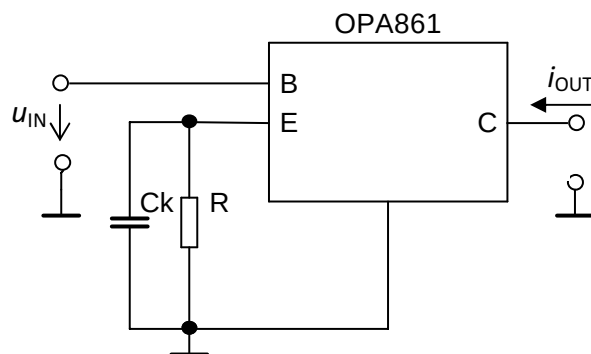
Obr. 4.2. Převodník jednoduchého napětí na symetrické s CFA

Rovnice vyjadřující obecný symetrický přenos obvodu na obr. 4.2 vypočítaná pomocí programu SNAP je

$$K = \frac{R_2 R_3 R_4 + R_2 R_4 R_5 + R_2 R_3 R_6 + R_2 R_5 R_6}{R_2 R_4 R_5 - R_2 R_3 R_6 + R_1 R_5 R_6 + R_1 R_4 R_5} \quad (4.1)$$

4.1.2 Převod symetrických napětí na proudy

Jak bylo řečeno, dalším krokem je převod těchto dvou napětí na proudy. Toho se dosáhne tak, že na oba výstupy se připojí jednoduchý převodník napětí proud, který pracuje s nesymetrickým napětím. Pro tento účel byl vybrán obvod z literatury [6]. Jde o převodník U/I s transkonduktančním operačním zesilovačem OPA861 (obr. 4.3).



Obr. 4.3. Jednoduchý převodník U/I s OPA861

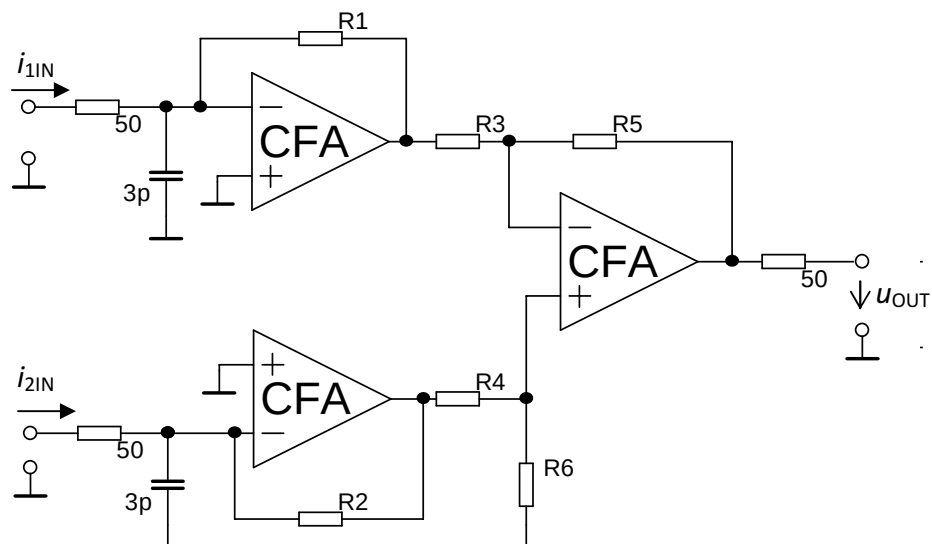
Ideálně pro tento obvod platí

$$i_{OUT} = \frac{u_{IN}}{R + pC_k} \quad (4.2)$$

4.2 Symetrické převodníky I/U

Dalším úkolem je návrh optimálního symetrického převodníku I/U, tedy dvou symetrických proudů na jednoduché napětí. I tento obvod si můžeme představit jako dvě jednoduché části. V tomto případě jsou nejprve převedeny dva symetrické proudy na dvě symetrická napětí, která jsou v druhé části obvodu převedena na napětí jednoduchá, a jde tedy o opačný postup jako u převodníků U/I. Zapojení bylo opět vybráno z dostupné literatury.

Z literatury [9] bylo vybráno zapojení na obr. 4.4. Je patrné, že v levé části obvodu jsou dva operační zesilovače zapojené jako jednoduché převodníky proud na napětí, které mění dva symetrické proudy na dvě symetrická napětí. Pravou část obvodu tvoří standardní rozdílový zesilovač, jehož výstupem je jednoduché napětí.

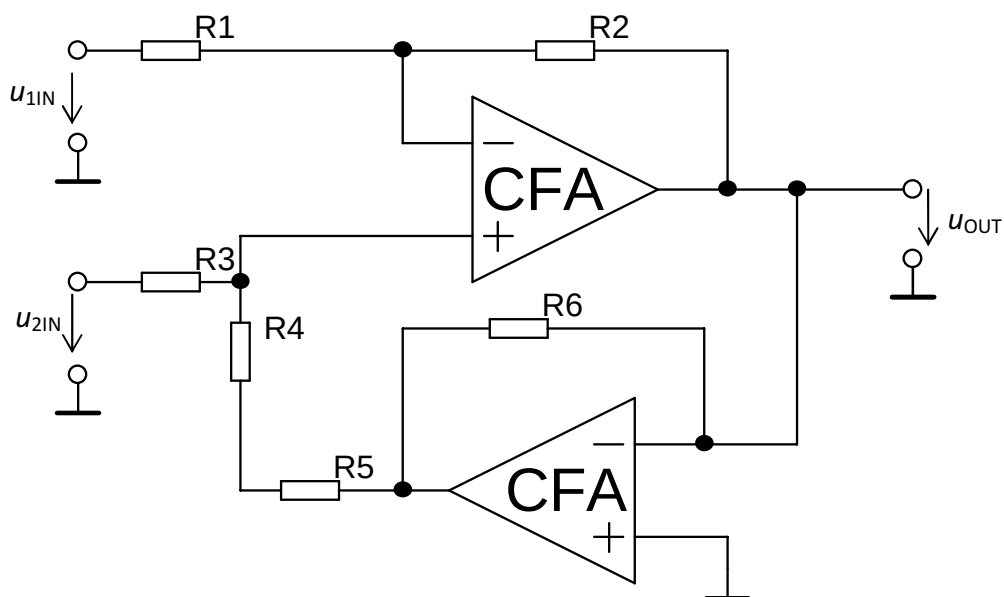


Obr. 4.4. Převodník symetrického proudu na jednoduché napětí s CFA

Obecně pro obvod na obr. 4.4 platí

$$u_{OUT} = \frac{i_{1IN}(R_1 R_6 + R_1 R_5) - i_{2IN}(R_2 R_5 + R_2 R_6)}{R_3 + R_4}. \quad (4.3)$$

Pro druhou část zapojení by také byl vhodný obvod na obr. 4.5 z literatury [4]. Jeho výhodou by měla být dobrá vstupní symetričnost. Avšak touto variantou se v rámci této práce zabývat nebudu, protože předcházející obvod je plně postačující.



Obr. 4.5 . Převodník symetrického napětí na jednoduché

5 Použité integrované obvody

5.1 CFA (Current feedback amplifier)

Z kapitoly 4 víme, že jsou to operační zesilovače s proudovou zpětnou vazbou. Tyto operační zesilovače mají na rozdíl od tradičních zesilovačů s napěťovou zpětnou vazbou (VFA) vyšší rychlost přeběhu a větší šířku pásma, která je poměrně nezávislá na zesílení uzavřené smyčky, což je pro měření filtrů pracujících na velkých kmitočtech důležité. U některých CFA může být šířka pásma více než 1 GHz [8]. V následujících kapitolách jsou popsány základní parametry vybraných IO, které jsou dostupné na trhu.

5.1.1 OPA694 (Wideband, Low-power Current Feedback Operational Amplifier)

Jde o integrovaný obvod od firmy Texas Instruments. Je to širokopásmový, nízkovýkonový operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou. Tento integrovaný obvod má následující parametry:

- Napájecí napětí - +/- 5 V
- Šířka pásma při jednotkovém zesílení - 1,5 GHz
- Napájecí proud – 5,8 mA
- Potlačení souhlasného napětí CMRR – 60 dB

5.1.2 AD8011 (Current Feedback Amplifier)

AD8011 patří také mezi výrobky firmy ANALOG DEVICES. Jeho výhodou je především dostupnost v programu “free samples” a nízká spotřeba. Parametry:

- Napájecí napětí - +/- 5 V
- Šířka pásma při jednotkovém zesílení – 300 MHz
- Napájecí proud – 1 mA
- Potlačení souhlasného napětí CMRR – 57 dB

5.1.3 EL5167 (Current feedback amplifier)

Tento obvod vyrobila firma INTERSIL. Jeho parametry jsou:

- Napájecí napětí - 5 až 12 V
- Šířka pásma při jednotkovém zesílení - 1,4 GHz
- Napájecí proud - 8,5 mA
- Potlačení souhlasného napětí CMRR - 57 dB

5.1.4 AD8002 (Current Feedback Amplifier)

Integrovaný obvod z dílny firmy ANALOG DEVICES. AD8002 je duální, nízkovýkonový operační zesilovač s velkou rychlostí. Výhodou je dostupnost dvou CFA v jednom pouzdru a s tím související symetrie jejich vlastností. Nevýhodou je menší šířka pásma. Jeho parametry jsou:

- Napájecí napětí - +/- 5 V
- Šířka pásma při jednotkovém zesílení: - 600 MHz
- Napájecí proud – 5,5 mA
- Potlačení souhlasného napětí CMRR – 54 dB

5.1.5 AD8001 (Current feedback amplifier)

AD8001 je jednoduchou verzí obvodu AD8002 od firmy ANALOG DEVICES. Parametry jsou velmi podobné jako u AD8002. Výhodou je větší šířka pásma. Parametry:

- Napájecí napětí - +/- 5 V
- Šířka pásma při jednotkovém zesílení - 880 MHz
- Napájecí proud - 5,5 mA
- Potlačení souhlasného napětí CMRR - 54 dB

5.1.6 OPA861 (Operational Transconductance Amplifier)

OPA861 je operační transkonduktanční zesilovač od firmy TEXAS INSTRUMENTS. Jeho výhodami jsou velká šířka pásma, rychlost přeběhu a vysoká transkonduktance.

- Napájecí napětí - +/- 5 V
- Šířka pásma při zesílení 2 – 470 MHz
- Transkonduktance – 95 mA/V

6 Simulace převodníků

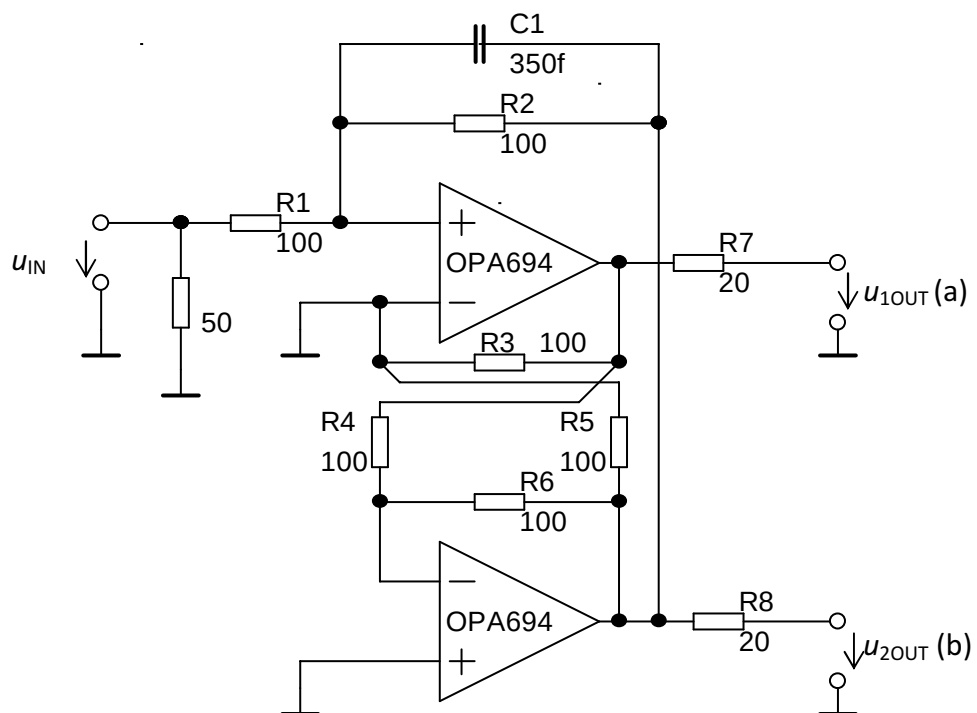
Obvody budou simulovány pomocí programu PSpice s modely integrovaných obvodů dostupnými na stránkách výrobců konkrétních obvodů, které jsou popsány v kapitole 5. Do vybraných zapojení budu postupně vkládat tyto integrované obvody, a budu analyzovat, který dosahuje pro dané zapojení nejlepších výsledků. Při volbě hodnot pasivních prvků se budu řídit doporučeními v datasheetech jednotlivých integrovaných obvodů. Výsledky budu vyhodnocovat podle dvou hledisek. Prvním hlediskem je šířka pásma přenosu daného bloku, protože je samozřejmě žádoucí, aby převodník správně pracoval v co největším frekvenčním rozsahu. Kmitočtový rozsah je pásmo kmitočtů, kdy pokles přenosu nepřesáhne -3 dB. Dalším kritériem bude vzájemná podobnost symetrických proudů a napětí, tam kde je to relevantní. Předpokladem úspěchu je, že obě větve obvodu budou co nejvíce stejné. Pokud se v zapojení objevuje více stejných aktivních prvků, je velmi vhodné použití duálních integrovaných obvodů, čímž se dosáhne lepší symetričnosti a lepších vlastností, než kdyby byly použity dva jednoduché integrované obvody.

