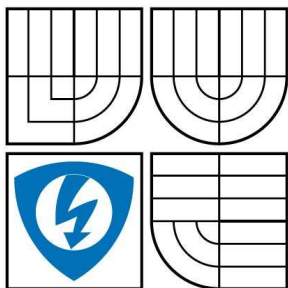


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## VŠESTRANNÉ AUTONOMNÍ OBVODOVÉ EKVIVALENTY PLOVOUCÍCH A UZEMNĚNÝCH PASIVNÍCH PRVKŮ

VERSATILE AUTONOMOUS CIRCUIT EQUIVALENTS FOR REALISING FLOATING AND  
GROUNDED PASSIVE ELEMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. RADIM ŠTĚPÁN

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. NORBERT HERENCŠÁR, Ph.D.

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav telekomunikací**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Telekomunikační a informační technika**

**Student:** Bc. Radim Štěpán

**ID:** 72860

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Všestranné autonomní obvodové ekvivalenty plovoucích a uzemněných  
pasivních prvků**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Pomocí netradičních obvodových prvků navrhnete takové všestranné autonomní obvody, které umožňují realizovat prvek typu FDNR (floating frequency dependent negative resistance) a plovoucí/uzemněné kapacity, indukčnosti či jejich kombinaci. Při teoretickém rozboru navržených zapojení použijte program SNAP. Reálné chování ověřujte analýzou v programu OrCAD PSPICE a jako simulační modely použijte bipolární nebo unipolární implementaci vybraných aktivních prvků.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BRUTON, L. T. RC Active Circuits - Theory and Design. New Jersey, Prentice - Hall 1980, ISBN: 0-1375-3467-1.
- [2] DELIYANNIS, T., SUN, Y., FIDLER, J.K. Continuous-Time Active Filter Design. New York, CRC Press, 1999, ISBN: 0-8493-2573-0.
- [3] YUCE, E. On the realization of the floating simulators using only grounded passive components. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, vol. 49, no. 2, pp. 161-166.
- [4] KACAR, F., METIN, B., KUNTMAN, H. A new CMOS dual-X second generation current conveyor (DXCCII) with an FDNR circuit application. AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 64, no. 8, pp. 774-778, 2010.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 26.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Norbert Herencsár, Ph.D.

**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 následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Bibliografická citace**

ŠTĚPÁN, R. *Všestranné autonomní obvodové ekvivalenty plovoucích a uzemněných pasivních prvků: diplomová práce*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Norbert Herencsár, Ph. D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma všestranné autonomní obvodové ekvivalenty plovoucích a uzemněných pasivních prvků 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

Rád bych zde poděkoval svému školiteli Ing. Norbertu Herencsárovi, Ph.D., za podporu, poskytnutí literatury a odborné rady během práce.

## **Anotace**

Tato práce se zabývá návrhem všestranných autonomních obvodových ekvivalentů plovoucích a uzemněných pasivních prvků pomocí moderních aktivních stavebních bloků, jako jsou proudové a napěťové konvejory všech tří generací. Proudové konvejory patří mezi důležité stavební bloky v proudovém módu. Z hlediska zpracování signálu je lze charakterizovat jako smíšený stavební blok. Tyto prvky mohou dnes nahradit v mnoha případech již nedostačující operační zesilovače. Na základě duality proudového a napěťového módu byl definován napěťový konvektor. Tento prvek by mohl být vhodným aktivním prvkem pro obvody pracující v napěťovém módu.

Při realizaci zapojení vycházíme z obecného autonomního obvodu. Volbou daných admitancí lze realizovat prvek typu FDNR (floating frequency dependent negative resistance), plovoucí kapacitor, plovoucí induktor a konvertor uzemněné admitance na plovoucí admitance.

V praktické části jsou popsána zapojení, která splňují zadané požadavky. Navržené prvky jsou simulovány v porovnání s ideálními a následně aplikovány na příčkových filtrech. Pásmová propust druhého řádu s navrženou cívkou byla prakticky sestavena a experimentálně změřena v laboratoři. Výsledky tohoto měření byly srovnány se simulacemi získanými za použití ideálních a reálných modelů proudových a napěťových konvektorů.

## **Klíčová slova**

Proudový konvektor, napěťový konvektor, plovoucí kapacitor, plovoucí induktor, prvek FDNR, kmitočtový filtr.

## **Abstract**

This thesis deals with a proposal of versatile autonomous circuit equivalents of floating and grounded passive elements by means of modern active tectonic blocks, such as current and voltage conveyors of all three generations. Current conveyors range as essential tectonic blocks in a current mode. Concerning signal processing, it encompasses a mixed tectonic block. In most cases, these elements may be substituted for presently insufficient operating amplifiers. The voltage conveyor was defined on the basis of duality of current and voltage modes. This element could be selected as a suitable active component for circuits operating in a voltage mode.

Implementing the connection, a general autonomous circuit is taken into account. By selecting given admittances, a FDNR (floating frequency dependent negative resistance) element, floating capacitance, floating inductance and ground to floating admittance converter may be implemented.

The practical part describes connections which fulfill given requirements. The suggested elements are simulated in comparison with ideal elements and subsequently, they are applied to a frequency filter. The second order filter with a proposed induction coil was practically assembled and experimentally measured in a laboratory. The measured results were compared to simulations received by the use of ideal and real models of current and voltage conveyors.

## **Keywords**

Current conveyor, voltage conveyor, floating inductance, floating capacitance, FDNR, frequency filter.

# Obsah

ÚVOD .....	10
<b>1. KMITOČTOVÉ FILTRY .....</b>	<b>11</b>
1.1 TYPY FILTRŮ .....	11
1.2 PŘENOSOVÁ FUNKCE.....	12
1.3 ŘÁD FILTRU.....	13
1.4 APROXIMACE .....	14
<b>2. PROUDOVÉ KONVEJORY .....</b>	<b>16</b>
2.1 PROUDOVÝ KONVEJOR PRVNÍ GENERACE CCI.....	17
2.2 PROUDOVÝ KONVEJOR DRUHÉ GENERACE CCII.....	17
2.3 PROUDOVÝ KONVEJOR TŘETÍ GENERACE CCIII .....	18
2.3 DIFERENČNÉ NAPĚŤOVÝ PROUDOVÝ KONVEJOR DVCC.....	19
2.4 ZOBECNĚNÝ PROUDOVÝ KONVEJOR GCC.....	19
2.5 UNIVERZÁLNÍ PROUDOVÝ KONVEJOR UCC.....	21
2.6 REÁLNÝ MODEL UCC .....	23
<b>3. NAPĚŤOVÉ KONVEJORY .....</b>	<b>25</b>
3.1 ZOBECNĚNÝ NAPĚŤOVÝ KONVEJOR GVC .....	25
3.2 UNIVERZÁLNÍ NAPĚŤOVÝ KONVEJOR UVC .....	26
3.3 REÁLNÝ MODEL UVC .....	28
<b>4. REALIZACE OBVODU POMOCÍ ZOBECNĚNÉHO PROUDOVÉHO KONVEJORU .....</b>	<b>29</b>
4.1 REALIZACE PLOVOUCÍHO KONDENZÁTORU .....	32
4.2 REALIZACE PLOVOUCÍ CÍVKY .....	32
4.3 REALIZACE KONVERTORU UZEMNĚNÉ ADMITANCE NA PLOVOUCÍ ADMITANCI.....	32
4.4 REALIZACE PRVKU FDNR.....	32
4.5 POČÍTAČOVÉ OVĚŘENÍ NÁVRHU .....	33
4.6 APLIKACE NAVRHNUTÉ CÍVKY NA PŘÍČKOVÉM FILTRU DRUHÉHO ŘÁDU .....	34
<b>5. NÁVRH OBVODU POMOCÍ ZOBECNĚNÝCH PROUDOVÝCH A NAPĚŤOVÝCH KONVEJORŮ.....</b>	<b>37</b>
5.1 REALIZACE PLOVOUCÍHO KONDENZÁTORU .....	38
5.2 REALIZACE PLOVOUCÍ CÍVKY .....	39
5.3 REALIZACE KONVERTORU UZEMNĚNÉ ADMITANCE NA PLOVOUCÍ ADMITANCI.....	39
5.4 REALIZACE PRVKU FDNR.....	39
5.5 NÁVRH S NEIDEÁLNÍMI PROUDOVÝMI A NAPĚŤOVÝMI KONVEJORY .....	40
5.6 POČÍTAČOVÉ OVĚŘENÍ NÁVRHU .....	40
5.6.1 Simulace plovoucího kondenzátoru.....	41
5.6.2 Simulace plovoucího induktoru.....	41
5.7 APLIKACE NAVRŽENÉ CÍVKY NA PŘÍČKOVÉM FILTRU DRUHÉHO ŘÁDU .....	42
5.8 APLIKACE NAVRŽENÝCH PRVKŮ NA PŘÍČKOVÉM FILTRU ČTVRTÉHO ŘÁDU .....	44
5.8.1 Přenosová funkce filtru .....	44
5.8.2 Výpočet hodnot pro plovoucí kapacitory.....	45
5.8.3 Výpočet hodnot pro uzemněné induktory .....	45
5.9 MODIFIKACE OBVODU ZA POMOCÍ DVCC.....	46
<b>6. PRAKTICKÁ REALIZACE .....</b>	<b>49</b>
6.1 REÁLNÉ CHOVÁNÍ NAVRŽENÉHO OBVODU .....	49
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>52</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>54</b>



<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>56</b>
<b>PŘÍLOHY: .....</b>	<b>58</b>
PŘÍLOHA I: KOMBINACE KOEFICIENTŮ A VOLBA AKTIVNÍCH PRVKŮ .....	58
PŘÍLOHA II: PRAKTICKÁ REALIZACE ZAPOJENÍ V EAGLU .....	64

## Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh nových zapojení autonomních obvodů, jejichž pomocí lze realizovat plovoucí a uzemněné pasivní prvky. Příchod nových typů integrovaných obvodů nám umožňuje navrhnout syntetické indukčnosti, které mohou být použity místo objemných cívek při návrhu oscilátorů, frekvenčních filtrů a pro rušení parazitních vlivů. V úvodní části práce bude uveden přehled základních vlastností filtrů a jejich členění. Následující kapitola je zaměřena na definici a popis proudových konvektorů, které jsou známy od roku 1968, kdy byly představeny Adelem S. Sedrou a K. C. Smithem. Po jejich postupném vývoji byly definovány tři základní generace a na přelomu dvacátého století vznikaly další varianty, které se lišily počtem a typem vstupů a výstupů (např. invertující, diferenční vstup). Výzkum proudových konvektorů ukázal možnost jejich praktického využití zejména v oblasti analogového zpracování signálů. Jejich předností je šířka pásma, odstup signálu od šumu, rychlost a nízké napájecí napětí.

Přes výhody proudových konvektorů je nutné si uvědomit, že jsou určeny zejména pro obvody pracující v proudovém módu. Avšak v dnešní době nejsou mezi vývojovými praconíky natolik rozšířeny, aby plně nahradily zapojení pracující v napěťovém módu. Z tohoto důvodu byl na základě duality definován napěťový konvektor.

Cílem diplomové práce je navrhnout za pomoci proudových a napěťových konvektorů nová zapojení. Pomocí navrženého autonomního obvodu lze změnou admitancí realizovat prvek typu FDNR (floating frequency dependent negative resistance), plovoucí kapacitor, plovoucí induktor a konvertor uzemněné admitance na plovoucí admitanci.

# 1. Kmitočtové filtry

Kmitočtové filtry [1], [2], patří mezi základní stavební bloky pro zpracování signálu a často se s nimi setkáváme v mnoha oblastech elektrotechniky. Jsou to převážně lineární dvojbrany, které umožňují propouštět určité složky spektra zpracovávaných signálů v určitém pásmu kmitočtů, které nazýváme propustné pásmo, buď s malým útlumem, bez útlumu, nebo je zesilují. Mimo toto propustné pásmo jsou harmonické složky signálů naopak silně utlumovány v tzv. nepropustném pásmu.

Jako příklad použití můžeme uvést např. antialiasingový filtr, který se používá při převodu analogového signálu na digitální pro odrušení nežádoucích signálů. Tyto složky spektra se vyskytují na vyšších kmitočtech a ruší nízkofrekvenční signál.