6.1 Simulace symetrických převodníků U/I

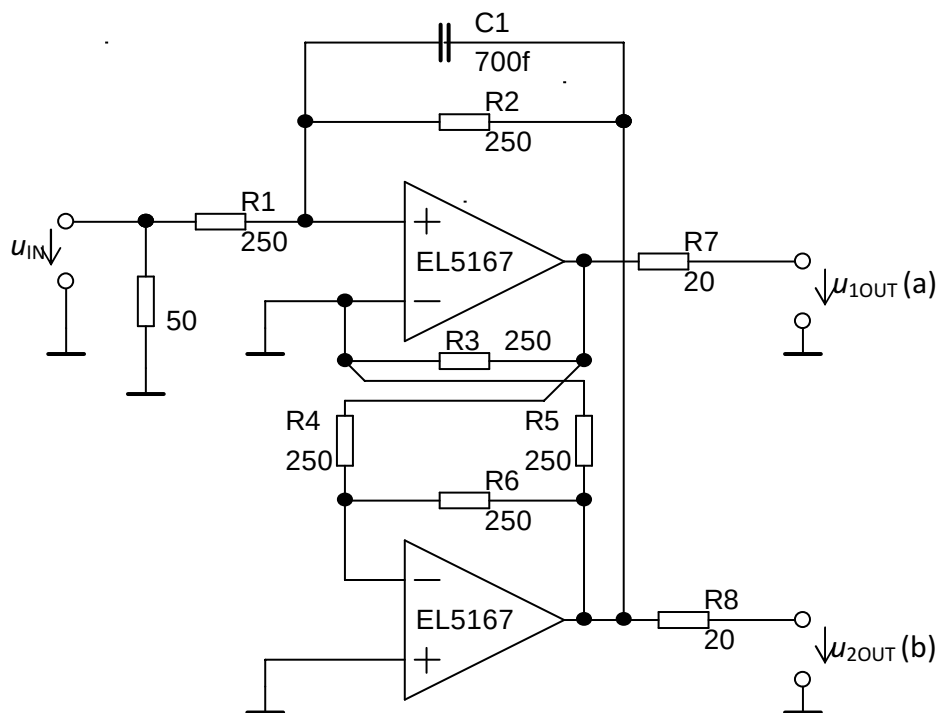
6.1.1 Simulace převodníků jednoduchého napětí na symetrické

První simulovanou strukturou je obvod z obr. 4.2 v kapitole 4. Při simulacích v programu Pspice, byl na oba výstupy tohoto obvodu připojen také převodník napětí proud s OPA861, popsáný v kapitole 5.1.2. A to z toho důvodu, že vstupní impedance integrovaného obvodu OPA861 ovlivňuje tvar kmitočtové charakteristiky výstupních napětí tohoto obvodu. Je tedy výhodné simulace provést už s připojeným OPA861, čímž dosáhnu reálnějších výsledků.

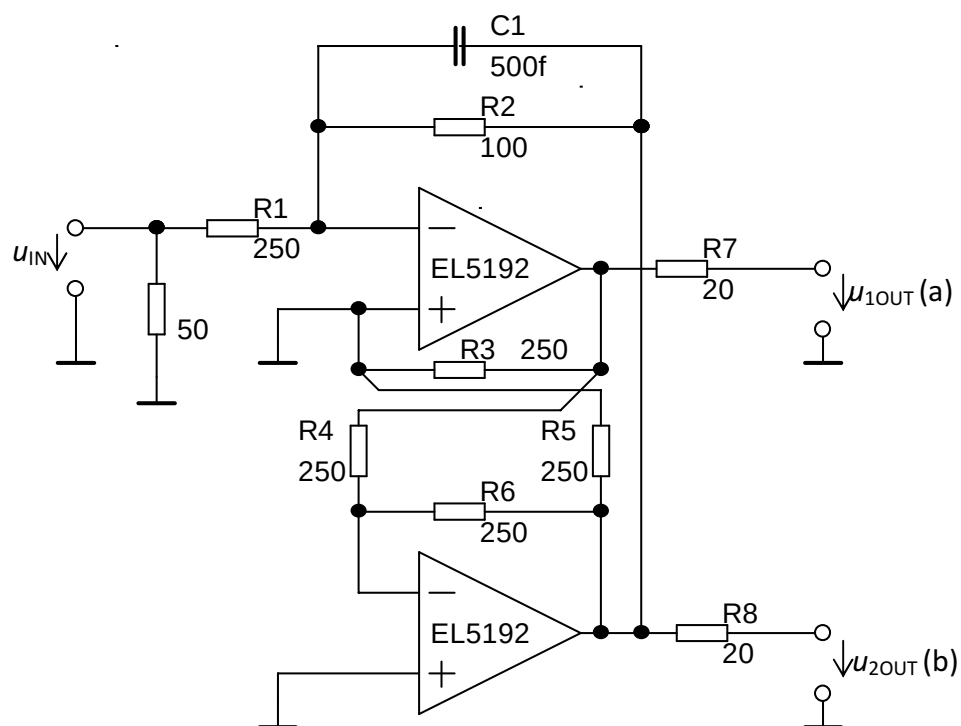
Jednotlivé varianty tohoto obvodu s různými integrovanými obvody a konkrétními hodnotami pasivních prvků jsou zobrazeny na několika následujících obrázcích (obr. 6.1 až 6.5)



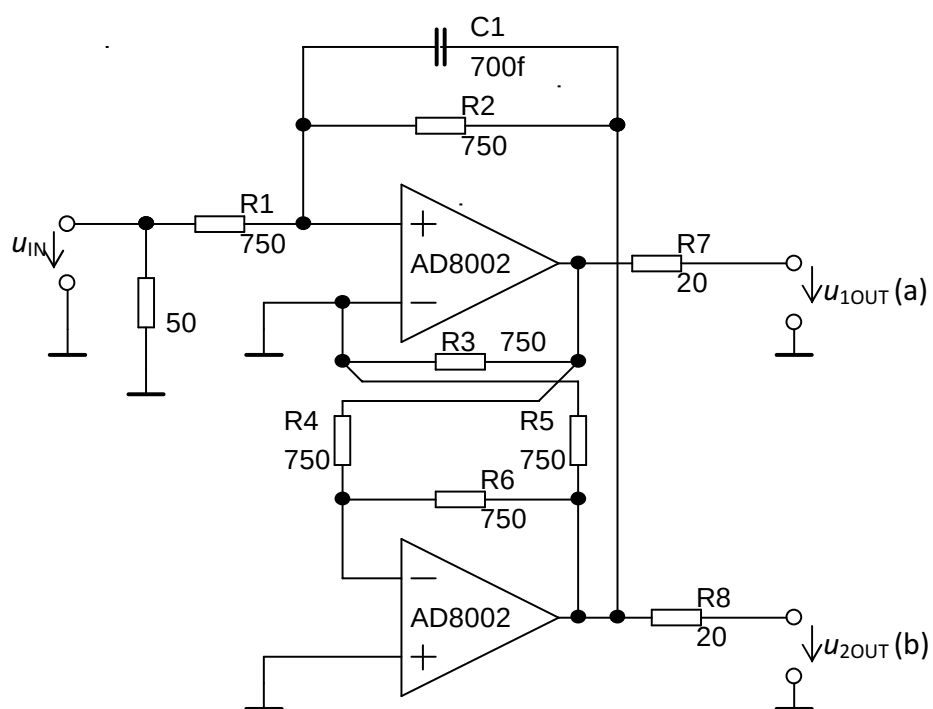
Obr. 6.1. Převodník jednoduchého napětí na symetrické s OPA694



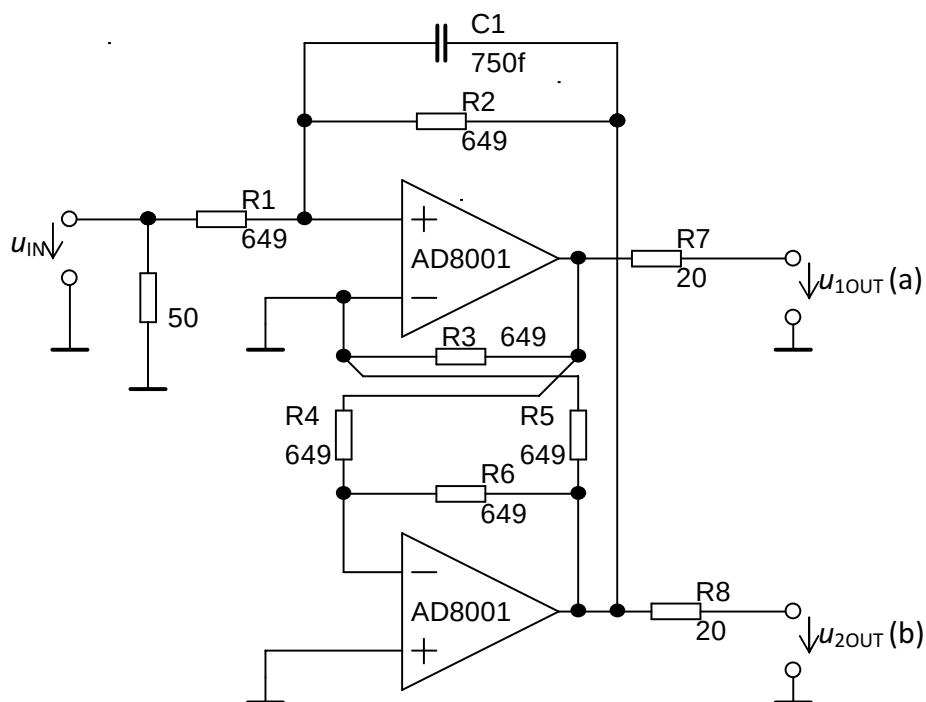
Obr. 6.2. Převodník jednoduchého napětí na symetrické s EL5167



Obr. 6.3. Převodník jednoduchého napětí na symetrické s EL5192



Obr. 6.4. Převodník jednoduchého napětí na symetrické s AD8002



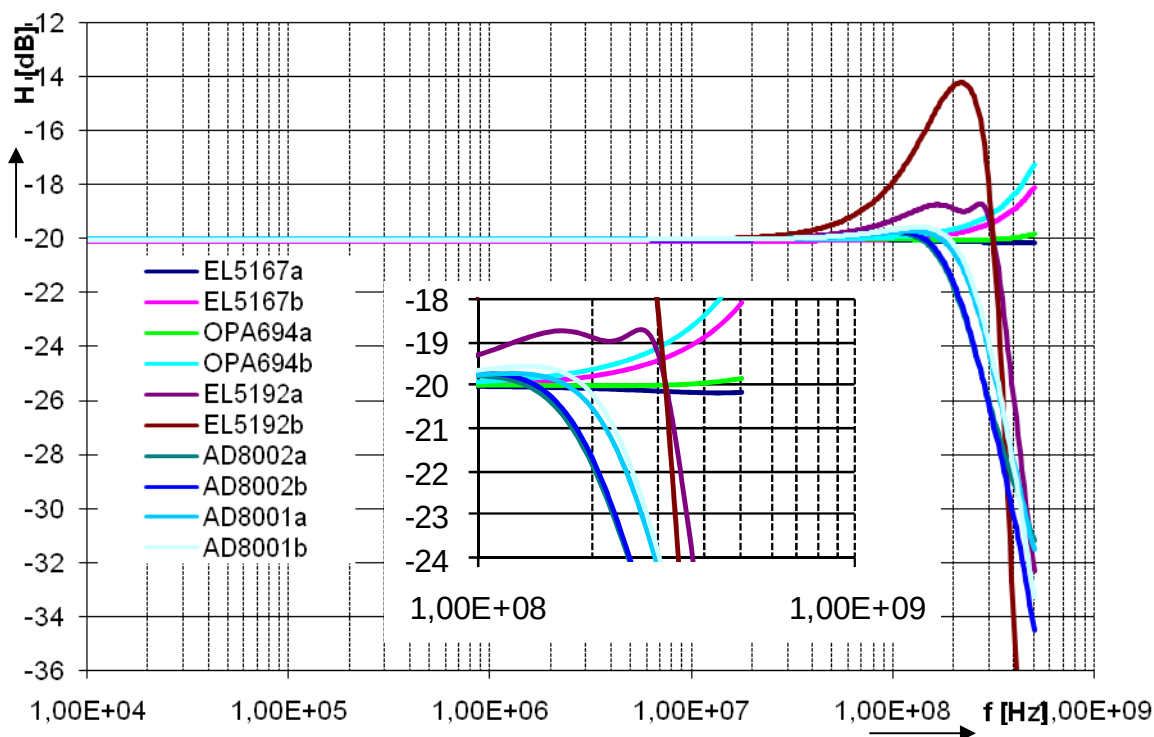
Obr. 6.5. Převodník jednoduchého napětí na symetrické s AD8001

Na obr. 6.6 jsou znázorněny modulové kmitočtové charakteristiky všech variant tohoto obvodu. Z grafu vyplývá, že všechna zapojení se chovají stejně do kmitočtu 30 MHz, kdy jsou obě napětí totožná. Za touto hranicí se u většiny variant začínají tato symetrická napětí lišit. Nejlépe se jeví varianty s integrovanými obvody OPA694 a EL6167. Jejich kmitočtové charakteristiky jsou velmi rovné a zároveň totožné až do 100 MHz. Poté se tato symetrická napětí začínají nepatrně lišit řádově o jednotky decibel. Z grafu je patrné, že obě zapojení mohou dosáhnout kmitočtového pásma až 500 MHz. Při simulacích bylo zjištěno, že velký vliv na tvar charakteristiky má velikost korekční kapacity C_k . Optimální hodnota pro OPA694 je 350f a pro EL5167 je 700f.