Při průchodu signálu filtrem často dochází k jeho časovému zpoždění, které je způsobeno fázovým posuvem procházejících harmonických kmitočtových složek signálu. Tyto vlivy můžeme popsat fázovou kmitočtovou charakteristikou. Fázová charakteristika vyjadřuje závislost mezi fázovým posuvem  $\varphi$  a podílem měřené frekvence vůči frekvenci maximální  $f/f_0$ . Časové zpoždění je také zřejmé při znázornění signálu a vlastností filtru v časové oblasti, například jako odezva na jednotkový skok. V časové oblasti se fázové vlivy filtru na signál v propustném kmitočtovém pásmu projevují např. jako překmity či zvlnění průběhu signálu. Uvedené vlivy můžeme správným návrhem filtru minimalizovat. Někdy se ale setkáme s případy, kdy lze těchto vlastností filtrů využít např. ve fázovacích a zpožďovacích obvodech.

## 1.1 Typy filtrů

Na základě kmitočtové charakteristiky lze filtry rozdělit na tyto typy:

- DP – dolní propust – propouští složky signálu s kmitočty nižšími než mezní kmitočet  $f_0$ ,
- HP – horní propust – propouští složky signálu o kmitočtech vyšších než je mezní kmitočet  $f_0$ ,
- PP – pásmová propust – propouští složky signálu mezi mezním dolním a horním kmitočtem  $f_1$  a  $f_2$ ,

- PZ – pásmová zadrž – nepropouští složky signálu mezi mezním dolním a horním kmitočtem  $f_1$  a  $f_2$ ,
- FČ – fázovací článek využívá jenom časové zpoždění signálu.

## 1.2 Přenosová funkce

Mezi základní atributy filtru patří jeho přenosová charakteristika [1], [3], kterou lze pro daný kmitočet  $f$  vyjádřit komplexním výrazem:

$$K_u = K_u \cdot e^{j\varphi} = \frac{U_2 e^{j\varphi_2}}{U_1 e^{j\varphi_1}}. \quad (1.1)$$

Uvedený výraz se dá také rozdělit na reálnou a imaginární část. Výhodnější je ale vyjádření přenosu pomocí modulu argumentu:

$$K_U = \frac{U_2}{U_1}, \quad \varphi = \varphi_2 - \varphi_1, \quad (1.2)$$

kde modul přenosu se často udává v logaritmické míře. Modul  $K_U$  je poměr amplitudy výstupního signálu ku amplitudě vstupního signálu a argument  $\varphi$  je výsledný fázový posuv mezi výstupním a vstupním signálem.

Pro praktické použití je výhodné přenosové vlastnosti vyjadřovat jako funkci kmitočtu, potom můžeme vypočítat odpovídající přenos pro každý kmitočet. Závislost přenosu na kmitočtu je komplexní funkcí kmitočtu  $K(j\omega)$  nebo  $K(p)$ .

$$K(j\omega) = \frac{\sum_{k=0}^{k=m} a_k (j\omega)^k}{\sum_{i=0}^{i=n} b_i (j\omega)^i} = \frac{a_0 + a_1 j\omega + \dots + a_{m-1} (j\omega)^{m-1} + a_m (j\omega)^m}{b_0 + b_1 j\omega + \dots + b_{n-1} (j\omega)^{n-1} + b_n (j\omega)^n}. \quad (1.3)$$

$$K(p) = \frac{\sum_{k=0}^{k=m} a_k (p)^k}{\sum_{i=0}^{i=n} b_i (p)^i} = \frac{a_0 + a_1 p + \dots + a_{m-1} p^{m-1} + a_m p^m}{b_0 + b_1 p + \dots + b_{n-1} p^{n-1} + b_n p^n}. \quad (1.4)$$

Pro popis přenosové funkce kmitočtového filtru používáme Laplaceův operátor  $p$ , kde mocnina operátoru značí řád filtru. Pro sumarizaci jsou v tab.1.1 uvedené přenosové funkce kmitočtových filtrů prvního a v tab.1.2 druhého řádu.

**Tab. 1.1:** Přenosové funkce kmitočtových filtrů prvního řádu

Horní propust 1. řádu:	$K(p) = \frac{a_1 p}{b_1 p + b_0},$
Dolní propust 1. řádu:	$K(p) = \frac{a_0}{b_1 p + b_0},$

**Tab. 1.2:** Přenosové funkce kmitočtových filtrů druhého řádu

Horní propust 2. řádu:	$K(p) = \frac{a_2 p^2}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0},$
Dolní propust 2. řádu:	$K(p) = \frac{a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0},$
Pásmová propust 2. řádu:	$K(p) = \frac{a_1 p}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0},$
Pásmová zadrž 2. řádu:	$K(p) = \frac{a_2 p^2 + a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0},$
Fázovací členek 2. řádu:	$K(p) = \frac{a_2 p^2 - a_1 p + a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}.$

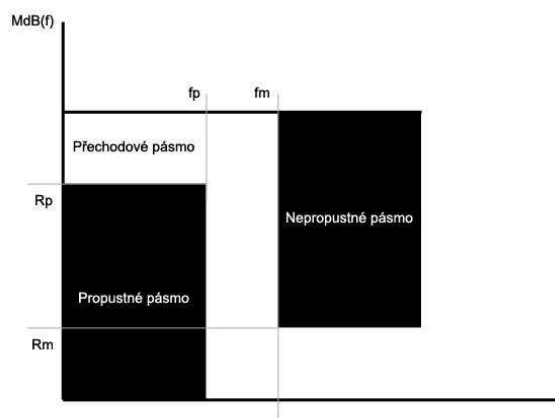
### 1.3 Řád filtru

Dalším kritériem, které je třeba při návrhu zvolit je řád filtru [3]. Ten je určen počtem kapacitorů a indukčností a je dán poklesem pásma propustnosti do pásma nepropustnosti:

- 1. řád    20dB/dekádu
- 2. řád    40dB/dekádu
- $n$ . řád     $n \cdot 20$ dB/dekádu

Obecně můžeme říci, že při zvyšování řádu filtru se zvyšuje strmota kmitočtové charakteristiky a tím dochází k větší strmosti přechodu mezi propustnými a nepropustnými kmitočtovými pásmy. Z toho plyne, že při zvyšujícím se řádu se modulová charakteristika blíží ideálnímu stavu, bohužel u filtrů vyšších řádů se zvyšuje i cena a nároky na realizaci. Vždy se tedy snažíme, aby byl volen nejnižší řád filtru, ten ale musí zabezpečit i požadované potlačení pásma.

Skutečná přenosová charakteristika v praxi nemůže mít ideální pravoúhlý průběh, protože filtr není složen z ideálních součástek. Příklad obecného tolerančního pásma dolní propusti je na obr. 1.1.



**Obr. 1.1:** Toleranční pásmo dolní propusti

Na obr. 1.1 je  $R_p$  povolené zvlnění v propustném pásmu,  $R_m$  je minimální útlum v nepropustném pásmu,  $f_p$  je mez propustného pásma,  $f_m$  je mez nepropustného pásma a  $M_{dB}(f) = 20 \log M(f)$ .

## 1.4 Aproximace

Tvar přenosových charakteristik je dán řádem filtru a typem filtru. Úlohou je nalézt takovou přenosovou funkci, která splňuje zadané toleranční schéma[4]. Můžeme ji rozdělit na :

*Standardní* - vychází z analytického řešení charakteristické rovnice filtru a je u nich volena charakteristická funkce  $\varphi(p)$ :

$$K(p)K(-p) = \frac{1}{1 + \varphi(p)\varphi(-p)}. \quad (1.5)$$

*Nestandardní* - velmi často předpokládá výchozí odhad přenosové funkce. Její průběh se následně upravuje na požadovaný tvar pomocí numerických metod.

U Standardních aproximací se nejčastěji setkáme se třemi typy:

**Besselova** – (často také uváděna jako Thomsonova) Filtr navržený pomocí Besselovy aproximace vykazuje optimální přechodovou charakteristiku. Je volena při požadavku konstantního skupinové zpoždění (v praxi je upravena do normovaného modulového tolerančního pole se zvlněním 3 dB v propustném pásu). Aproximaci dle Bessela používáme potřebujeme-li co nejlépe zachovat původní signál. Vykazuje nejlepší odezvu na skokovou změnu napětí a nezávislý přenos do  $0,5 f_0$ , ale strmost charakteristik je relativně malá.

**Butterworthova** – je nejpoužívanější, představuje určitý kompromis mezi žádanou linearitou fázové charakteristiky a možným útlumem, při nízkém řádu filtru. Při zvlnění 3 dB v propustném pásmu lze snadno nalézt potřebný řád filtru a to přímo z modulových charakteristik. Vyznačuje se strmým přechodem do oblasti nepropustnosti a nezávislým přenosem až do  $0,7 f_0$ .

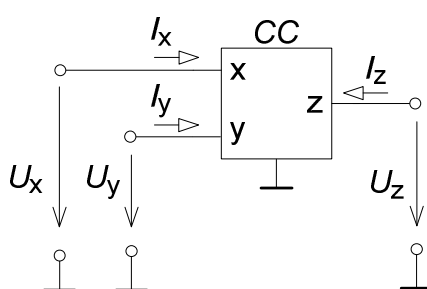
**Čebyševova** – touto aproximací lze realizovat nejstrmější přenos do nepropustného pásma (tzn. při nízkém řádu filtru dostatečné potlačení přenosu). Nevýhodou Čebyševovy aproximace je, že propustném pásmu kmitočtů není monotónní, nýbrž má zvlněný charakter s konstantním rozkmitem. Dalším negativem je velká nelinearita fázové charakteristiky (vyvolaná výše popsanými překmity) způsobující větší odchylky skupinového zpoždění. Na skokovou změnu je pomalá odezva, ale při volbě malého zvlnění modulové charakteristiky se z části sníží strmost a odezva na jednotkový skok se zlepši. Zvyšování řádu filtru zvětšuje nerovnoměrnosti v propustném pásmu.

V praxi se můžeme setkat i s jinými typy, ty vychází ze základních druhů aproximací a jsou to např. Feistelova-Unbehauenova, inverzní Čebyševova atd. Výjimečně se setkáme s dalšími typy aproximací, které jsou používány zejména ke speciálním účelům. Problematika návrhu filtrů je značně složitá a je zpracována např. v [5].

Požadavky, které klademe na filtr je nutno volit vždy s jistým kompromisem, protože často působí proti sobě. Je-li vyžadována charakteristika s maximální strmostí přechodu, potom se zvětšuje zvlnění charakteristiky v propustné části filtru.

## 2. Proudové konvejory

Při zpracování signálu v proudovém módu se velmi často setkáváme se stavebními prvky nazývanými proudový konvektor [6], [7] (CC, Current Conveyor). Jeho schematická značka je uvedena na obr. 2.1. Jedná se o moderní funkční mnohobraný (nejčastěji čtyřbran), s různými vztahy mezi branovými veličinami. Hlavní důvod upřednostnění těchto prvků pracujících v tzv. proudovém či smíšeném módu je větší šířka pásma, proto se často využívají ve vyšších kmitočtových pásmech. Můžeme se setkat se zapojením konvektoru jako konvenčního operačního zesilovače, který nám umožňuje realizovat i složitější obvodové funkce. Jeho univerzální použití je v řadě aplikací, může nám například nahradit operační zesilovač při použití v napěťovém módu, nebo jím tyto aplikace můžeme v určitých případech převést do proudového módu.



**Obr. 2.1:** Schematická značka proudového konvektoru

V poslední době se výzkum zabývá použitím tzv. vícebranových (taky více-výstupových) konvektorů a dalších moderních aktivních bloků, jelikož pro konkrétní aplikace je jediný výstup nedostačující.

Bohužel se dnes zatím konvejory příliš neprosadily v hromadné komerční výrobě jako diskretní integrované obvody. Z uvedeného důvodu lze nyní proudové konvejory najít ve velmi omezeném počtu mezi komerčně dostupnými součástkami.



## 2.1 Proudový konvektor první generace CCI

První proudový konvektor byl navržen v roce 1968 Adelem S. Sedrou a K. C. Smithem jako proudový konvektor první generace [7] (first generation current conveyor ). Byl to původně tříbranový imitační konvertor realizovaný pomocí bipolární technologie.

Jeho funkci můžeme popsat následovně. Napětí, které je přivedeno na vstup Y, bude na výstupní svorce X identické, stejně tak i vstupní proud tekoucí do svorky X se ozrcadí na svorku Y. Z toho vyplývá, že napětí je nezávislé na proudu procházejícím přes tyto svorky. Proud tekoucí do vstupu X se zrcadí na výstup Z s kladným, nebo záporným znaménkem podle toho zda se jedná o pozitivní či negativní typ. U všech generací se můžeme se také setkat se zapojením, které umožňuje využití jedné kladné a druhé záporné výstupní brány. Jeho funkce je definována maticí (2.1)

$$\begin{pmatrix} U_x \\ I_y \\ I_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ \pm 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

## 2.2 Proudový konvektor druhé generace CCII

V roce 1970 byl popsán CCII [8] (second generation current conveyor). U těchto konvektorů neprotéká proud svorkou Y. V praxi se tento typ konvektorů jeví užitečnější než CCI. Svorka Y vykazuje nekonečnou vstupní impedanci. Napětí na svorce X sleduje potenciál svorky Y, svorka X vykazuje nulovou vstupní impedanci a proud tekoucí přes svorku X je opět přenášen na výstup Z. Proud tekoucí svorkou Z má stejnou orientaci jako proud svorkou X konvektor CCII+ nebo opačnou polaritu v případě konvektoru CCII-. Počátkem devadesátých let začal prudký rozvoj týkající se možnosti využití těchto prvků v ARC filtrech, kde by mohl nahradit proudový konvektor klasický operační zesilovač. Konvektor CCII je také velmi výhodné používat pro nízkonapěťové aplikace. Tento prvek můžeme popsat hybridní maticí (2.2)

$$\begin{pmatrix} U_x \\ I_y \\ I_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \pm 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Reálný proudový konvektor druhé generace nezajišťuje přenos  $a = 1$  a  $c = \pm 1$ , ale o něco nižší. Při návrhu je třeba uvažovat s těmito neidealitami. Pro reálný CCII dostáváme matici přenosů (2.3)

$$\begin{pmatrix} U_x \\ I_y \\ I_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \alpha_{xi}(p) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \pm \gamma_{xi}(p) & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Koeficienty matice jsou:

$$\alpha_{xi}(p) = \frac{\alpha_{x0i}}{1 + \tau_{\alpha_{xi}} p}, \quad (2.4)$$

$$\gamma_{xi}(p) = \frac{\gamma_{x0i}}{1 + \tau_{\gamma_{xi}} p}. \quad (2.5)$$

### 2.3 Proudový konvektor třetí generace CCIII

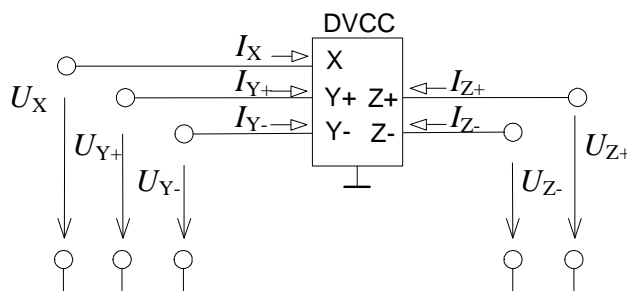
Třetí generace [9] (CCIII) (third generation current conveyor) byla popsána až v roce 1995 Fabrem. Je podobný typu CCI, liší se pouze v opačném přenosu proudu mezi svorkami X a Y. Tento aktivní prvek můžeme popsat maticovou rovnicí (2.6).

$$\begin{pmatrix} U_x \\ I_y \\ I_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ \pm 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

## 2.3 Diferenčně napěťový proudový konvektor DVCC

Diferenční napěťově proudový konvektor DVCC [6] (differential voltage current conveyor) patří mezi další univerzální stavební bloky. Jeho využití je v aplikacích, které vyžadují plovoucí vstupy. Ze schematické značky na obr. 2.2 vyplývá že se jedná o pětibran, který má dvě vysokoimpedanční svorky Y (diferenční vstup), jednu nízkoimpedanční svorku X a dva komplementární proudové výstupy Z. Konvektor DVCC je definována maticovou rovnicí (2.7).

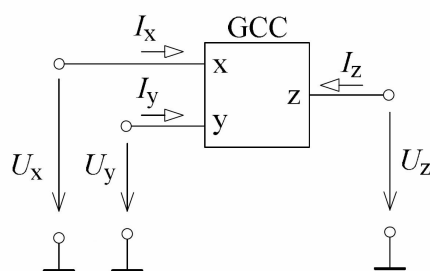
$$\begin{pmatrix} V_x \\ I_{y1} \\ I_{y2} \\ I_{z1} \\ I_{z2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_x \\ V_{y1} \\ V_{y2} \\ V_{z1} \\ V_{z2} \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$



**Obr. 2.2:** Schematická značka DVCC

## 2.4 Zobecněný proudový konvektor GCC

Při návrhu nových zapojení s aktivními prvky můžeme využít zobecněný typ proudového konvektoru (GCC) [10]. Jedná se o trojbran, označený svorkami x, y, z, jak můžeme vidět na jeho schematické značce na obr 2.3, kde x je proudová brána, y je napěťová brána a z značí výstupní bránu. Vztahy mezi jednotlivými branami jsou definovány hybridní maticí (2.8).



**Obr. 2.3:** Zobecněný tříbranový proudový konvektor.

$$\begin{pmatrix} U_x \\ I_y \\ I_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix}. \quad (2.8)$$

Na základě definiční matice (2.8) můžeme definovat

- bránu y - jako vstupní napěťově-proudovou s vysokou impedancí (ideálně nekonečnou)
- bránu z - jako výstupní proudovou s vysokou impedancí (ideálně nekonečnou)
- bránu x - jako vstupní proudovou-výstupní napěťovou (dnes má častěji charakter vstupní proudové brány) s nízkou impedancí (ideálně 0)

Z matice (2.8) je dále patrné, že napětí mezi vstupními svorkami x a y má přenos a. Člen b označuje přenos proudu mezi svorkami x a y, a člen c definuje přenos proudu mezi vstupní svorkou x na výstupní svorku z. Pomocí GCC lze realizovat konkrétní aktivní prvky volbou koeficientů a, b, c. Všechny typy a generace aktivních prvků vytvořených pomocí GCC jsou definovány v tab. 2.1.

**Tab. 2.1:** Tabulka všech proudových konvektorů pomocí GCC [10]

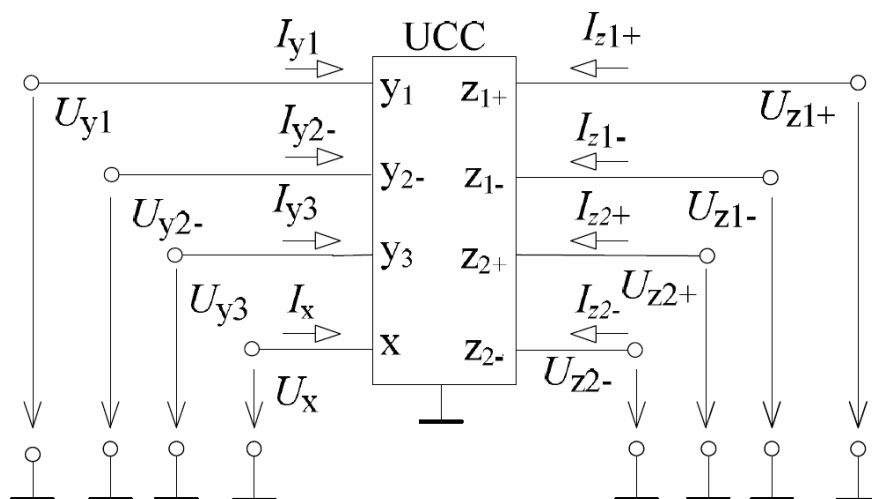
Typy proudových konvektorů	Přenosové koeficienty		
	a	b	c
CCI+	1	1	1
CCI-	1	1	-1
ICCI+	-1	1	1
ICCI-	-1	1	-1
CCII+	1	0	1

**Tab. 2.1:** Tabulka všech proudových konvektorů pomocí GCC [10] (pokračování)

CCII-	1	0	-1
ICCI+	-1	0	1
ICCI-	-1	0	-1
CCIII+	1	-1	1
CCIII-	1	-1	-1
ICCIII+	-1	-1	1
ICCIII-	-1	-1	-1

## 2.5 Univerzální proudový konvektor UCC

Pro realizaci všech definovaných generací a typů proudových konvektorů vyplývajících z definice GCC a i některých jiných typů proudových konvektorů (DVCC - differential voltage current conveyor, DDCC - differential difference current conveyor) byla navržena koncepce univerzálního proudového konvektoru [10], [11] (UCC). Schematická značka obvodu UCC je na obr. 2.4.



**Obr. 2.4:** Schematická značka UCC.

Jedná se obecný osmibran, který má tři vysokoimpedanční napět'ové vstupy ( $y_{1+}$ ,  $y_{2-}$  a  $y_{3+}$ ), jeden nízkoimpedanční proudový vstup  $x$  a čtyři proudové výstupy ( $z_{1+}$ ,  $z_{2+}$ ,  $z_{1-}$ ,  $z_{2-}$ ). Výstupy  $z_{1-}$ ,  $z_{2-}$  jsou inverzní vůči výstupům  $z_{1+}$ ,  $z_{2+}$ . Vztahy mezi jednotlivými svorkami jsou popsány v hybridní rovnici (2.9).

$$\begin{pmatrix} I_{y1} \\ I_{y2-} \\ I_{y3} \\ U_x \\ I_{z1+} \\ I_{z1-} \\ I_{z2+} \\ I_{z2-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{y1} \\ U_{y2-} \\ U_{y3} \\ I_x \\ U_{z1+} \\ U_{z1-} \\ U_{z2+} \\ U_{z2-} \end{pmatrix}. \quad (2.9)$$

První generaci neinvertujících a invertujících proudových konvektorů (CCI, ICCI) lze realizovat tak, že se použije vstup  $y_1$  a jako proudový vstup se využije svorka  $x$ . Proudové výstupy máme k dispozici čtyři, u CCI nebo ICCI se musí propojit jeden volný pozitivní proudový výstup  $z_{1+}$ , nebo  $z_{2+}$  na použitý napěťový vstup  $y_1$ , nebo  $y_2$ . Ostatní výstupní terminály mohou být použity jako proudové výstupy. Nepoužité vstupy a výstupy se uzemní. U proudových konvektorů druhé generace (CCII+, CCII-, CCII+/-, CCII+/+, CCII-/-, ICCII+, ICCII-, ICCII+/-, ICCII+/+, ICCII-/-) je situace jednodušší, protože nemusíme propojovat žádný proudový výstup na napěťový vstup. Všechno ostatní je stejné jako u první generace. U třetí generace CC (CCIII+, CCIII-, CCIII+/-, CCIII+/+, CCIII-/-, ICCIII+, ICCIII-, ICCIII+/-, ICCIII+/+) se musí propojit jeden volný negativní proudový výstup  $z_{1-}$  nebo  $z_{2-}$  na použitý napěťový vstup  $y_{1+}$  nebo  $y_{2-}$ , podle toho jestli realizujeme CCIII nebo ICCIII. Příklady zapojení některých typů proudových konvektorů jsou naznačeny v tab. 2.2 [10].