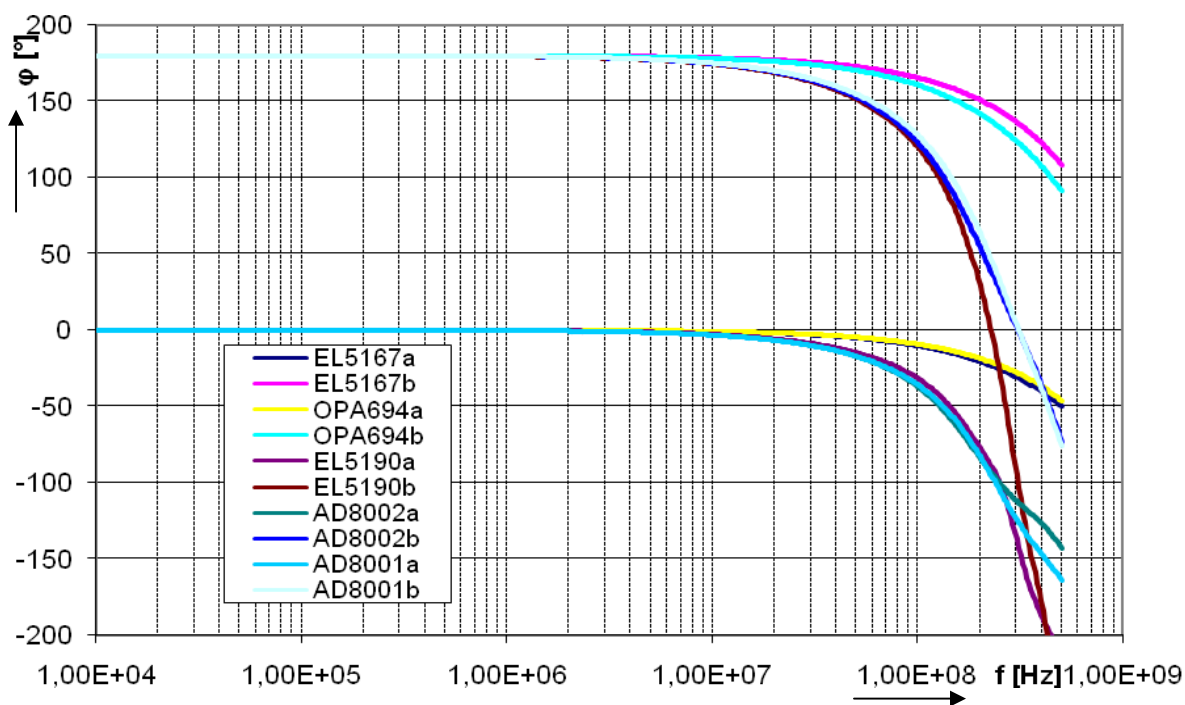
Z hlediska symetrie napětí se nejlépe jeví integrovaný obvod AD8002, u kterého jsou napětí naprosto stejná, ovšem na úkor kmitočtového rozsahu, jenž je přibližně 200 MHz. U zapojení s AD8001 jsou napětí také téměř identická v kmitočtovém rozsahu téměř 300 MHz, což je dáno tím, že jednoduché integrované obvody mají větší kmitočtové pásmo než ty duální. Nesymetričnost dvou různých AD8001 vůči shodnosti dvou CFA v AD8002 není v použitém modelu od výrobce zahrnuta.

Na dalším obrázku (obr.6.7) jsou fázové charakteristiky těchto obvodů. Symetrická napětí jednotlivých variant mají podle předpokladů opačnou fázi. Stejně jako v případě

kmitočtové charakteristiky, tak i v případě fázové se nejlépe jeví integrované obvody OPA694 a EL5167, které si drží optimální fázi u obou napětí téměř do 100 MHz.



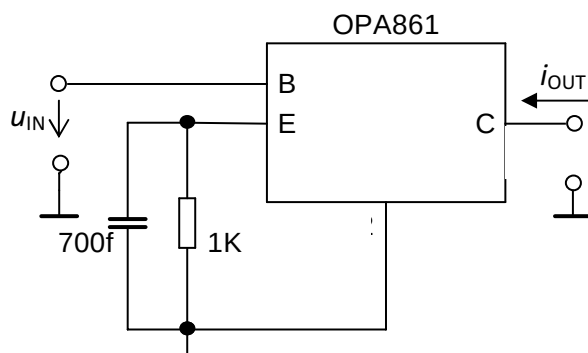
Obr. 6.6. Kmitočtové modulové charakteristiky jednotlivých variant převodníku U/U_{dif}



Obr. 6.7. Kmitočtové fázové charakteristiky jednotlivých variant převodníku U/U_{dif}

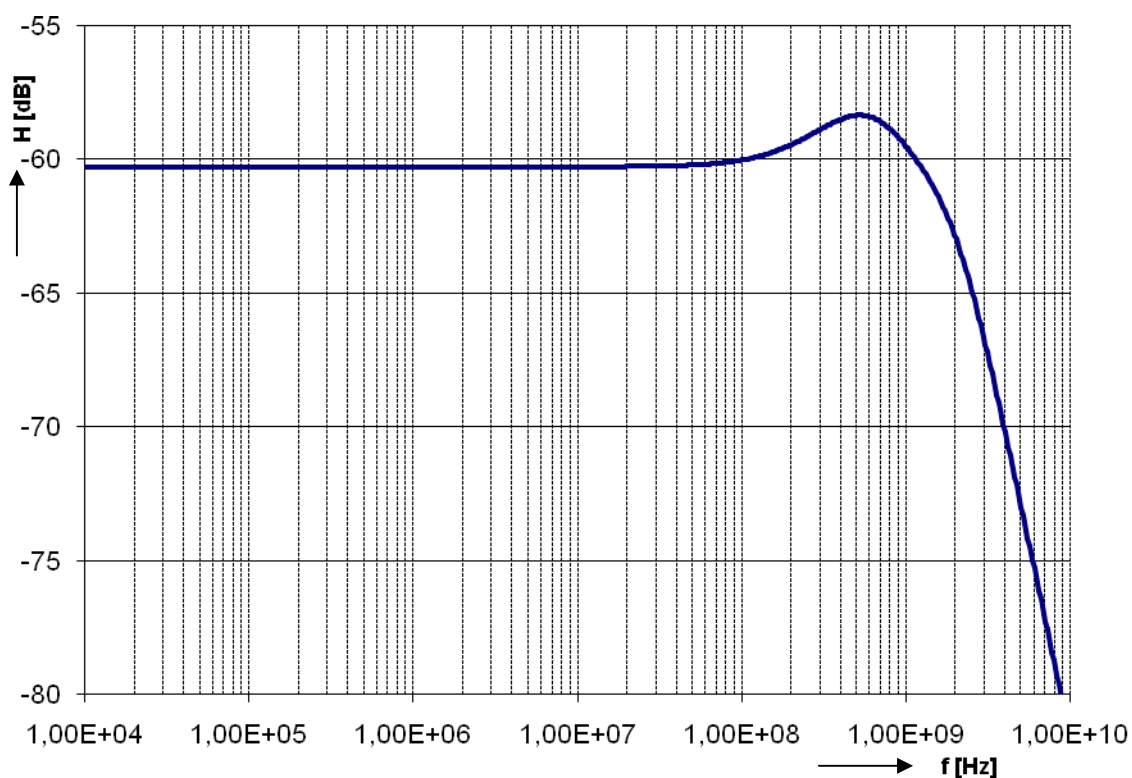
6.1.2 Simulace jednoduchého převodníku napětí na proud

Jak bylo uvedeno výše, pro převod diferenčních napětí (získaných za pomoci předcházejícího obvodu) na proudy, bude použit obvod z literatury [6] s transkonduktančním operačním zesilovačem OPA861 (obr. 6.8). Tak jako v literatuře byl pro převod zvolen odpor 1 k Ω . A to z důvodu jednoduchého přepočtu (1 V $\rightarrow$ 1 mA) a dobré šířky pásma. Hodnota kapacity byla volena tak, aby se dosáhlo co největší šířky pásma.



Obr. 6.8. Převodník jednoduchého napětí na proud

Kmitočtová charakteristika toho obvodu je nakreslena na obr. 6.9. Je vidět, že šířka pásma je více než 1 GHz s mírným přeskitem nad 100 MHz.



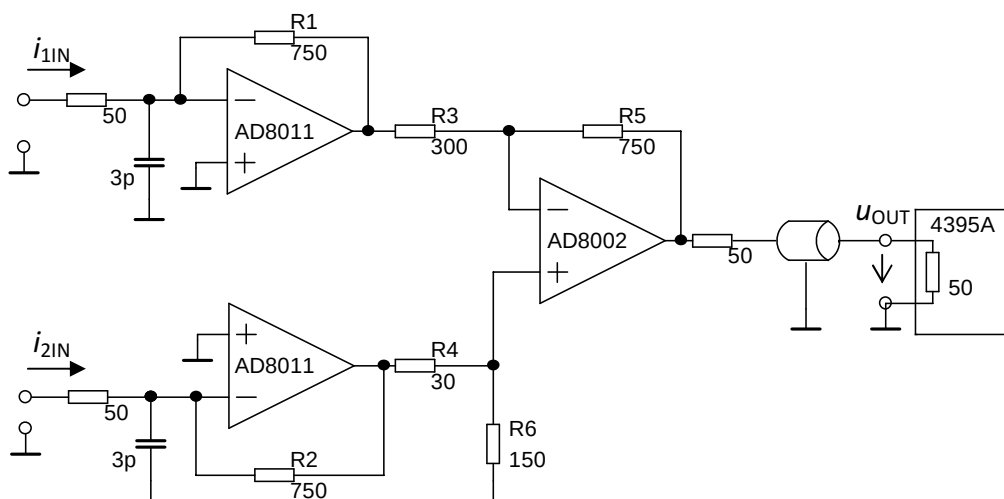
Obr. 6.9. Kmitočtová charakteristika obvodu na obr.6.8

6.2 Simulace symetrických převodníků I/U

6.2.1 Simulace převodníku symetrických proudů na jednoduché napětí

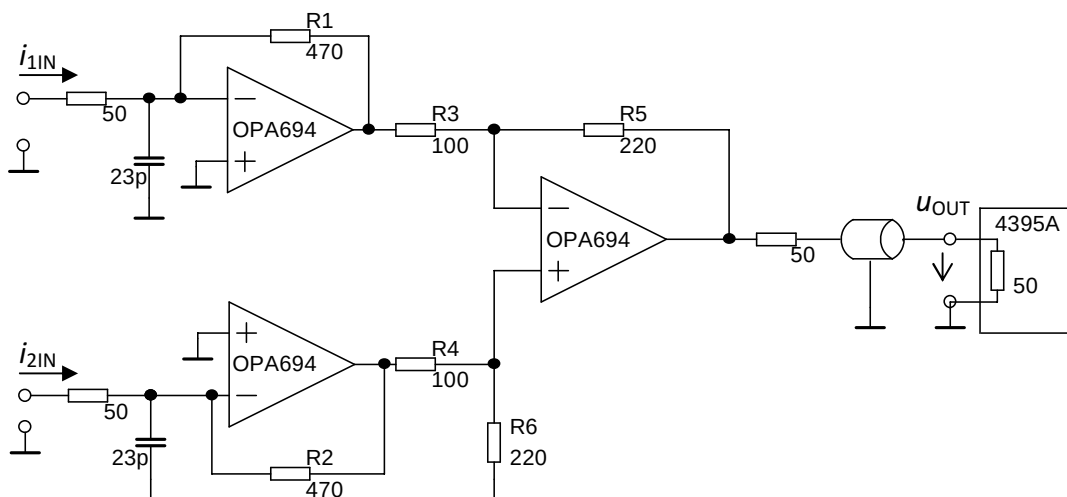
V této podkapitole jsem se zabýval simulacemi obvodu z obr. 4.4 v čtvrté kapitole. Toto zapojení realizuje převod symetrických proudů na jednoduché napětí. Na následujících obrazcích jsou jednotlivé varianty tohoto obvodu s různými integrovanými obvody z kapitoly 5 a s konkrétními hodnotami pasivních prvků. Na vstupech a výstupu tohoto obvodu jsou připojeny odpory $50\ \Omega$, jež představují impedanční přizpůsobení. Odpor na výstupu simuluje vstupní impedanci měřícího zařízení Agilent 4395A a jeho hodnota je taktéž $50\ \Omega$.

První varianta (obr. 6.10) je totožná s tou v literatuře [9], a je určena pro srovnání.



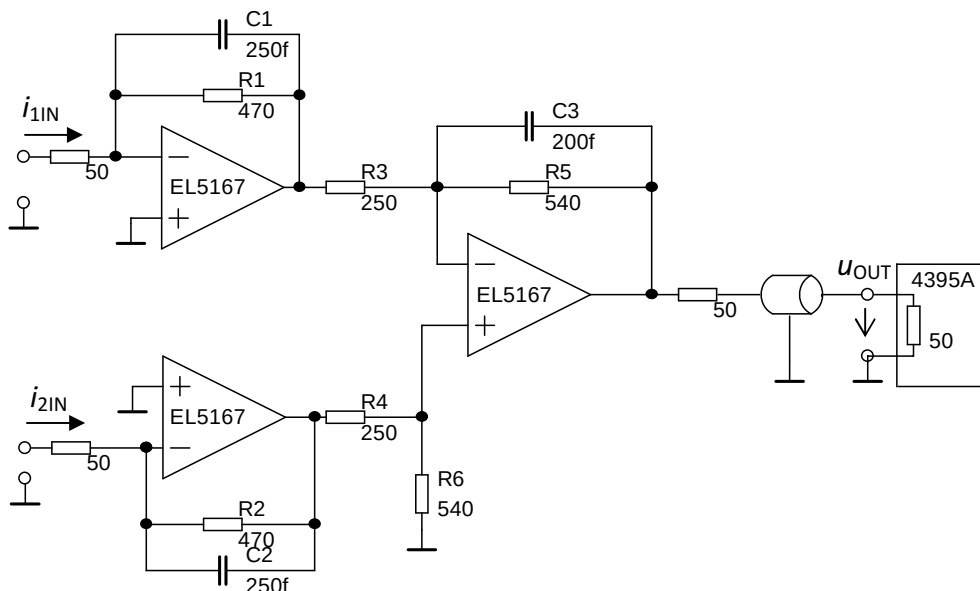
Obr. 6.10. Převodník symetrických proudů na jednoduché napětí s AD8011 a AD8002

Další simulovanou variantou je zapojení na obr. 6.11, ve kterém byl použit integrovaný obvod OPA694.



Obr. 6.11. Převodník symetrických proudů na jednoduché napětí s OPA694

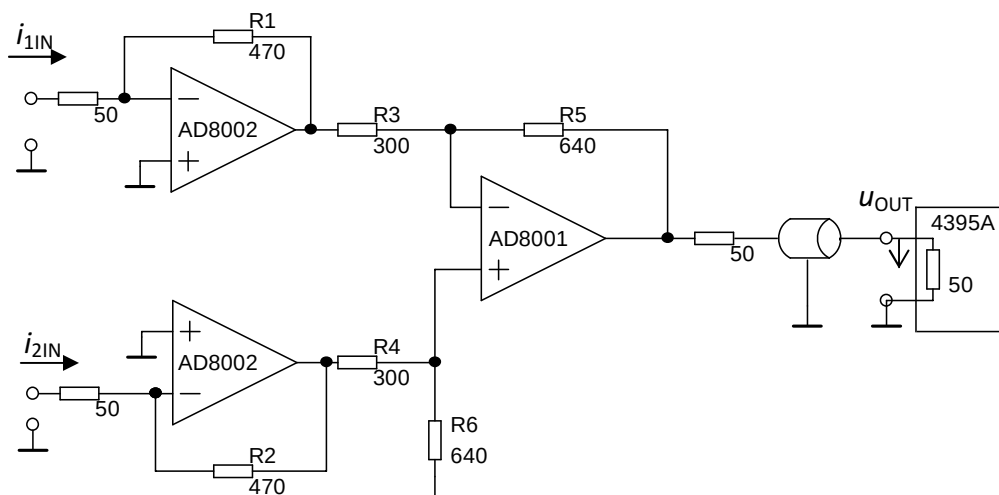
Varianta na obr. 6.12 byla osazena integrovaným obvodem EL5167. V porovnání s původním zapojením byly korekční kapacity přesunuty na zpětnovazební odpory, protože ze simulací bylo zjištěno, že u tohoto integrovaného obvodu mají na kmitočtové charakteristiky příznivý vliv. Ze stejného důvodu byla přidána další korekční kapacita na zpětnovazební odpor výstupní části obvodu.



Obr. 6.12. Převodník symetrických proudů na jednoduché napětí s EL5167

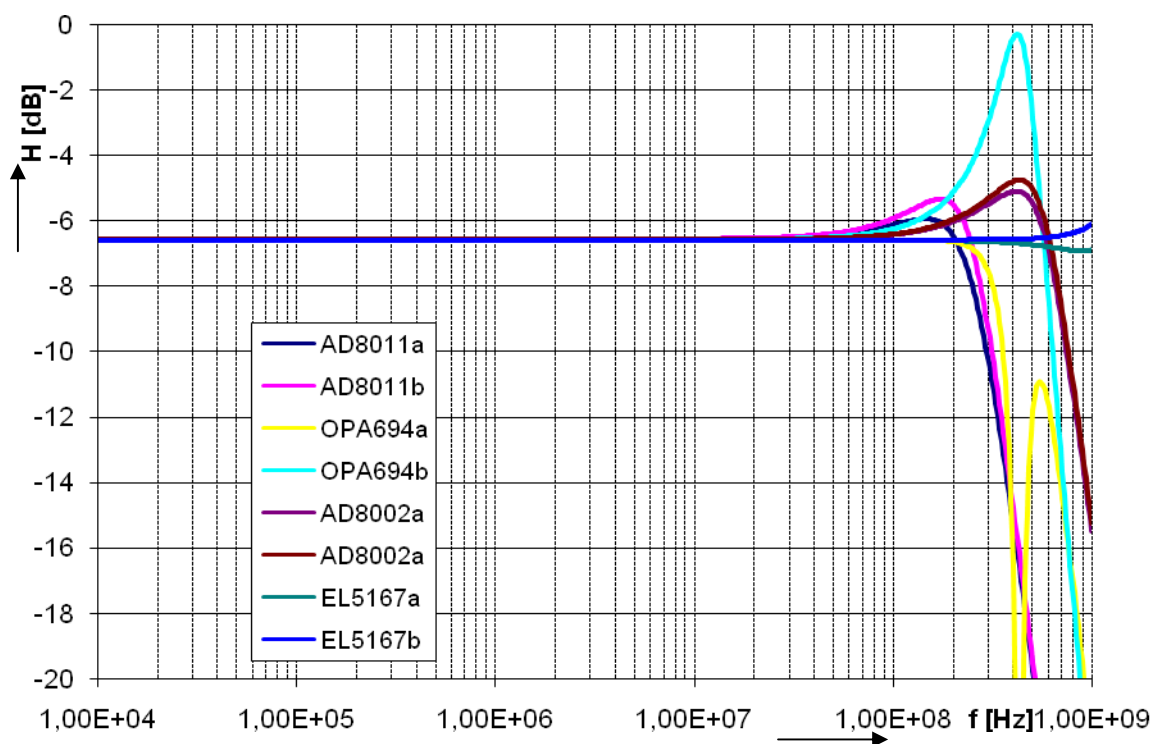
Poslední variantou je zapojení na obr. 6.13, kde byl použit duální AD8002 s jednoduchým integrovaným obvodem AD8001. Předpokladem je, že s duálním

integrovaným obvodem se dosáhne lepší symetričnosti napětí. U tohoto zapojení byly korekční kapacity vypuštěny, protože neměli na kmitočtové charakteristiky napětí příznivý vliv.

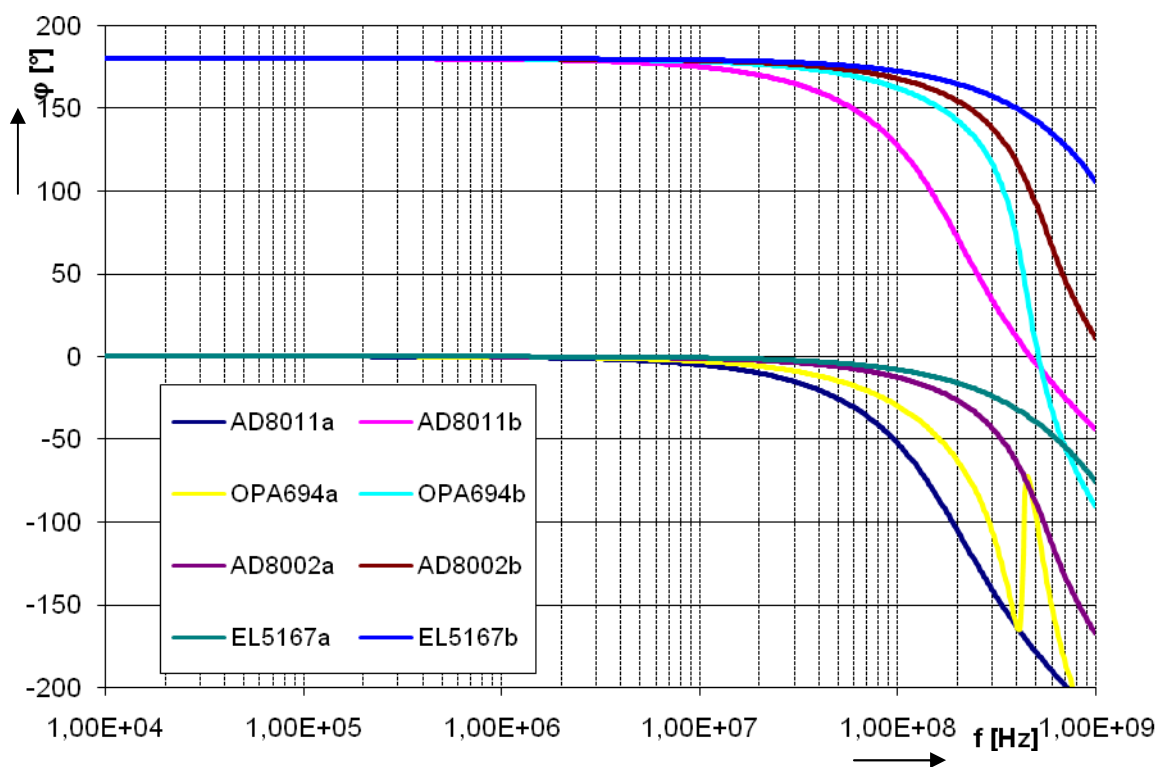


Obr. 6.13. Převodník symetrických proudů na jednoduché napětí s AD8002 a AD8001

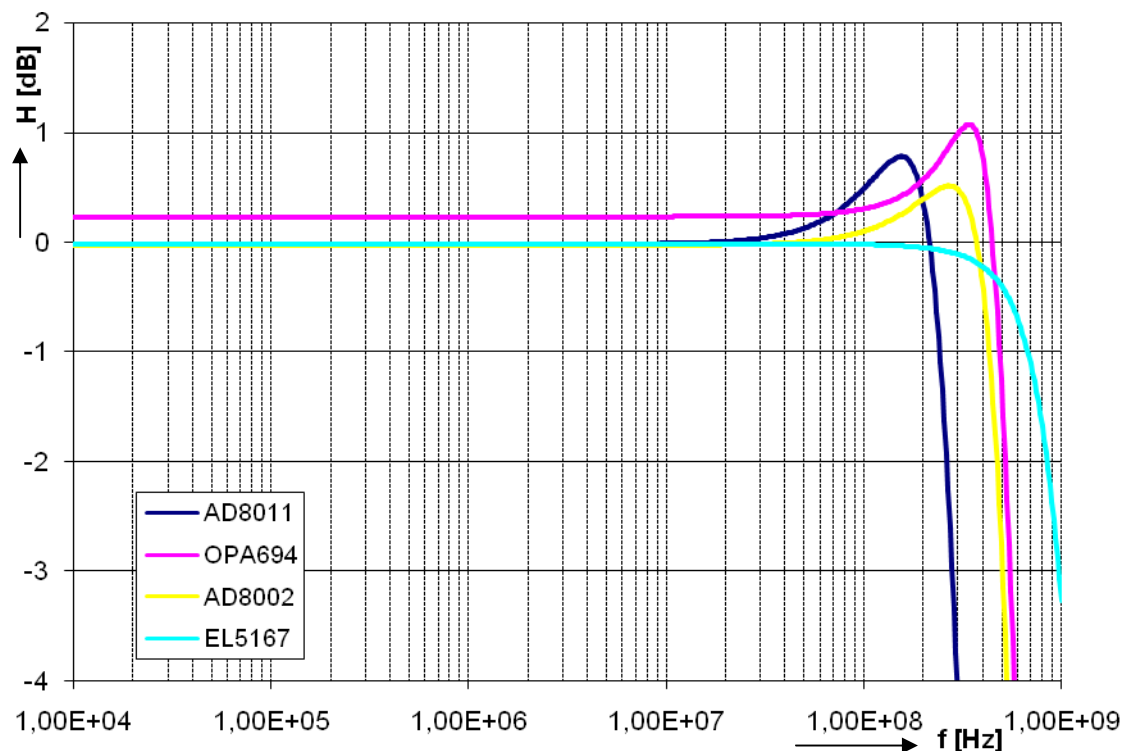
U těchto obvodů nebylo při simulacích sledováno nejen jednoduché výstupní napětí, ale i symetrická napětí na vstupu rozdílového zesilovače. Modulové a fázové charakteristiky symetrických napětí jsou nakresleny na obr. 6.14 a 6.15. Ze simulací vyplývá, že nejvhodnější je varianta s EL5167, protože šířka pásma obou napětí může být teoreticky až 1 GHz. Z hlediska symetričnosti jsou napětí prakticky shodná po přibližně 500 MHz, za touto hranicí se liší pouze o desetiny decibel. Modulové charakteristiky výstupního napětí na obr. 6.16 pouze potvrzují předchozí zjištění.