**Tab. 2.2:** Realizace klasických proudových konvektorů pomocí UCC

Typ	Vstup	Výstup	Propojené	Uzemněné
<b>CCI-</b>	$y_1$ – vstup $y$	$z_{1-}$ – výstup $z$	$y_1, z_{1+}$	$y_{2-}, y_3, z_{2+}, z_{2-}$
<b>CCI+</b>	$y_1$ – vstup $y$	$z_{2+}$ – výstup $z$	$y_1, z_{1+}$	$y_{2-}, y_3, z_{1-}, z_{2-}$
<b>CCII-</b>	$y_1$ – vstup $y$	$z_{1-}$ – výstup $z$		$y_{2-}, y_3, z_{1+}, z_{2+}, z_{2-}$
<b>CCII+</b>	$y_1$ – vstup $y$	$z_{1+}$ – výstup $z$		$y_{2-}, y_3, z_{2+}, z_{1-}, z_{2-}$
<b>CCIII-</b>	$y_1$ – vstup $y$	$z_{2-}$ – výstup $z$	$y_1, z_{1-}$	$y_{2-}, y_3, z_{1+}, z_{2+}$
<b>CCIII+</b>	$y_1$ – vstup $y$	$z_{1+}$ – výstup $z$	$y_1, z_{1-}$	$y_{2-}, y_3, z_{1+}, z_{2-}$
<b>ICCI-</b>	$y_{2-}$ – vstup $y$	$z_{1-}$ – výstup $z$	$y_{2-}, z_{1+}$	$y_1, y_3, z_{2+}, z_{2-}$
<b>ICCI+</b>	$y_{2-}$ – vstup $y$	$z_{2+}$ – výstup $z$	$y_{2-}, z_{1+}$	$y_1, y_3, z_{1-}, z_{2-}$

**Tab. 2.2:** Realizace klasických proudových konvektorů pomocí UCC (pokračování)

<b>ICCI-</b>	$y_{2-}$ – vstup $y$	$z_{1-}$ – výstup $z$		$y_1, y_3, z_{1+}, z_{2+}, z_{2-}$
<b>ICCI+</b>	$y_{2-}$ – vstup $y$	$z_{1+}$ – výstup $z$		$y_1, y_3, z_{2+}, z_{1-}, z_{2-}$
<b>ICCI-</b>	$y_{2-}$ – vstup $y$	$z_{2-}$ – výstup $z$	$y_{2-}, z_{1-}$	$y_1, y_3, z_{1+}, z_{2+}$
<b>ICCI+</b>	$y_{2-}$ – vstup $y$	$z_{1+}$ – výstup $z$	$y_{2-}, z_{1-}$	$y_1, y_3, z_{2+}, z_{2-}$
<b>DVCCI-</b>	$y_1$ – vstup $y_1$ $y_{2-}$ – vstup $y_2$	$z_{1-}$ – výstup $z$	$y_1, z_{1+}, y_{2-}, z_{2+}$	$y_3, z_{2-}$
<b>DVCC</b>	$y_1$ – vstup $y_1$ $y_{2-}$ – vstup $y_2$	$z_{1+}$ – výstup $z$ $z_{1-}$ – výstup $z$		$y_3, z_{2+}, z_{2-}$
<b>DVCCI+</b>	$y_1$ – vstup $y_1$ $y_{2-}$ – vstup $y_2$	$z_{1+}$ – výstup $z$	$y_1, z_{1-}, y_{2-}, z_{2-}$	$y_3, z_{2-}$
<b>DDCC-</b>	$y_1$ – vstup $y_1$ $y_{2-}$ – vstup $y_2$ $y_3$ – vstup $y_3$	$z_{1-}$ – výstup $z$		$z_{1+}, z_{2+}, z_{2-}$
<b>DDCC+</b>	$y_1$ – vstup $y_1$ $y_{2-}$ – vstup $y_2$ $y_3$ – vstup $y_3$	$z_{1+}$ – výstup $z$		$z_{1-}, z_{2+}, z_{2-}$
<b>DDCC+/-</b>	$y_1$ – vstup $y_1$ $y_{2-}$ – vstup $y_2$ $y_3$ – vstup $y_3$	$z_{1+}$ – výstup $z$ $z_{1-}$ – výstup $z$		$z_{2+}, z_{2-}$

## 2.6 Reálný model UCC

Univerzální proudový konvektor byl vyroben ve spolupráci s firmou AMI semiconductor. Byl vyroben pod označením UCC-N1B 0520 za pomoci 35 $\mu$ m CMOS technologie. Napájení je symetrickým napětím  $\pm 1,65$  V a maximální výstupní proud je  $\pm 0,7$  mA. Při použití reálného univerzálního proudového konvektoru musíme vzít v úvahu, že přenos mezi jednotlivými branami nejsou přesně jednotkové [12]. Rovnice reálného UCC je dána hybridní maticí (2.10).

$$\begin{pmatrix} I_{y1} \\ I_{y2-} \\ I_{y3} \\ U_x \\ I_{z1+} \\ I_{z1-} \\ I_{z2+} \\ I_{z2-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{c1}(p) & -\alpha_{c2}(p) & \alpha_{c3}(p) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{c1}(p) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma_{c2}(p) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_{c1}(p) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{c2}(p) & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{y1} \\ U_{y2-} \\ U_{y3} \\ I_x \\ U_{z1+} \\ U_{z1-} \\ U_{z2+} \\ U_{z2-} \end{pmatrix} \cdot (2.10)$$

Koeficienty přenosu jsou rovny :

$$\alpha_{ci}(p) = \frac{\alpha_{c0i}}{1 + \tau_{\alpha_{ci}} p}, \quad (2.11)$$

$$\beta_{ci}(p) = \frac{\beta_{c0i}}{1 + \tau_{\beta_{ci}} p}, \quad (2.12)$$

$$\gamma_{ci}(p) = \frac{\gamma_{c0i}}{1 + \tau_{\gamma_{ci}} p}. \quad (2.13)$$



### 3. Napěťové konvejory

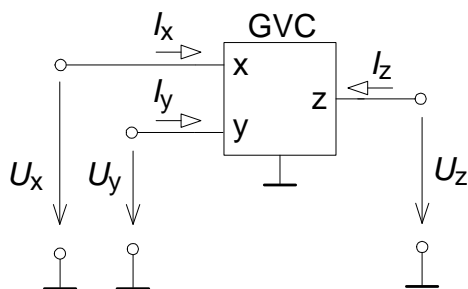
Z definice proudového konvejeoru nám plyne mnoho výhod, ovšem jejich využití je zejména v proudovém režimu, který není v dnešní době natolik používaný jako mód napěťový.

Největší předností napěťových konvejeorů je možnost vést z libovolného výstupu neomezené množství dopředných či zpětných vazeb. U proudového konvejeoru jsme omezeni tím, že z daného výstupu může být vedena pouze jedna vazba.

S pojmem napěťový konvejeor se můžeme setkat již v 80 letech dvacátého století. Byl navržen na základě duality s proudovými konvejeory, což umožnilo jejich popis a definici vnitřní struktury. Napěťový konvejeor [13] se tedy může stát vhodným aktivním prvkem pro zapojení pracující v napěťovém módu. Ovšem problematice a možnému návrhu pomocí nich nebyla věnována dostatečná pozornost. Teprve na přelomu tisíciletí se v odborných člancích objevil prvek CDBA (Current Differencing Buffered Amplifier) [14]. Tento aktivní prvek byl odvozen na základě duality k prvku DVCC [15] a lze jej označit jako napěťový konvejeor.

#### 3.1 Zobecněný napěťový konvejeor GVC

Zobecněný napěťový konvejeor můžeme definovat jako trojbran s vysokoimpedančním vstupem  $x$ , nízkoimpedančním vstupem  $y$  a napěťovým výstupem  $z$ . Pomocí koeficientů jednotlivých přenosů můžeme realizovat různé typy a generace napěťových konvejeorů, všechny kombinace jsou uvedeny v tab. 3.1. Pro návrh a popis těchto typů byl zaveden tzv. zobecněný napěťový konvejeor (General Voltage Conveyor – GVC). Schématická značka GVC je naznačena na obr. 3.1. Vztahy mezi jednotlivými svorkami jsou definovány maticí (3.1).



**Obr. 3.1:** Schématická značka GVC.

$$\begin{pmatrix} I_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_x \\ I_y \\ I_z \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

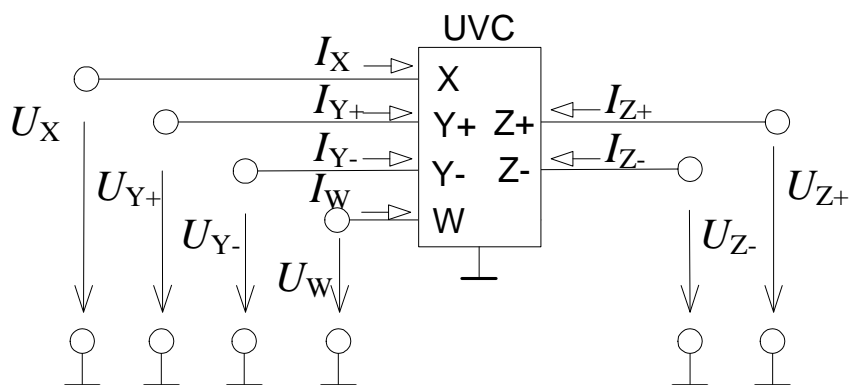
**Tab. 3.1:** Tabulka všech napět'ových konvektorů realizovaných pomocí GVC

Typy proudových konvektorů	Přenosové koeficienty		
	a	b	c
<b>VCI+</b>	1	1	1
<b>VCI-</b>	1	1	-1
<b>IVCI+</b>	-1	1	1
<b>IVCI-</b>	-1	1	-1
<b>VCII+</b>	1	0	1
<b>VCII-</b>	1	0	-1
<b>IVCII+</b>	-1	0	1
<b>IVCII-</b>	-1	0	-1
<b>VCIII+</b>	1	-1	1
<b>VCIII-</b>	1	-1	-1
<b>IVCIII+</b>	-1	-1	1
<b>IVCIII-</b>	-1	-1	-1

### 3.2 Univerzální napět'ový konvektor UVC

Na principu univerzálního proudového konvektoru byl na ústavu telekomunikací FEKT VUT v Brně definován univerzální napět'ový konvektor UVC (Universal Voltage Conveyor – UVC) [13]. Jeho pomocí můžeme realizovat různé typy a generace napět'ových konvektorů. UVC byl vyroben v AMI Semiconductor pod označením UVC – N1C technologií CMOS035. Při následném vývoji byl kladen důraz na návrh lepších napět'ových sledovačů, které jsou obsaženy ve struktuře UVC. Tyto prvky mají značný vliv na výsledné chování ve frekvenční oblasti. UVC je definován jako šestibran, který má jeden vstup X, dva rozdílové proudové vstupy Y+, Y- a dva napět'ové výstupy Z+, Z-. Ze svorky X je napětí převáděno na výstupní svorky s kladným nebo záporným znaménkem. Rozdíl proudů tekoucích vstupy Y+, Y- bude přenášen do vstupu X. Schematická značka tohoto aktivního prku je uvedena na obr 3.2. Vztahy mezi jednotlivými branami jsou definovány hybridní maticí (3.2). Z důvodu možnosti

realizace všech tří generací je zaveden pomocný napěťový vstup W, který pro realizaci generace I ( $b = 1$ ) je nutno propojit s neinvertujícím výstupem, v případě druhé generace ( $b = 0$ ) je svorka W uzemněna. Třetí generaci ( $b = -1$ ) realizujeme spojením s invertujícím výstupem.



**Obr. 3.2:** Schematická značka UVC.

$$\begin{pmatrix} I_X \\ I_W \\ U_{Y+} \\ U_{Y-} \\ U_{Z+} \\ U_{Z-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_X \\ U_W \\ I_{Y+} \\ I_{Y-} \\ I_{Z+} \\ I_{Z-} \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

V tab. 3.2 je naznačeno jakým způsobem se dají realizovat různé typy napěťových konvektorů.