Obr. 6.14. Kmitočtové charakteristiky výstupních symetrických napětí prvního bloku obvodů na obrázcích 6.10 až 6.13



Obr. 6.15. Fázové charakteristiky výstupních symetrických napětí prvního bloku obvodů na obrázcích 6.10 až 6.13

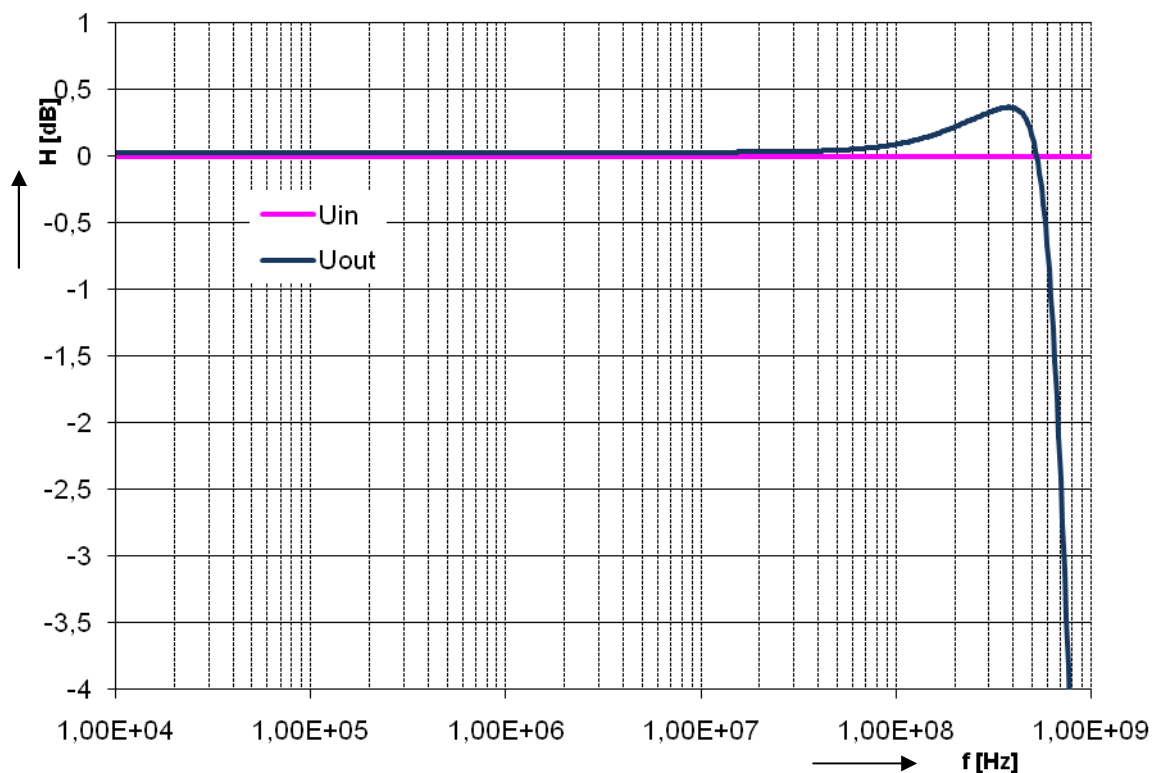


**Obr. 6.16. Kmitočtové charakteristiky jednoduchých výstupních napětí obvodů na
obrazcích 6.10 až 6.13**

6.3 Simulace kompletního symetrického převodníku U/I a I/U

Ze simulovaných částí byly vybrány ty nejvhodnější, z kterých byl sestaven kompletní převodník od vstupního napětí prvního bloku až na výstupní napětí posledního bloku převodníku I/U (obr. 6.17). Porovnáním vstupního napětí a výstupního můžu zjistit, jak budou převodníky celkově ovlivňovat měřící napětí analyzátoru. Jednotlivé části obvodu se po spojení navzájem ovlivňují, důsledkem toho se kmitočtové charakteristiky dílčích napětí a proudů změnily, takže některé hodnoty pasivních prvků byly změněny tak, aby bylo dosaženo co nejlepšího výsledku.

Kmitočtová charakteristika kaskádního spojení převodníků U/I a I/U je nakreslena na obr. 6.18. Z grafu vyplývá, že šířka pásma je okolo 700 MHz s mírným překmitem v pásmu nad 100 MHz.



Obr. 6.18. Modulová kmitočtová charakteristika obvodu na obr. 6.17

7 Praktická realizace

7.1 Realizace symetrického převodníku $U / Idif$

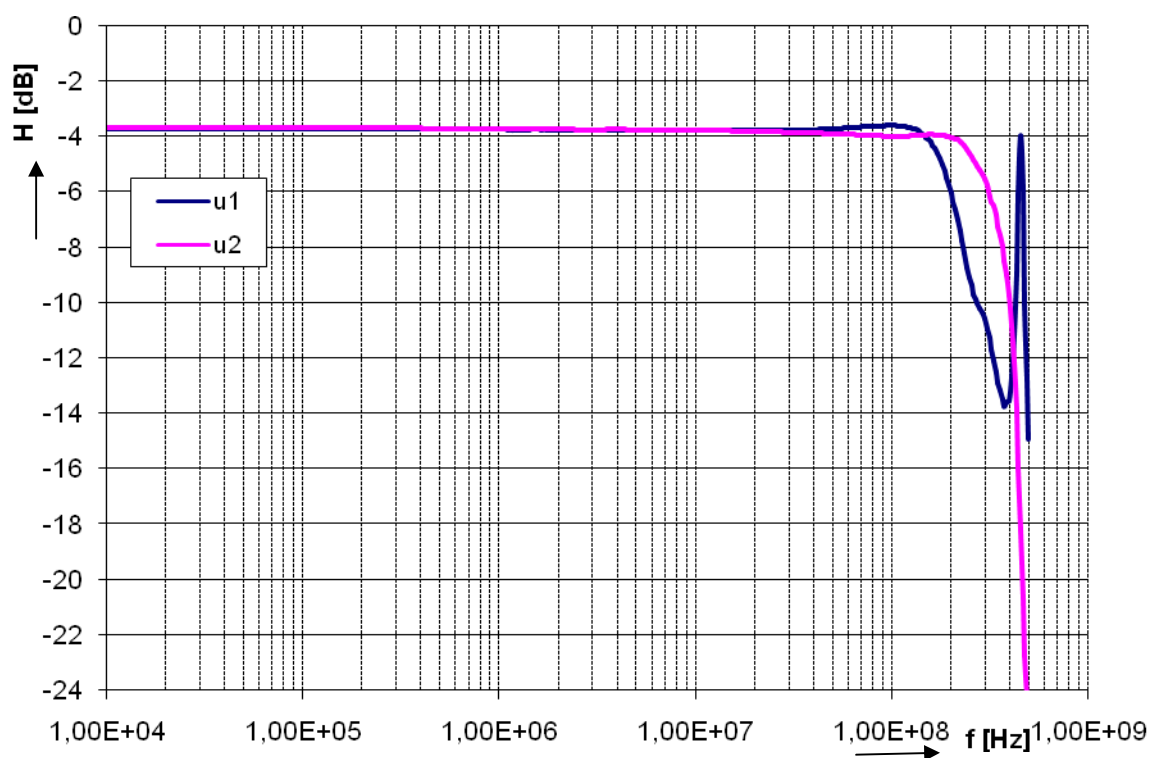
Jak bylo řečeno, převodník jednoduchého napětí na symetrický proud se bude skládat ze tří samostatných bloků. První blok bude realizovat převod jednoduchého napětí na symetrické (kap. 6.1.1). Převod dvou symetrických napětí na proudy budou realizovat dva shodné převodníky jednoduchého napětí na proud (kap. 6.1.2).

7.1.1 Realizace převodníku jednoduchého napětí na symetrické

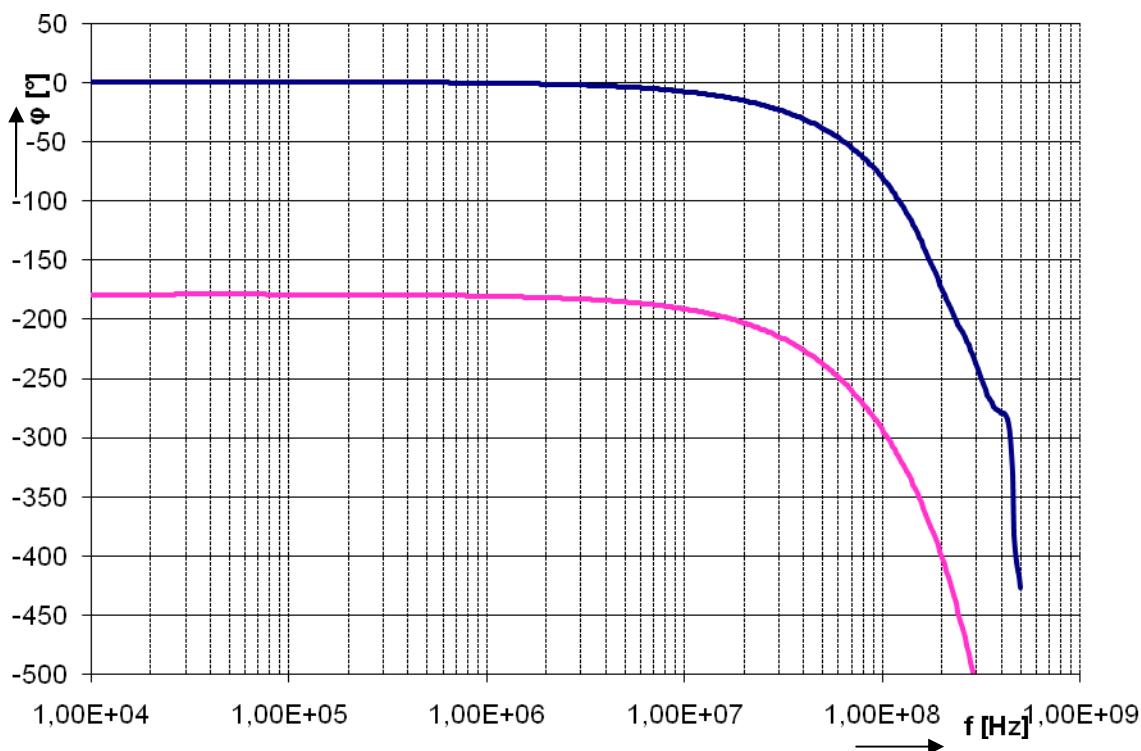
Pro realizaci převodu jednoduchého napětí na symetrické byl vybrán obvod na obr. 4.2, konkrétně varianta na obr. 6.2, která je osazena integrovanými obvody EL5167 v pouzdře SC-70. Tato varianta byla zvolena, jelikož při simulacích vykazovala nejlepší vlastnosti, zejména velkou šířku pásma a velmi rovnou kmitočtovou charakteristiku v propustném pásmu.

Kmitočtové charakteristiky výstupních symetrických napětí jsou znázorněny na obr. 7.1. Na první pohled je vidět, že stejně jako při simulaci mají obě výstupní napětí velmi podobný průběh. Propustné pásmo obou napětí je velmi rovné a na stejné úrovni až do frekvence 100 MHz, což svědčí o dobré symetričnosti. Přestože měření bylo provedeno při úrovni vstupního signálu 0 dBm, obě výstupní napětí jsou na úrovni přibližně – 4 dB. To je způsobeno nereálnými vlastnostmi modelu integrovaného obvodu EL5167 při simulaci a také tolerancí při výběru hodnot pasivních součástek z řady E24. Dalším z důvodů je fakt, že není možné dosáhnout tak malé hodnoty korekční kapacity C_k jako je 750 fF. Tyto malé kapacity byly vyřešeny ponecháním prázdných pájecích plošek, jež by měli mít parazitní kapacitu řádově stejnou, nikoliv však přesnou. Dalším poznatkem je šířka pásma, která v případě simulace činila až 500 MHz. Změřená charakteristika ovšem dosahuje šířky pásma přes 200 MHz. Za tento rozdíl jsou zodpovědné stejné důvody jako v případě poklesu úrovně signálu. Vliv na šířku pásma má také použitá technologie výroby desky, která je vhodná pro signály do přibližně 100 MHz. V následujícím grafu (obr.7.2) jsou znázorněny fázové charakteristiky výstupních symetrických napětí. Výstupní napětí mají podle předpokladů navzájem opačnou fázi. Z grafu je zřejmé, že obě napětí si drží fázi do 1 MHz. Od 1 MHz do 10 MHz se mění jen nepatrně. V dalším průběhu posun fáze významně narůstá a na kmitočtu

100 MHz činí téměř 100 stupňů. Ze změřené fázové charakteristiky vyplývá, že použití bloku U/Udif bude v reálném případě limitováno do frekvence přibližně 10 MHz.



Obr. 7.1. Změřené kmitočtové charakteristiky výstupních symetrických napětí bloku U/Udif



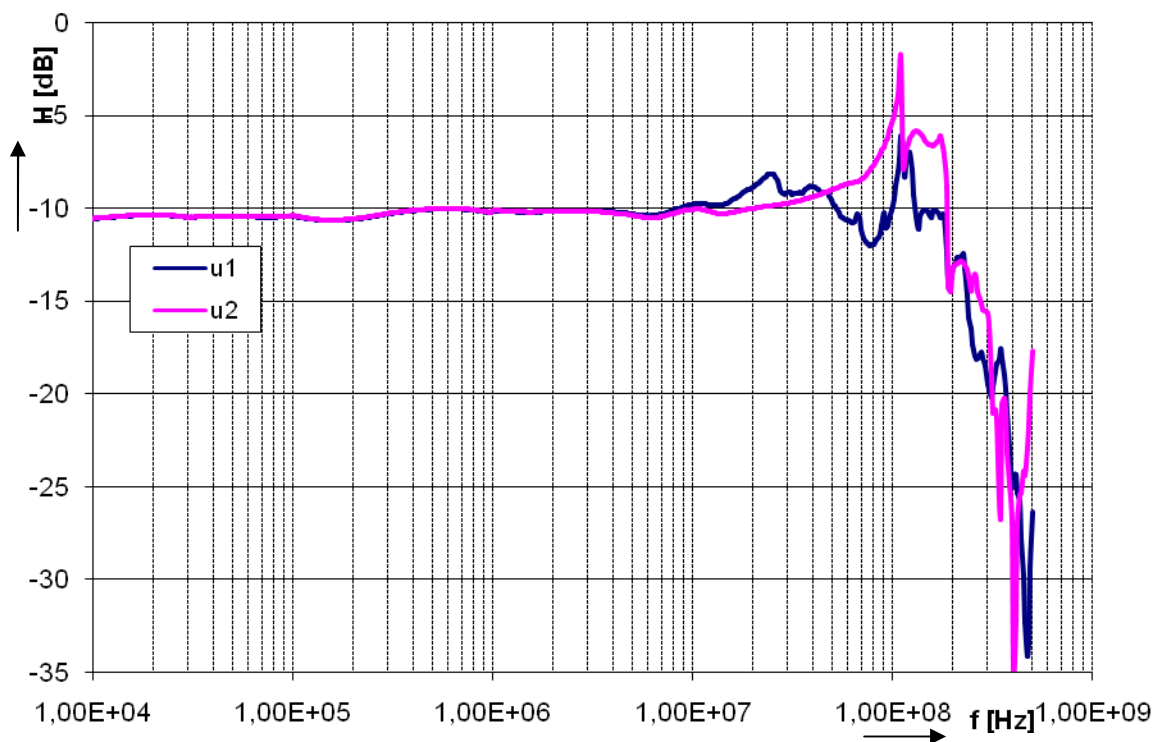
Obr. 7.2. Změřené fázové charakteristiky výstupních symetrických napětí bloku U/Udif

7.2 Realizace převodníku napětí na proud

Pro realizaci převodu dvou symetrických napětí na symetrické proudy byly použity dva převodníky napětí na proud s operačním transkonduktančním zesilovačem OPA861 popsané v kapitole 6.1.2. Tyto převodníky byly již k dispozici na měřícím pracovišti a jejich vlastnosti už byly ověřeny v literatuře [6], nebylo tedy nutné je podrobovat samostatnému zkoumání.

7.3 Realizace symetrického převodníku I_{dif} / U

Pro praktickou realizaci převodu diferenčních proudů na jednoduché napětí byl vybrán obvod na obr. 6.12. Tento obvod je stejně jako první blok osazen integrovanými obvody EL5167. U této desky byly stejně jako při simulaci změřeny kmitočtové charakteristiky symetrických napětí před rozdílovým zesilovačem. To mohlo být ovšem provedeno pouze v rámci měření sériového zapojení všech bloků pomocí měřící sondy, protože není k dispozici vyhovující zdroj signálu s proudovým buzením. Na obr.7.3 jsou znázorněny získané charakteristiky. Ve srovnání se simulací (obr. 6.14) je úroveň signálu v tomto místě obvodu opět posunuta o již zmíněné 4 dB. I když šířka pásma těchto signálů se při simulaci blížila až k 1 GHz, při měření nedosáhla ani 100 MHz. Příčiny se shodují s tím, co bylo uvedeno v kap. 7.1.1 pro případ desky U/U_{dif}



Obr. 7.3. Změřená modulová kmitočtová charakteristika první části bloku I_{dif}/U

7.4 Měření sériového zapojení U / I_{d1} a I_{d1} / U

Jak bylo řečeno v kapitole 6.3, pro zjištění do jaké míry převodníky ovlivňují charakteristiku měřeného diferenčního filtru, musí být všechny bloky sériově spojeny.

Na obr. 7.4 jsou vyobrazeny kmitočtové modulové charakteristiky výstupního napětí tohoto sériového zapojení. Charakteristika byla změřena pro různé úrovně výkonu vstupního napětí, které jsou spolu s odpovídajícími hodnotami vstupního napětí v tabulce 7.1. Toto napětí odpovídá zátěži 50 Ω .

Tab. 7.1. Měřené úrovně výkonu vstupního napětí

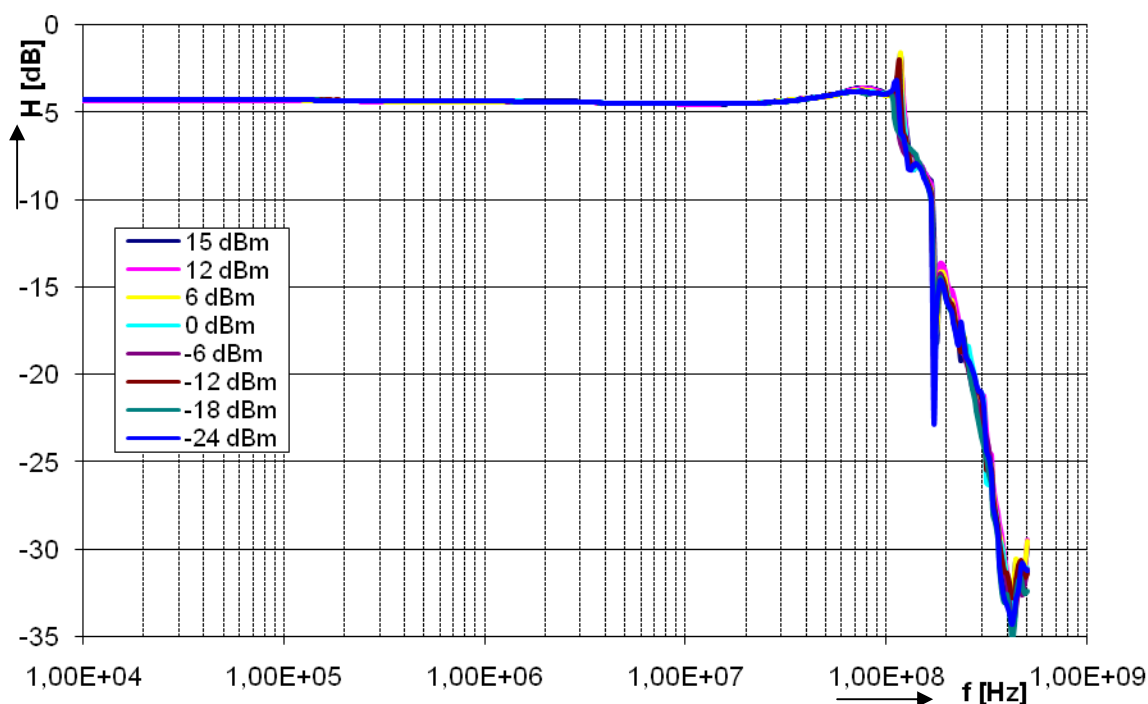
P [dBm]	15	12	6	0	-6	-12	-18	-24
u [mV]	1260	890	446	224	112	56,2	28,2	14,1

Je patrné, že úroveň vstupního signálu nemá na tvar kmitočtové charakteristiky zásadní vliv, což je velmi výhodné. Rozdílná úroveň vstupního signálu se lehce projevuje pouze změnou velikosti špičky při přechodu z propustného do nepropustného pásma. Co se týče šířky pásma, ta je výrazně menší než při simulaci. Šířka pásma při simulaci byla až 700 MHz, kdežto reálná je okolo 130 MHz. Tato hodnota je však pro účely měření diferenčních filtrů plně dostačující. Úroveň signálu na výstupu je oproti simulacím přibližně o 4 dB nižší, ovšem nejde o nijak dramatický rozdíl, který je způsoben zaokrouhlením hodnot pasivních součástek při výběru z řady, protože při simulacích se někdy i malá změna hodnoty pasivního prvku projevila na úrovni výstupního napětí. Dalším důvodem rozdílu mezi simulací a reálným měřením je mírná odlišnost použitého modelu integrovaného obvodu EL5167 od reálného obvodu, která má při jemném nastavení poměrů ne zcela zanedbatelný vliv.

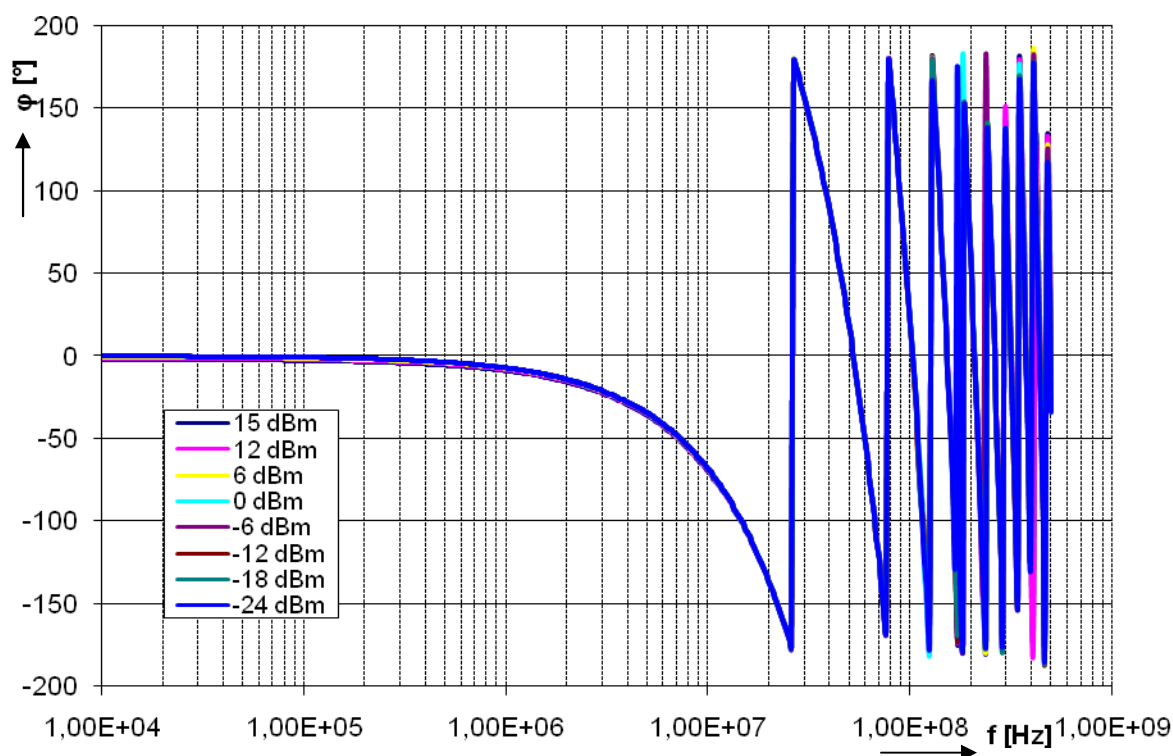
Obr. 7.5 znázorňuje fázovou charakteristiku kompletního sériového zapojení pro různé úrovně výkonu vstupního signálu. Tak jako v předchozím případě tak ani na fázovou charakteristiku nemá úroveň vstupního signálu příliš vliv. Z toho vyplývá, že samotné převodníky nepředstavují omezení pro žádnou z použitých úrovní signálu. Tento obvod si drží optimální fázi pouze do přibližně 1 MHz. To zjištění snižuje optimální šířku pásma, u které lze převodník použít pro měření filtrů.