**Tab. 3.2:** Realizace napěťových konvektorů pomocí UVC

Typ	Vstup	Výstup	Propojené	Typ	Vstup	Výstup	Propojené
VCI-	Y+	Z-	W => Z+	VCIII+/-	Y+	Z+, Z-	W => Z-
VCI+	Y+	Z+	W => Z+	IVCI+/-	Y-	Z+, Z-	W => Z+
VCII-	Y+	Z-	W => zem	IVCII+/-	Y-	Z+, Z-	W => zem
VCII+	Y+	Z+	W => zem	IVCIII+/-	Y-	Z+, Z-	W => Z-
VCIII-	Y+	Z-	W => Z-	DCVCI+	Y+, Y-	Z+	W => Z+
VCIII+	Y+	Z+	W => Z-	DCVCI-	Y+, Y-	Z-	W => Z+
IVCI-	Y-	Z-	W => Z+	DCVCII+	Y+, Y-	Z+	W => zem

**Tab. 3.2:** Realizace napěťových konvektorů pomocí UVC (pokračování)

IVCI+	Y-	Z+	W => Z+	DCVCII-	Y+, Y-	Z-	W => zem
IVCII-	Y-	Z-	W => zem	DCVCIII+	Y+, Y-	Z+	W => Z-
IVCII+	Y-	Z+	W => zem	DCVCIII-	Y+, Y-	Z-	W => Z-
IVCIII-	Y-	Z-	W => Z-	DCVC+	Y+, Y-	Z+	-
IVCIII+	Y-	Z+	W => Z-	DCVC-	Y+, Y-	Z-	-
VCI+/-	Y+	Z+, Z-	W => Z+	DCVC+/-	Y+, Y-	Z+, Z-	-
VCII+/-	Y+	Z+, Z-	W => zem				

### 3.3 Reálný model UVC

Reálný univerzální proudový konvektor [16] nemá proudové a napěťové přenosy přesně jednotkově. Proto jsou v hybridní matici zavedeny frekvenčně závislé přenosy  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$ . Rovnice reálného UVC je dána hybridní matici (2.9).

$$\begin{pmatrix} I_X \\ I_W \\ U_{Y+} \\ U_{Y-} \\ U_{Z+} \\ U_{Z-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \alpha_{v1}(p) & -\alpha_{v2}(p) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{v1}(p) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{v2}(p) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{v1}(p) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\gamma_{v2}(p) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_X \\ U_W \\ I_{Y+} \\ I_{Y-} \\ I_{Z+} \\ I_{Z-} \end{pmatrix}. \quad (3.3)$$

Koeficienty přenosu jsou rovny :

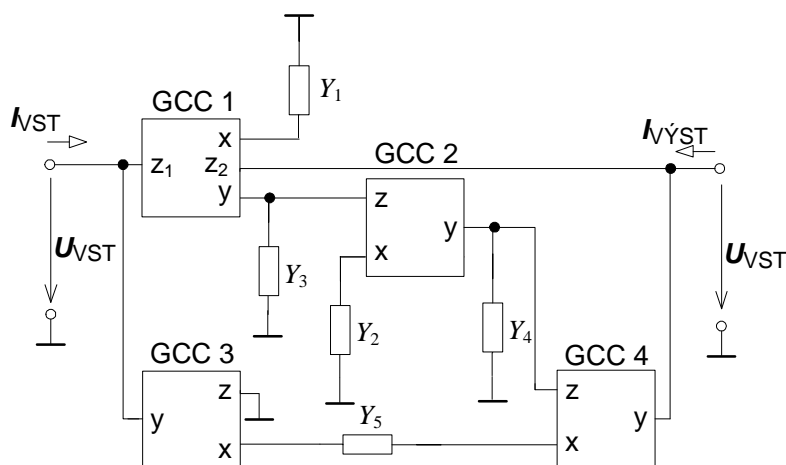
$$\alpha_{vj}(p) = \frac{\alpha_{v0j}}{1 + \tau_{\alpha_{vj}} p}, \quad (3.4)$$

$$\beta_{vj}(p) = \frac{\beta_{v0j}}{1 + \tau_{\beta_{vj}} p}, \quad (3.5)$$

$$\gamma_{vj}(p) = \frac{\gamma_{v0j}}{1 + \tau_{\gamma_{vj}} p}. \quad (3.6)$$

## 4. Realizace obvodu pomocí zobecněného proudového konveju

Autonomní obvod na obr. 4.1 byl navržen modifikací konkrétního řešení uvedeného v [17], ze kterého byl dle volby konkrétních admitancí navržen prvek typu FDNR (floating frequency dependent negative resistance), plovoucí kapacitor, plovoucí induktor a konvertor uzemněné admitance na plovoucí admitanci. Všechny varianty řešení, byly navrženy pomocí čtyř zobecněných proudových konveju GCC.



**Obr. 4.1:** Obvodová realizace autonomního obvodu

Z analýzy v programu SNAP byla získána vstupní a výstupní admitance ve tvaru (4.1) a (4.2).

$$[Y_{VST}] = \frac{-Y_1 Y_2 Y_5 a_1 a_2 a_3 b_1 b_2 b_3 + Y_1 Y_4 Y_5 a_1 a_3 b_1 b_3 + Y_1 Y_2 Y_5 a_1 a_2 a_3 c_{11} c_2 c_4 - Y_3 Y_4 Y_5 a_3 b_3}{Y_1 Y_2 a_1 a_2 b_1 b_2 - Y_1 Y_4 a_1 b_1 - Y_2 Y_3 a_2 b_2 + Y_3 Y_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

$$[Y_{VYST}] = \frac{-Y_1 Y_2 Y_5 a_1 a_2 a_4 b_1 b_2 b_4 + Y_1 Y_4 Y_5 a_1 a_4 b_1 b_4 - Y_1 Y_2 Y_5 a_1 a_2 a_4 c_{12} c_2 c_4 + Y_2 Y_3 Y_5 a_2 a_4 b_2 b_4 - Y_3 Y_4 Y_5 a_4 b_4}{Y_1 Y_2 a_1 a_2 b_1 b_2 - Y_1 Y_4 a_1 b_1 - Y_2 Y_3 a_2 b_2 + Y_3 Y_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Koeficienty  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ , a  $b_4$  zobecněných proudových konvektorů byly zvoleny tak, abychom dostali vstupní (4.3) a výstupní admitanci (4.4) v následujícím tvaru:

$$[Y_{VST}] = \frac{Y_1 Y_2 Y_5 a_1 a_2 a_3 c_{11} c_2 c_4}{Y_3 Y_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

$$[Y_{VYST}] = \frac{-Y_1 Y_2 Y_5 a_1 a_2 a_4 c_{12} c_2 c_4}{Y_3 Y_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Při návrhu všech plovoucích prvků musíme vycházet z toho aby vstupní i výstupní impedance byly stejné (4.5). Z toho nám plyne vztah (4.6).

$$a_1 a_2 a_3 c_{11} c_2 c_4 = 1 \quad \wedge \quad a_1 a_2 a_4 c_{12} c_2 c_4 = -1, \quad (4.5)$$

$$[Y_{VST, VYST}] = \frac{Y_1 Y_2 Y_5}{Y_3 Y_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

Možné kombinace pro dosažení námi požadované funkce (4.6) jsou popsány v tab. 4.1. Všechny aktivní prvky byly zvoleny proudové konvektory druhé generace, jelikož mají přenosy  $b = 0$ . U třetího prvku můžeme použít negativní konvektor CCII- nebo pozitivní CCII+, protože koeficient  $c_3$  nefiguruje ve vstupní ani výstupní impedanci navrhovaného obvodu (4.5).

**Tab. 4.1:** Navržené kombinace proudových konvektorů

Zapojení	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_2$	$c_4$	1. prvek	2. prvek	3. prvek	4. prvek
1	+	+	+	+	+	-	+	+	CCII+/-	CCII+	CCII	CCII+
2	+	+	+	-	+	+	+	+	DOCCII+	CCII+	CCII	ICCI+
3	+	+	-	+	-	-	+	+	DOCCII-	CCII+	ICCI	CCII+
4	+	+	-	-	-	+	+	+	CCII+/-	CCII+	ICCI	ICCI+
5	+	+	+	+	-	+	+	-	CCII+/-	CCII+	CCII	CCII-
6	+	+	+	-	-	-	+	-	DOCCII-	CCII+	CCII	ICCI-
7	+	+	-	+	+	+	+	-	DOCCII+	CCII+	ICCI	CCII-
8	+	+	-	-	+	-	+	-	CCII+/-	CCII+	ICCI	ICCI-
9	+	+	+	+	-	+	-	+	CCII+/-	CCII-	CCII	CCII+
10	+	+	+	-	-	-	-	+	DOCCII-	CCII-	CCII	ICCI+
11	+	+	-	+	+	+	-	+	DOCCII+	CCII-	ICCI	CCII+
12	+	+	-	-	+	-	-	+	CCII+/-	CCII-	ICCI	ICCI+
13	+	+	+	+	+	-	-	-	CCII+/-	CCII-	CCII	CCII-
14	+	+	+	-	+	+	-	-	DOCCII+	CCII-	CCII	ICCI-
15	+	+	-	+	-	-	-	-	DOCCII-	CCII-	ICCI	CCII-
16	+	+	-	-	-	+	-	-	CCII+/-	CCII-	ICCI	ICCI-

**Tab. 4.1:** Navržené kombinace proudových konvektorů (pokračování)

Zapojení	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_2$	$c_4$	1. prvek	2. prvek	3. prvek	4. prvek
17	+	-	+	+	-	+	+	+	CCII+/-	ICCII+	CCII	CCII+
18	+	-	+	-	-	-	+	+	CCII+/-	ICCII+	CCII	ICCII+
19	+	-	-	+	+	+	+	+	DOCCII+	ICCII+	ICCII	CCII+
20	+	-	-	-	+	-	+	+	CCII+/-	ICCII+	ICCII	ICCII+
21	+	-	+	+	+	-	+	-	CCII+/-	ICCII+	CCII	CCII-
22	+	-	+	-	+	+	+	-	CCII+/-	ICCII+	CCII	ICCII-
23	+	-	-	+	-	-	+	-	DOCCII-	ICCII+	ICCII	CCII-
24	+	-	-	-	-	+	+	-	CCII+/-	ICCII+	ICCII	ICCII-
25	+	-	+	+	+	-	-	+	CCII+/-	ICCII-	CCII	CCII+
26	+	-	+	-	+	+	-	+	DOCCII+	ICCII-	CCII	ICCII+
27	+	-	-	+	-	-	-	+	DOCCII-	ICCII-	ICCII	CCII+
28	+	-	-	-	-	+	-	+	CCII+/-	ICCII-	ICCII	ICCII+
29	+	-	+	+	-	+	-	-	CCII+/-	ICCII-	CCII	CCII-
30	+	-	+	-	-	-	-	-	DOCCII-	ICCII-	CCII	ICCII-
31	+	-	-	+	+	+	-	-	DOCCII+	ICCII-	ICCII	CCII-
32	+	-	-	-	+	-	-	-	CCII+/-	ICCII-	ICCII	ICCII-
33	-	+	+	+	-	+	+	+	ICCII+/-	CCII+	CCII	CCII+
34	-	+	+	-	-	-	+	+	ICCII+/-	CCII+	CCII	ICCII+
35	-	+	-	+	+	+	+	+	ICCII+/-	CCII+	ICCII	CCII+
36	-	+	-	-	+	-	+	+	ICCII+/-	CCII+	ICCII	ICCII+
37	-	+	+	+	+	-	+	-	ICCII+/-	CCII+	CCII	CCII-
38	-	+	+	-	+	+	+	-	DOICCII+	CCII+	CCII	ICCII-
39	-	+	-	+	-	-	+	-	DOICCII-	CCII+	ICCII	CCII-
40	-	+	-	-	-	+	+	-	ICCII+/-	CCII+	ICCII	ICCII-
41	-	+	+	+	+	-	-	+	ICCII+/-	CCII-	CCII	CCII+
42	-	+	+	-	+	+	-	+	DOICCII+	CCII-	CCII	ICCII+
43	-	+	-	+	-	-	-	+	DOICCII-	CCII-	ICCII	CCII+
44	-	+	-	-	-	+	-	+	ICCII+/-	CCII-	ICCII	ICCII+
45	-	+	+	+	-	+	-	-	ICCII+/-	CCII-	CCII	CCII-
46	-	+	+	-	-	-	-	-	DOICCII-	CCII-	CCII	ICCII-
47	-	+	-	+	+	+	-	-	DOICCII+	CCII-	ICCII	CCII-
48	-	+	-	-	+	-	-	-	ICCII+/-	CCII-	ICCII	ICCII-
49	-	-	+	+	+	-	+	+	ICCII+/-	ICCII+	CCII	CCII+
50	-	-	+	-	+	+	+	+	DOICCII+	ICCII+	CCII	ICCII+
51	-	-	-	+	-	-	+	+	DOICCII-	ICCII+	ICCII	CCII+
52	-	-	-	-	-	+	+	+	ICCII+/-	ICCII+	ICCII	ICCII+
53	-	-	+	+	-	+	+	-	ICCII+/-	ICCII+	CCII	CCII-
54	-	-	+	-	-	-	+	-	DOICCII-	ICCII+	CCII	ICCII-
55	-	-	-	+	+	+	+	-	DOICCII+	ICCII+	ICCII	CCII-
56	-	-	-	-	+	-	+	-	ICCII+/-	ICCII+	ICCII	ICCII-
57	-	-	+	+	-	+	-	+	ICCII+/-	ICCII-	CCII	CCII+
58	-	-	+	-	-	-	-	+	DOICCII-	ICCII-	CCII	ICCII+
59	-	-	-	+	+	+	-	+	DOICCII+	ICCII-	ICCII	CCII+
60	-	-	-	-	+	-	-	+	ICCII+/-	ICCII-	ICCII	ICCII+
61	-	-	+	+	+	-	-	-	ICCII+/-	ICCII-	CCII	CCII-
62	-	-	+	-	+	+	-	-	ICCII+/-	ICCII-	CCII	ICCII-
63	-	-	-	+	-	-	-	-	DOICCII-	ICCII-	ICCII	CCII-
64	-	-	-	-	-	+	-	-	ICCII+/-	ICCII-	ICCII	ICCII-

## 4.1 Realizace plovoucího kondenzátoru

Budou-li hodnoty admitancí:  $Y_1 = G_1$ ,  $Y_2 = sC_2$ ,  $Y_3 = G_3$ ,  $Y_4 = G_4$ ,  $Y_5 = G_5$  pak:

$$[Y_C] = \frac{sC_2 G_1 G_5}{G_3 G_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = sC \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

kde  $C = C_2 G_1 G_5 / G_3 G_4 = C_2 R_3 R_4 / (R_1 R_5)$ .