Velký vliv na šířku pásma a tvar kmitočtových charakteristik má také fakt, že jednotlivé bloky byly spojovány pomocí koaxiálního kabelu. Vhodnější by jistě bylo, kdyby všechny bloky byly realizovány na jedné desce plošných spojů s použitím technologie vhodné pro

signály větší než 100 MHz. I když při návrhu byla snaha o dodržování symetrie, ne vždy se podařilo, aby šli cesty paralelně vedle sebe, což může mít také negativní vliv.



Obr. 7.4. Změřená modulová kmitočtová charakteristika sériového zapojení převodníků



Obr. 7.5. Změřená fázová kmitočtová charakteristika sériového zapojení převodníků

Závěr

Úkolem této práce byl návrh a následná analýza symetrických převodníků napětí na proud a proud na napětí. Tyto převodníky se používají k měření kmitočtových filtrů v proudovém módu. Je nutné, aby samotné převodníky, co nejméně ovlivňovaly měřenou charakteristiku filtru.

Z literatury byla vytipována některá zapojení vhodná pro tento účel. Následně byly upraveny tak, aby jejich parametry splňovaly podmínky pro toto využití. Tyto úpravy spočívaly v nalezení co nejvhodnějšího integrovaného obvodu a také ideálních hodnot pasivních prvků.

Dle simulací v programu PSpice se ve zkoumaných zapojeních nejlépe jevil integrovaný obvod EL5167 a to hlavně z důvodu velké šířky pásma. Pro převod dvou symetrických napětí na dva symetrické proudy byly použity dva jednoduché obvody s transkonduktančním zesilovačem OPA861. Všechny simulované charakteristiky jsou znázorněny v grafech v kapitole 6.

Na základě výsledků simulace všech vybraných variant v šesté kapitole, byly jak u symetrického převodníku napětí na proud tak i proud na napětí pro praktickou realizaci vybrány zapojení osazená integrovaným obvodem EL5167. Rozhodující byl fakt, že s tímto integrovaným obvodem dosahovaly kmitočtové charakteristiky největší šířky pásma.

Zkonstruován byl jeden kus převodníku U/U_{dif} (obr. 6.2) a jeden kus převodníku I_{dif}/U (obr.6.12). Dva kusy převodníku U/I s OPA861 již byly k dispozici na měřicím pracovišti, nebylo tedy třeba je znovu konstruovat.

V prvním kroku byly změřeny výstupní modulové a fázové kmitočtové charakteristiky převodníku U/U_{dif} . Pro ověření funkčnosti ostatních bloků bylo změřeno sériové zapojení převodníku U/U_{dif} , převodníku U/I a převodníku I_{dif}/U , čímž bylo zjištěno do jaké míry převodník ovlivňuje měřenou charakteristiku filtru. Všechny změřené charakteristiky jsou znázorněny v grafech v kapitole 7. Z měření vyplývá, že modulové charakteristiky převodníků mají velmi dobré vlastnosti, protože propustné pásmo je rovné a šířka pásma je více než 100 MHz. Ovšem z charakteristik fázových je patrné, že ke zkreslení dochází mnohem dříve. U převodníku U/U_{dif} to je nad kmitočtem 10 MHz, u kompletního sériového zapojení je to dokonce 1 MHz.

Důvody odlišností mezi simulacemi a reálným měřením jsou zaokrouhlení hodnot součástek při výběru z řady, parazitní kapacity a to, že v simulacích není možné zahrnout všechny reálné vlastnosti. Vliv také má konstrukce desek plošných spojů. Z důvodu možnosti testování byly jednotlivé bloky konstruovány každý na samostatné desce plošných spojů. Poté tyto samostatné bloky byly spojeny pomocí koaxiálních kabelů. Vhodnější by bylo kdyby všechny bloky byly na jedné desce plošných spojů. Při návrhu desky plošných spojů byla snaha o dodržení symetrie, ale ne vždy se podařilo aby vodiče šli paralelně vedle sebe. Pomohlo by také použití jiné technologie výroby desek plošných spojů. Tato technologie je vhodná pro frekvence do přibližně 100 MHz. I přes menší nedostatky jsou tyto převodníky vhodné pro laboratorní měření kmitočtových charakteristik diferenčních kmitočtových filtrů v proudovém módu, což bylo ověřeno na jednom z diferenčních filtrů, který byl dostupný na měřícím pracovišti.

Použitá literatura

- [1] *Passive voltage to current converter*. In *Scribd.com, elektronické sdílení dokumentů na internetu* [online]. 15. 2. 2009 [cit. 29. 10. 2009] Dostupné na internetu: <<http://www.scribd.com/doc/12410847/Passive-Voltage-to-Current-Converter>>.
- [2] *Passive current to voltage converter*. In *Scribd.com, elektronické sdílení dokumentů na internetu* [online]. 15. 2. 2009 [cit. 5. 11. 2009] Dostupné na internetu: <<http://www.scribd.com/doc/12410847/Passive-Current-to-Voltage-Converter>>.
- [3] Whitclock, B. *Interconnection of balanced and unbalanced equipment*. *Jensen Application Note AN003* [online]. 1995 [cit. 15. 11. 2009] Dostupné na internetu: <<http://www.jensen-transformers.com/an/an003.pdf>>.
- [4] *Balanced line technology*. In *The Douglas Self Site* [online]. 26. 7. 2001 [cit. 15. 11. 2009] Dostupné na internetu: <<http://www.dself.dsl.pipex.com/ampins/balanced/balanced.htm>>
- [5] CHRÁST, J. *Kmitočtové filtry vyšších řádů s moderními aktivními prvky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Jeřábek.
- [6] Jeřábek J., Vrba K. *Převodníky U/I a I/U s proudovými konvejory pro měření obvodu v proudovém módu*. In *Research in Telecommunication Technology 2006*. Research in Telecommunication Technology 2006. Brno: FEKT UTKO, 2006. s. 125-128. ISBN: 80-214-3243-8.
- [7] KUBÍK, M. *Plně diferenční kmitočtové filtry v proudovém módu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Jeřábek.
- [8] Intersil corporation. *Current feedback amplifier – Theory and applications*. *Application Note 9420* [online]. 1995 [cit. 25. 11. 2009] Dostupné na internetu: <<http://www.intersil.com/data/an/AN9420.pdf>>
- [9] Schmid, H. *Single-Amplifier Biquadratic MOSFET-C Filters*, Dissertation ETH Zürich, Konstanz, Series in Signal and Information Processing, Vol. 1, ISBN 3-89649-616-6, ISSN 1616-671X, 2000.

- [10] Massaroto, M., Casas, O., Ferrari, V., Pallas-Areny, R. *Improved fully differential filters*, IEEE Transactions on instrumentation and measurement, VOL. 56, NO. 6, December 2007

Seznam použitých veličin, symbolů a zkratek

Veličiny a symboly

C	[F]	elektrická kapacita
f	[Hz]	kmitočet
G	[S]	elektrická vodivost
I	[A]	elektrický proud
I_{dif}	[A]	diferenční proud
I_{IN}	[A]	vstupní proud
I_{OUT}	[A]	výstupní proud
K	[-]	přenos
p	[-]	komplexní proměnná
R	[Ω]	elektrický odpor
U	[V]	elektrické napětí
U_{dif}	[V]	diferenční napětí
U_{IN}	[V]	vstupní napětí
U_{OUT}	[V]	výstupní napětí
Y	[S]	admitance

Zkratky

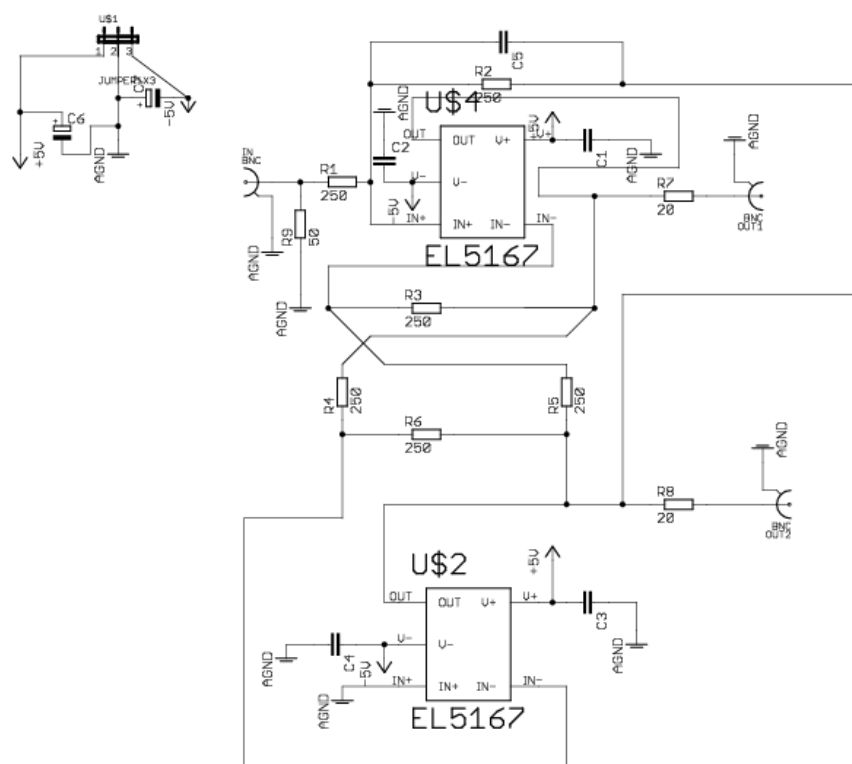
CFA	operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou (C urrent F eedback A mplifier)
CMRR	potlačení souhlasného rušivého signálu (C ommon – M ode R ejection R atio)
OZ	operační zesilovač
VFA	operační zesilovač s napěťovou zpětnou vazbou (V oltage F eedback A mplifier)

Seznam příloh

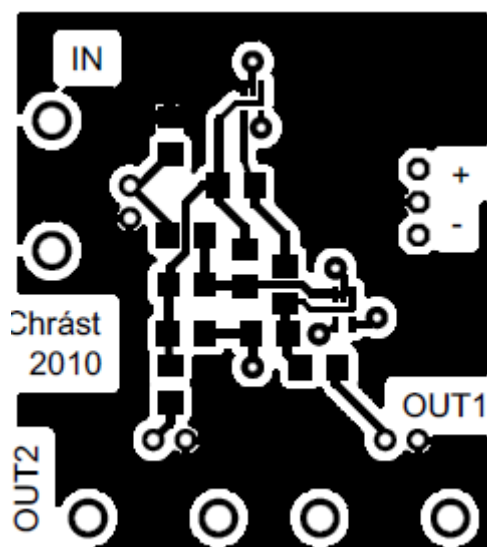
Příloha 1: Schémata a layout realizovaných obvodů z programu EAGLE

Příloha 2: Fotografie realizovaných obvodů

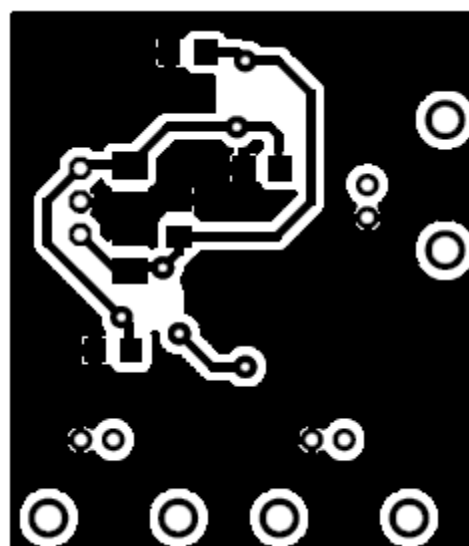
Příloha 1



Obr. 1. Schéma realizovaného převodníku U/Udif v programu EAGLE

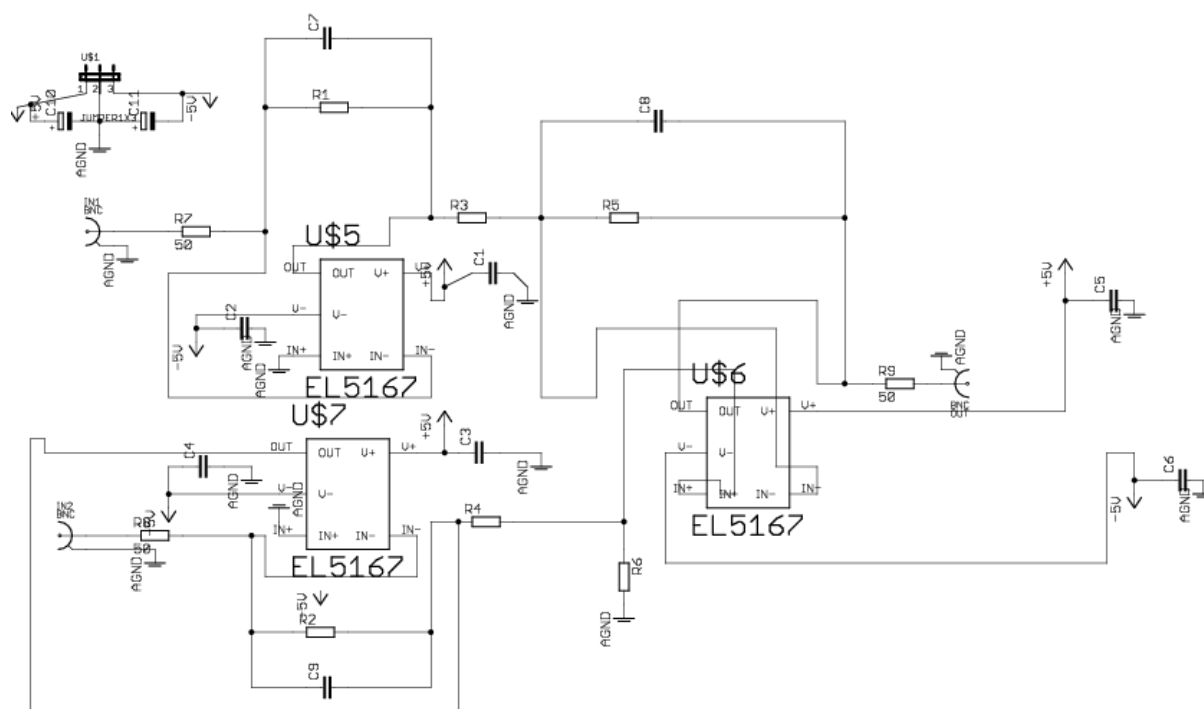


a)

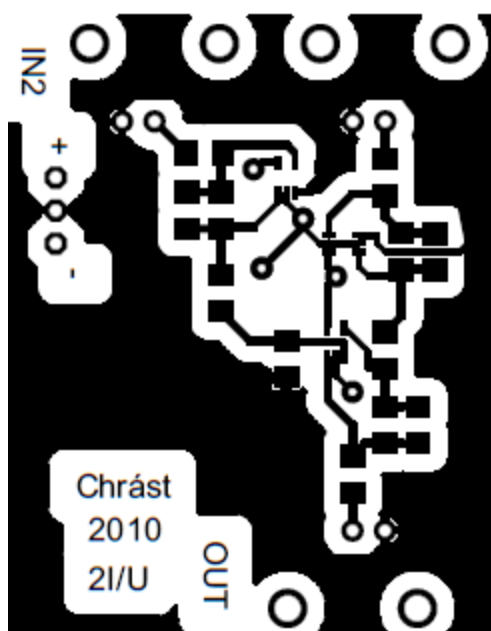


b)

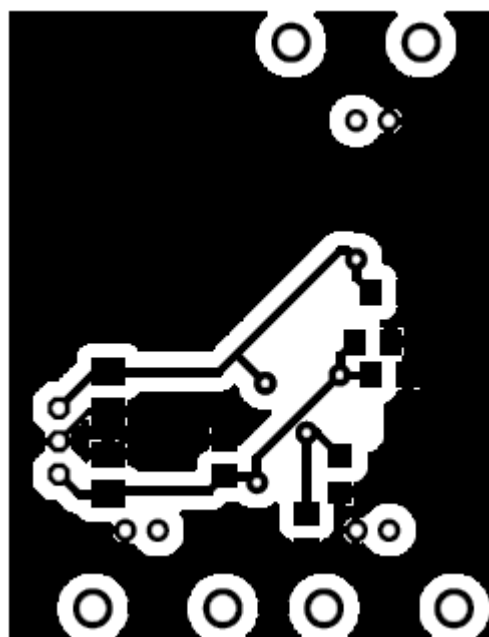
Obr. 2. Layout desky plošných spojů obvodu U/Udif z programu EAGLE, a) TOP , b) BOTTOM



Obr. 3. Schéma realizovaného převodníku Idif/U v programu EAGLE



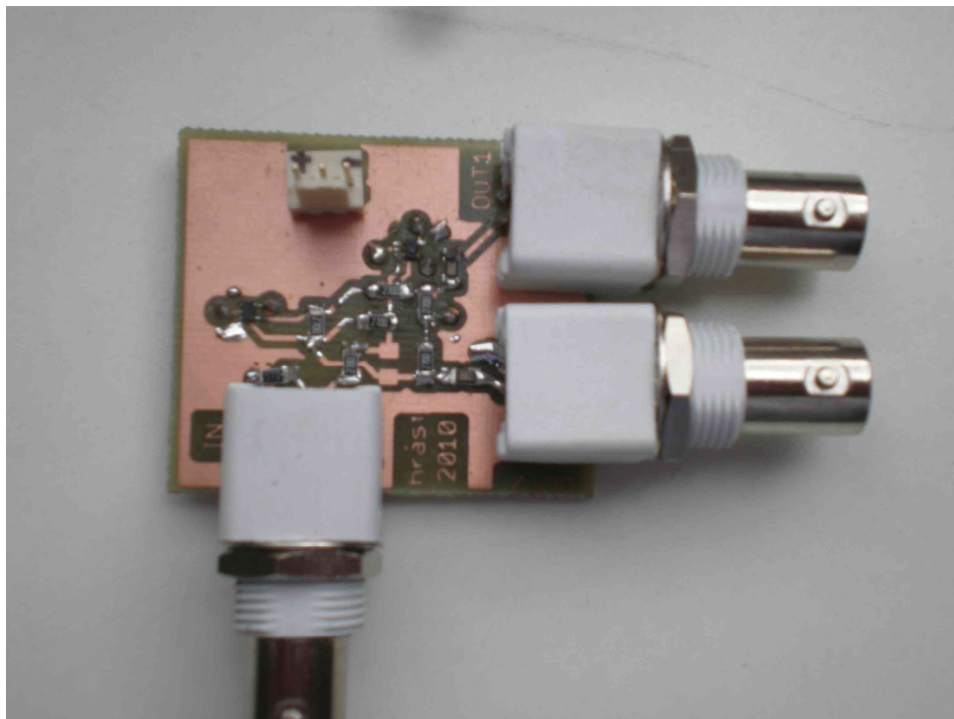
a)



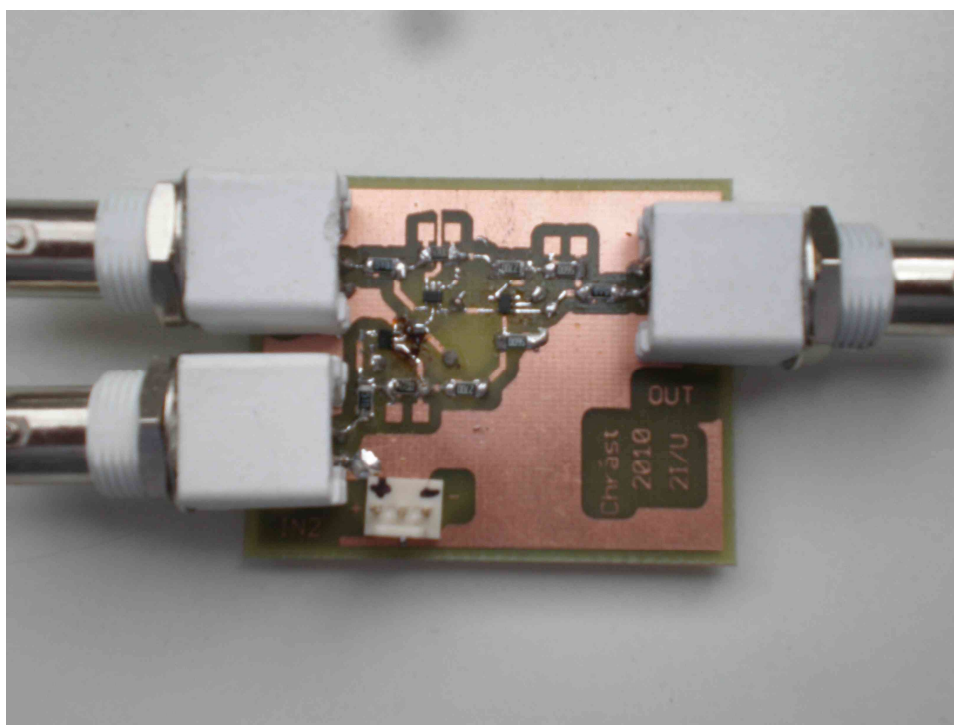
b)

Obr. 4. Layout desky plošných spojů obvodu Idif/U z programu EAGLE, a) TOP , b) BOTTOM

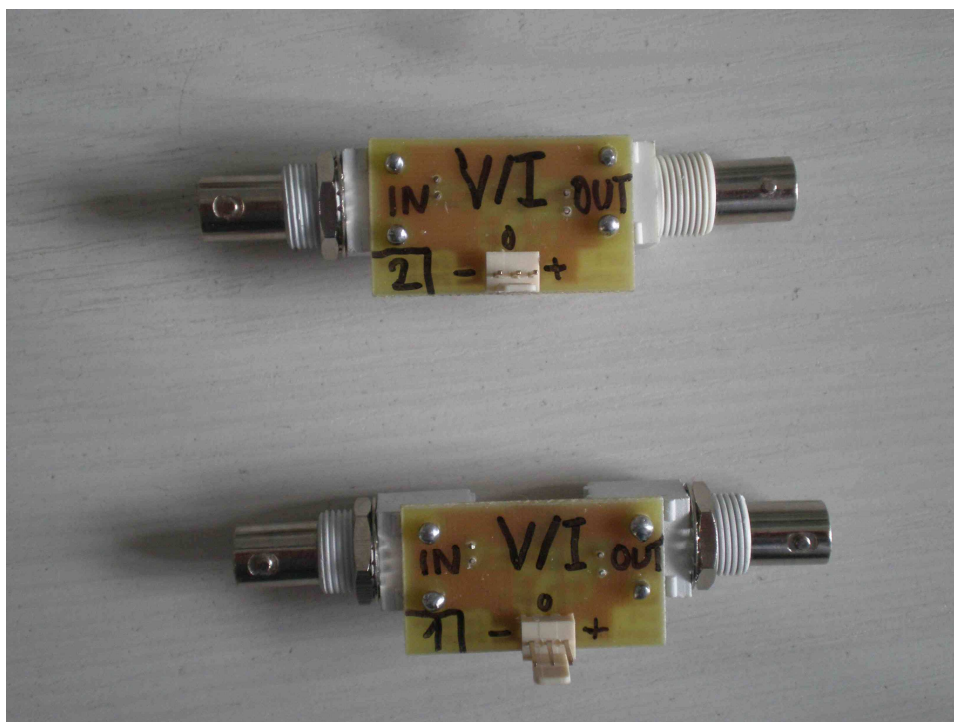
Příloha 2



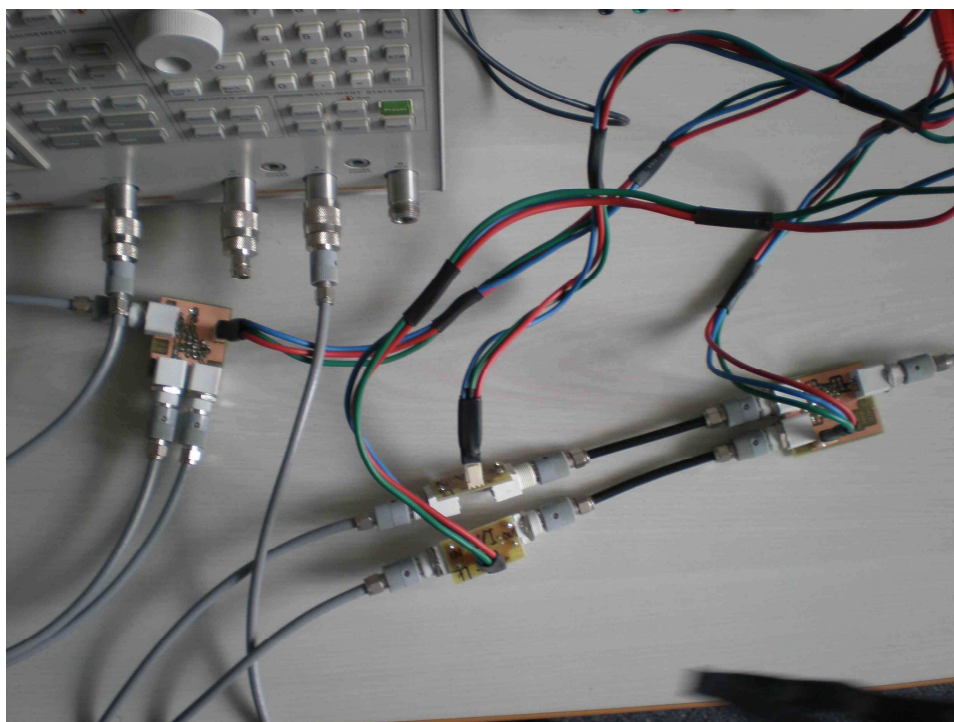
Obr. 5. Fotografie realizovaného převodníku U/Udif s EL5167



Obr. 6. Fotografie realizovaného převodníku Idif/U



Obr. 7. Fotografie použitých převodníků U/I



Obr. 8. Fotografie sériového zapojení všech realizovaných bloků