## 4.2 Realizace plovoucí cívky

Jestliže budou zvoleny hodnoty admitancí následovně:  $Y_1 = G_1$ ,  $Y_2 = G_2$ ,  $Y_3 = sC_3$ ,  $Y_4 = G_4$ ,  $Y_5 = G_5$  pak:

$$[Y_L] = \frac{G_1 G_2 G_5}{sC_3 G_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{sL} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Z rovnice (4.8) vyplývá, že  $L = C_3 G_4 / (G_1 G_2 G_5) = R_1 R_2 R_5 C_3 / R_4$

## 4.3 Realizace konvertoru uzemněné admitance na plovoucí admitanci

Jestliže budou zvoleny hodnoty admitancí následovně:  $Y_1 = y(s)$ ,  $Y_2 = G_2$ ,  $Y_3 = G_3$ ,  $Y_4 = G_4$  a  $Y_5 = G_5$ .

$$[Y_C] = \frac{G_2 G_5}{G_3 G_4} y(s) \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = ay(s) \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.9)$$

kde  $a = G_2 G_5 / (G_3 G_4) = R_3 R_4 / (R_2 R_5)$

## 4.4 Realizace prvku FDNR

Pro získání plovoucí frekvenčně závislé negativní resistance u které při zvyšující se frekvenci se absolutní hodnota negativní resistance snižuje volíme  $Y_1 = sC_1$ ,  $Y_2 = sC_2$ ,  $Y_3 = G_3$ ,  $Y_4 = G_4$ ,  $Y_5 = G_5$ .

$$[Y_D] = \frac{s^2 C_1 C_2 G_5}{G_3 G_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = s^2 D_d \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.10)$$

následně  $D_d = C_1 C_2 G_5 / (G_3 G_4) = C_1 C_2 R_3 R_4 / R_5$



Pro získání plovoucí FDNR, kde při zvyšující se frekvenci se absolutní hodnota negativní resistance zvyšuje volíme  $Y_1 = G_1$ ,  $Y_2 = G_2$ ,  $Y_3 = sC_3$ ,  $Y_4 = sC_4$ ,  $Y_5 = G_5$ .

$$[Y_D] = \frac{G_1 G_2 G_5}{s^2 C_3 C_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{D_i}{s^2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.11)$$

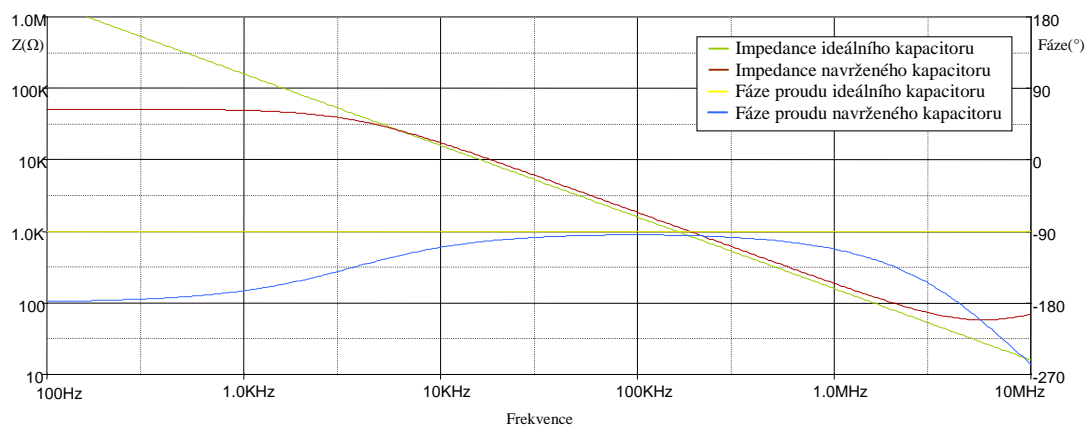
Následně  $D_i = G_1 G_2 G_5 / (C_3 C_4) = 1 / C_1 C_2 R_3 R_4 R_5$

## 4.5 Počítačové ověření návrhu

Počítačové ověření návrhu bylo realizováno pomocí zapojení č. 13. z tab. 4.1. Pro simulaci dle (4.7) byl zvolen plovoucí kondenzátor. Pomocí programu ORCAD z měřeného napětí a proudu byl vykreslen graf závislosti modulu impedance na frekvenci a následně grafy závislosti fáze proudu na kmitočtu.

Navrhnuté hodnoty pasivních prvků pro plovoucí kondenzátor s kapacitou 1nF :

$$C_2 = 1\text{nF}, R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = 1\text{k}\Omega.$$

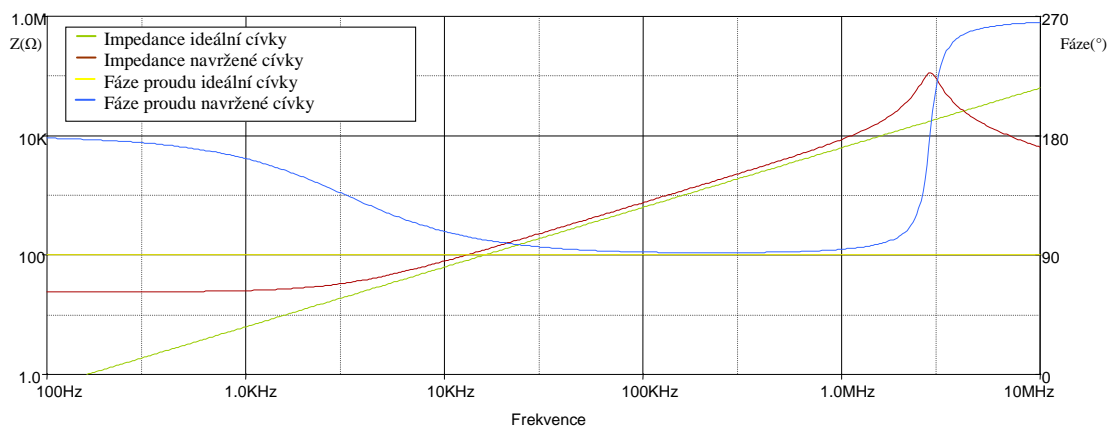


**Obr. 4.2:** Graf fáze proudu a modulu impedance v závislosti na kmitočtu u ideálního a navrženého kondenzátoru

Při simulování plovoucího induktoru byla dle vzorce (4.8) navržena cívka s induktancí 1mH, následně byla ověřena její funkčnost s porovnáním s ideální induktancí. Opět z měřeného napětí a proudu byl vykreslen graf závislosti impedance na frekvenci a fáze proudu.

Navrhnuté hodnoty pasivních prvků pro plovoucí kondenzátor s kapacitou 1mH :

$$C_3 = 1\text{nF}, R_1 = R_2 = R_4 = R_5 = 1\text{k}\Omega,$$

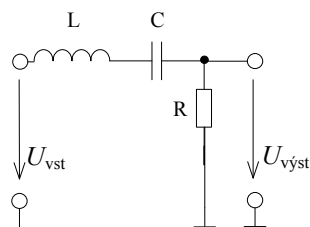


**Obr. 4.3:** Graf fáze proudu a modulu impedance v závislosti na kmitočtu u ideální a navržené cívky

Z grafů na obr. 4.2 a 4.3 lze vidět chování reálných a navržených pasivních prvků při různých kmitočtech. Navržená cívka i kondenzátor má nejideálnější vlastnosti v pásmu od 10 kHz do 1 MHz. Při kmitočtech mimo uvedené pásmo můžeme pozorovat již značné změny fáze proudu a modulu impedance.

#### 4.6 Aplikace navrhnuté cívky na příčkovém filtru druhého řádu

Navržený plovoucí induktor z 4.8 byl simulován na příčkovém filtru dle obr. 4.4. Z charakteristické rovnice filtru (4.12), která byla získána z programu SNAP byly odvozeny vztahy pro úhlovou frekvenci  $\omega_0$  (4.13) a činitel jakosti  $Q$  (4.14).



**Obr. 4.4:** Schéma zapojení filtru druhého řádu

Charakteristická rovnice navrženého filtru:

$$CE = GG_1G_2G_5 + p(G_1G_2G_5C) + p^2(GG_4CC_3) \cdot \quad (4.12)$$

Z dané rovnice byly odvozeny vztahy pro úhlovou frekvenci a činitel jakosti :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{GG_1G_2G_5}{GG_4CC_3}} = \sqrt{\frac{G_1G_2G_5}{G_4CC_3}}, \quad (4.13)$$

$$Q = \frac{\sqrt{GG_1G_2G_5GG_4CC_3}}{G_1G_2G_5C} = G \sqrt{\frac{G_4C_3}{G_1G_2G_5C}}. \quad (4.14)$$

Navržené hodnoty pasivních prvků pro  $f_0 = 100$  kHz a  $Q = 0,707$ .

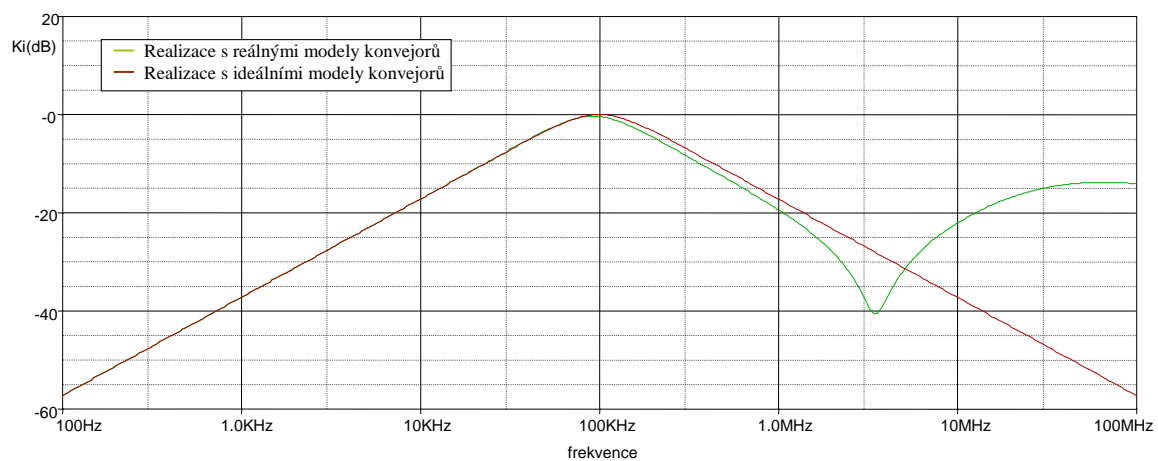
$$C = C_3 = 1\text{nF}, R = 2,25\text{k}\Omega, R_1 = 2,53\text{k}\Omega, R_2 = R_4 = R_5 = 1\text{k}\Omega,$$

Pro realizaci byly zvoleny hodnoty z řady E96

$$C = C_3 = 1\text{nF}, R = 2,2\text{k}\Omega, R_1 = 2,55\text{k}\Omega, R_2 = R_4 = R_5 = 1\text{k}\Omega,$$

Na obr. 4.5 je výsledná modulová kmitočtová charakteristika pásmové propusti. Pro srovnání byla cívka realizována ideálními a reálnými modely proudových konvektorů. U reálných se projevuje v pásmu nad 100 kHz vyšší hodnota útlumu. V oblasti kmitočtů vyšších jak 3 MHz klesá potlačení signálu v nepropustné části, způsobené reálnými vlastnostmi proudových konvektorů.

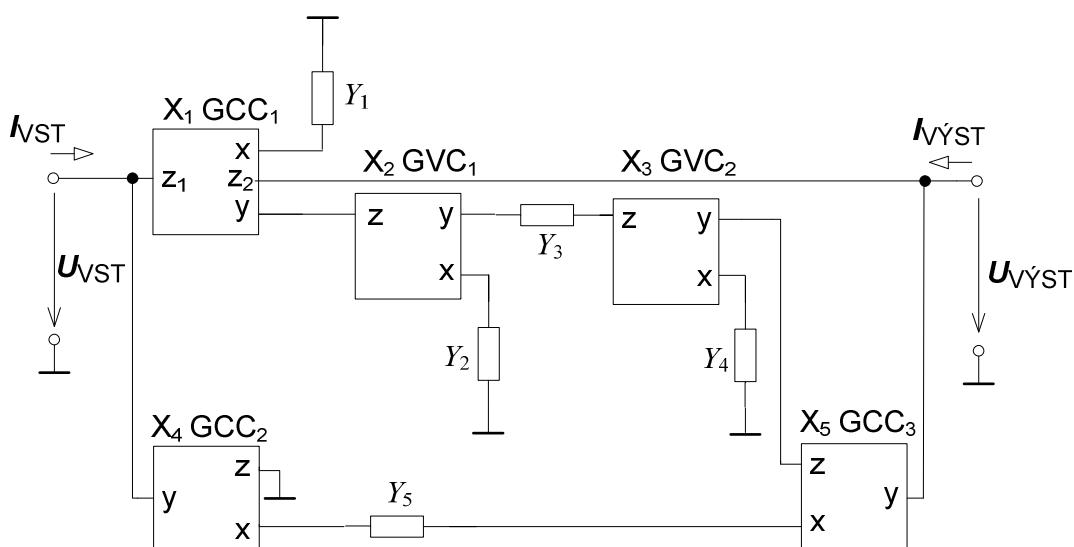
Použitý model reálného proudového konvektoru využívá tranzistorové pole ALA400-CBIC-R od firmy AT&T, modely NR100N (NPN) a PR100N(PNP). Se zvolenými hodnoty napětí a proudu  $+U_{cc} = -U_{ee} = 2,5$  V a  $I_o = 400$   $\mu$ A.



**Obr. 4.5:** Simulace filtru s ideálními a reálnými proudovými konvejoy realizující pásmovou propust.

## 5. Návrh obvodu pomocí zobecněných proudových a napěťových konvektorů

Pro návrh nového zapojení jsem využil zobecněné proudové a napěťové konvektory a analyzoval je pomocí programu SNAP. Různé kombinace těchto aktivních prvků jsem ověřoval měřením vstupní a výstupní impedance. Na základě těchto simulací jsem získal autonomní obvod s třemi proudovými a dvěma napěťovými konvektory. Tento návrh splňuje požadavky na vytvoření zadaných prvků. Pro jejich realizaci je potřeba zvolit správné admitance jak je zmíněno níže.



**Obr. 5.1:** Obvodová realizace autonomního obvodu

Z analýzy v programu SNAP byla získána rovnice vstupní a výstupní admitance ve tvaru (5.1) a (5.2).

$$[Y_{VST}] = \frac{Y_3 Y_4 Y_5 a_2 a_4 b_2 b_4 + Y_1 Y_3 Y_5 a_1 a_2 a_3 a_4 c_{11} c_2 c_3 c_5 - Y_2 Y_4 Y_5 a_4 b_4}{Y_2 Y_4 - Y_3 Y_4 a_2 b_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

$$[Y_{VYST}] = \frac{Y_3 Y_4 Y_5 a_2 a_3 b_2 b_5 - Y_1 Y_3 Y_5 a_1 a_2 a_3 a_5 c_{12} c_2 c_3 c_5 - Y_2 Y_4 Y_5 a_5 b_5}{Y_2 Y_4 - Y_3 Y_4 a_2 b_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.2)$$

Pro získání námi požadované vstupní (5.3) a výstupní admitanci (5.4) byly zvoleny koeficienty  $b_2, b_4, b_5 = 0$ .

$$[Y_{vst}] = \frac{Y_1 Y_3 Y_5 a_1 a_2 a_3 a_4 c_{11} c_2 c_3 c_5}{Y_2 Y_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

$$[Y_{výst}] = \frac{-Y_1 Y_3 Y_5 a_1 a_2 a_3 a_5 c_{12} c_2 c_3 c_5}{Y_2 Y_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.4)$$

Pro dosažení rovnosti impedancí (5.5) plyne podmínka, že koeficienty vstupní impedance musí být v součinu rovny jedné a zároveň koeficienty výstupní impedance budou rovny mínus jedné. Při splnění této podmínky dostáváme vztah (5.6).

$$a_1 a_2 a_3 a_4 c_{11} c_2 c_3 c_5 = 1 \quad \wedge \quad a_1 a_2 a_3 a_5 c_{12} c_2 c_3 c_5 = -1, \quad (5.5)$$

$$[Y_{vst, výst}] = \frac{Y_1 Y_3 Y_5}{Y_2 Y_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.6)$$

Všechny kombinace koeficientů pro splnění podmínky (5.5) jsou popsány v příloze I. Pro zvolené koeficienty jsou v tabulce uvedeny jim příslušné aktivní prvky. Všechny proudové i napět'ové konvejory jsou druhé generace a jejich přenos  $b = 0$ . Koeficient  $c_4$  se v rovnicích (5.3) a (5.4) nevyskytuje a proto může být zvolen negativní konvektor CCII- nebo pozitivní CCII+.

## 5.1 Realizace plovoucího kondenzátoru

Budou-li hodnoty admitancí:  $Y_1 = sC_1$ ,  $Y_2 = G_2$ ,  $Y_3 = G_3$ ,  $Y_4 = G_4$ ,  $Y_5 = G_5$  pak:

$$[Y_C] = \frac{sC_1 G_3 G_5}{G_2 G_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = sC \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.7)$$

kde  $C = C_1 G_3 G_5 / G_2 G_4 = C_1 R_2 R_4 / (R_3 R_5)$ .

## 5.2 Realizace plovoucí cívky

Jestliže budou zvoleny hodnoty admitancí následovně:  $Y_1 = G_1$ ,  $Y_2 = sC_2$ ,  $Y_3 = G_3$ ,  $Y_4 = G_4$ ,  $Y_5 = G_5$  pak:

$$[Y_L] = \frac{G_1 G_3 G_5}{s C_2 G_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{sL} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.8)$$

Z rovnice (3.8) vyplývá, že  $L = C_2 G_4 / (G_1 G_3 G_5) = R_1 R_3 R_5 C_2 / R_4$

## 5.3 Realizace konvertoru uzemněné admitance na plovoucí admitanci

Jestliže budou zvoleny hodnoty admitancí následovně:  $Y_1 = y(s)$ ,  $Y_2 = G_2$ ,  $Y_3 = G$ ,  $Y_4 = G_4$  a  $Y_5 = G_5$ .

$$[Y_C] = \frac{G_3 G_5}{G_2 G_4} y(s) \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = a y(s) \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.9)$$

kde  $a = G_3 G_5 / (G_2 G_4) = R_2 R_4 / (R_3 R_5)$

## 5.4 Realizace prvku FDNR

Pro realizaci plovoucí frekvenčně závislé negativní resistance u které při zvyšující se frekvenci se absolutní hodnota negativní resistance snižuje volíme  $Y_1 = sC_1$ ,  $Y_3 = sC_3$ ,  $Y_2 = G_2$ ,  $Y_4 = G_4$ ,  $Y_5 = G_5$ .

$$[Y_D] = \frac{s^2 C_1 C_3 G_5}{G_2 G_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = s^2 D_d \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.10)$$

Následně  $D_d = C_1 C_3 G_5 / (G_2 G_4) = C_1 C_3 R_2 R_4 / R_5$

Pro získání plovoucí FDNR, kde při zvyšující se frekvenci se absolutní hodnota negativní resistance zvyšuje volíme  $Y_1 = G_1$ ,  $Y_2 = G_2$ ,  $Y_3 = sC_3$ ,  $Y_4 = sC_4$ ,  $Y_5 = G_5$ .

$$[Y_D] = \frac{G_1 G_2 G_5}{s^2 C_3 C_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{D_i}{s^2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.11)$$

Následně  $D_i = G_1 G_2 G_5 / (C_3 C_4) = 1 / C_1 C_2 R_3 R_4 R_5$

## 5.5 Návrh s neideálními proudovými a napěťovými konvejory

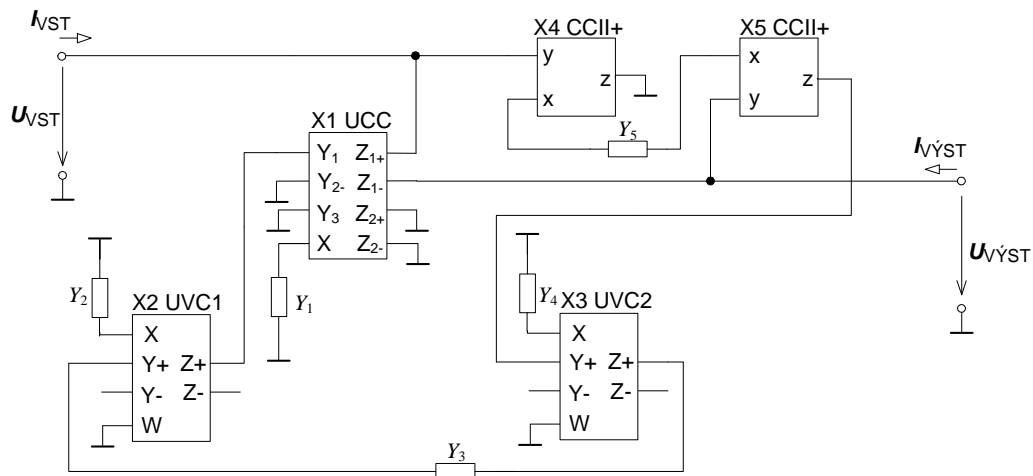
Při použití reálných aktivních prvků jak bylo popsáno výše, není přenos mezi jednotlivými porty a, b a c. Proto v předchozích kapitolách byly definovány reálné přenosy  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$ . Zkrácená admitanční matice (5.6) bude tvořena jednotlivými koeficienty (5.12) a její výsledný tvar je (5.13).

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \frac{Y_1 Y_3 Y_5 \alpha_{c11i} \alpha_{v12j} \alpha_{v13j} \alpha_{x4i} \gamma_{c11i} \gamma_{v12j} \gamma_{v13j} \gamma_{x5i}}{Y_2 Y_4}, \\ Y_{12} &= \frac{-Y_1 Y_3 Y_5 \alpha_{c11i} \alpha_{v12j} \alpha_{v13j} \alpha_{x5i} \gamma_{c11i} \gamma_{v12j} \gamma_{v13j} \gamma_{x5i}}{Y_2 Y_4}, \\ Y_{21} &= \frac{Y_1 Y_3 Y_5 \alpha_{c11i} \alpha_{v12j} \alpha_{v13j} \alpha_{x4i} \gamma_{c21i} \gamma_{v12j} \gamma_{v13j} \gamma_{x5i}}{Y_2 Y_4}, \\ Y_{22} &= \frac{-Y_1 Y_3 Y_5 \alpha_{c11i} \alpha_{v12j} \alpha_{v13j} \alpha_{x5i} \gamma_{c21i} \gamma_{v12j} \gamma_{v13j} \gamma_{x5i}}{Y_2 Y_4}, \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$[Y_{VST}] = \frac{Y_1 Y_3 Y_5 \alpha_{c11i} \alpha_{v12j} \alpha_{v13j} \gamma_{v12j} \gamma_{v13j} \gamma_{x5i}}{Y_2 Y_4} \begin{bmatrix} \alpha_{x4i} \gamma_{c11i} & -\alpha_{x5i} \gamma_{c11i} \\ -\alpha_{x4i} \gamma_{c21i} & \alpha_{x5i} \gamma_{c21i} \end{bmatrix}. \quad (5.13)$$

## 5.6 Počítačové ověření návrhu

Pro ověření navrhnutého obvodu bylo zvoleno zapojení č.10 z tabulky v příloze I. Vybraný návrh byl realizován za pomoci UVC, UCC a CCII obr 5.2.



**Obr. 5.2:** Realizovaný autonomní obvod

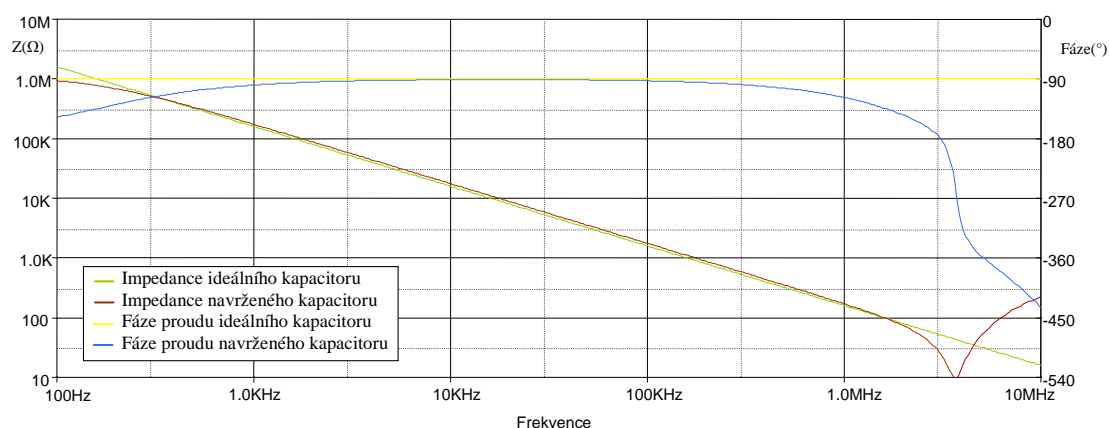


### 5.6.1 Simulace plovoucího kondenzátoru

Volbou admitancí dle (5.7) byl realizován plovoucí kondenzátor. Simulací v programu ORCAD byly z měřeného napětí a proudu vykresleny grafy závislosti modulu impedance na frekvenci a následně grafy závislosti fáze proudu na kmitočtu. Na obr. 5.2 můžeme vidět, že navrženou cívku lze využívat v pásmu od 1 kHz až do 1 MHz. Při vyšších či nižších kmitočtech se značně mění fáze proudu i modul impedance.

Navrhnuté hodnoty pasivních prvků pro plovoucí kondenzátor s kapacitou 1nF :

$$C_1 = 1\text{nF}, R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 1\text{k}\Omega.$$



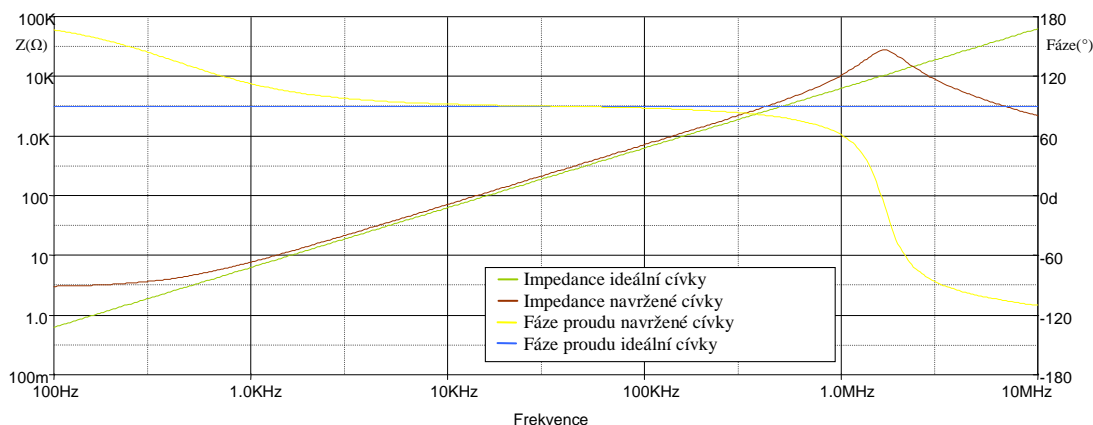
**Obr. 5.3:** Graf fáze proudu a modulu impedance v závislosti na kmitočtu u ideálního a navrženého kondenzátoru

### 5.6.2 Simulace plovoucího induktoru

Při simulování plovoucího induktoru byla dle vzorce (5.8) navržena cívka s induktancí 1mH a ověřena její funkčnost s porovnáním s ideální induktancí. Opět z měřeného napětí a proudu byl vykreslen graf závislosti impedance na frekvenci a fáze proudu.

Navrhnuté hodnoty pasivních prvků pro plovoucí cívku s indukčností 1mH :

$$C_2 = 1\text{nF}, R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = 1\text{k}\Omega,$$

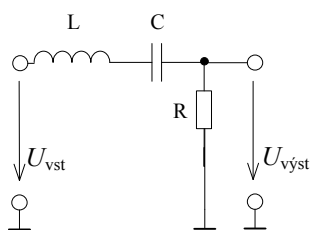


**Obr. 5.4:** Graf fáze proudu a modulu impedance v závislosti na kmitočtu u ideální a navržené cívky

Z výsledku simulací obr. 5.3 a 5.4 je zřejmé, že jsou nově navržená plovoucí cívka i plovoucí induktor vhodné pro kmitočty v rozsahu od 1 kHz po 1 MHz. Mimo uvedené frekvenční pásmo dochází ke změně fáze a to až o  $180^\circ$ , což je způsobeno reálnými vlastnostmi použitých aktivních prvků.

## 5.7 Aplikace navržené cívky na příčkovém filtru druhého řádu

Pro simulaci byla navržená plovoucí cívka, která je použita na příčkovém filtru dle obr. 5.5. Z charakteristické rovnice filtru (5.14), která byla získána z programu SNAP byly odvozeny vztahy pro úhlovou frekvenci  $\omega_0$  (5.15) a činitel jakosti  $Q$  (5.16).



**Obr. 5.5:** Schéma zapojení filtru druhého řádu

Charakteristická rovnice navrženého filtru:

$$CE = GG_1G_3G_5 + p(G_1G_3G_5C) + p^2(GG_4CC_2). \quad (5.14)$$

Z rovnice (5.14) byly odvozeny vztahy pro úhlovou frekvenci a činitel jakosti :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{GG_1G_3G_5}{GG_4CC_2}} = \sqrt{\frac{G_1G_3G_5}{G_4CC_2}}, \quad (5.15)$$

$$Q = \frac{\sqrt{GG_1G_3G_5GG_4CC_2}}{G_1G_3G_5C} = G \sqrt{\frac{G_4C_2}{G_1G_3G_5C}}. \quad (5.16)$$

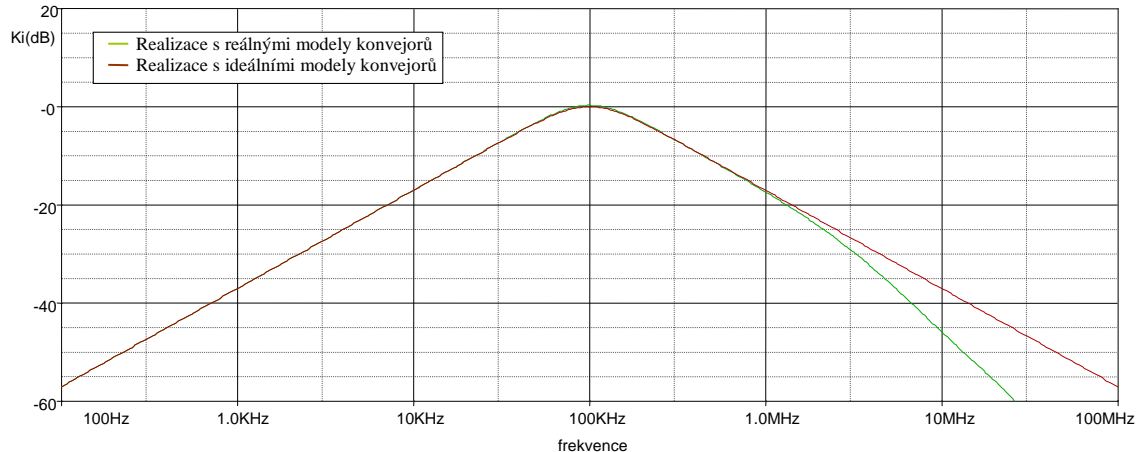
Navržené hodnoty pasivních prvků pro  $f_0 = 100 \text{ kHz}$  a  $Q = 0,707$ .

$$C = C_3 = 1 \text{ nF}, R = 2,25 \text{ k}\Omega, R_1 = 2,53 \text{ k}\Omega, R_2 = R_4 = R_5 = 1 \text{ k}\Omega,$$

Pro realizaci byly zvoleny hodnoty z řady E24

$$C = C_3 = 1 \text{ nF}, R = 2,2 \text{ k}\Omega, R_1 = 2,4 \text{ k}\Omega, R_2 = R_4 = R_5 = 1 \text{ k}\Omega,$$

Na obr. 5.5 je výsledná modulová kmitočtová charakteristika pásmové propusti. Pro srovnání byla cívka realizována ideálními a reálnými modely proudových konvektorů. Při simulaci se projevuje v pásmu nad 1 MHz vyšší hodnota útlumu. Ovšem proti grafu obr. 4.5 nenastává v oblasti kolem 3 MHz skokový útlum. Pro návrh s reálnými modely byly použity prvky UCC-3L, UVC-3L a CCIIPN-3L.



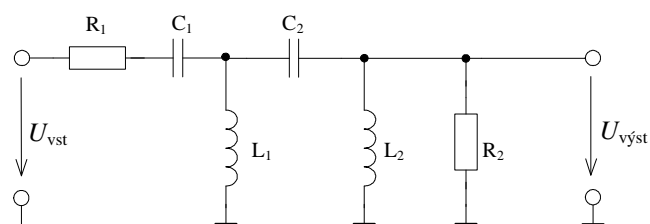
**Obr. 5.6:** Simulace filtru s ideálními a reálnými proudovými a napěťovými konvejory realizující pásmovou propust.

Výsledky simulace na obr. 5.6 navrženého kmitočtového filtru jsou velmi upokojivé a korespondují s ideálním průběhem v pásmu od 1 kHz až po 3 MHz. Nad zmíněnou hranicí jsme omezeni reálným chováním simulovaných aktivních prvků. V popisovaném případě mají omezení proudových a napěťových přenosů dokonce příznivý vliv na průběh modulových kmitočtových charakteristik. V porovnání

s předchozí navrženou pásmovou propustí obr. 4.5, má nově navržený filtr lepší parametry při vyšších kmitočtech.

## 5.8 Aplikace navržených prvků na příčkovém filtru čtvrtého řádu

Pro ověření navrhnuté cívky a plovoucího kondenzátoru byl použit filtr čtvrtého řádu [18] obr. 5.7. Tato horní propust je následně realizována za pomoci navržených prvků.



**Obr. 5.7:** Schéma zapojení filtru čtvrtého řádu

### 5.8.1 Přenosová funkce filtru

Přenosová funkce tohoto filtru [19] je (5.17).

$$K_{HP}(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{s^4}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (5.17)$$

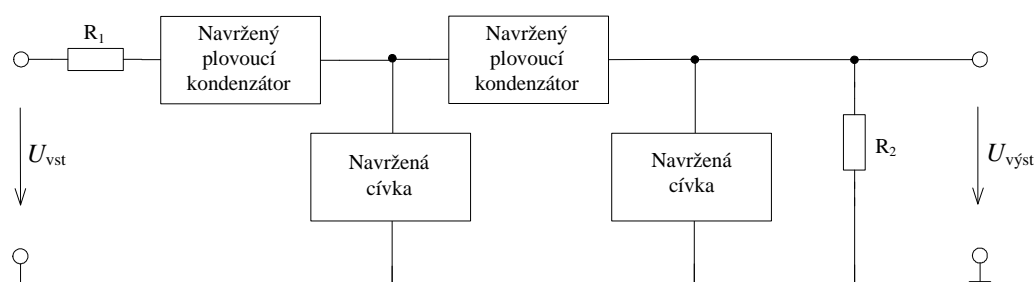
Kde

$$\begin{aligned} a_4 &= 1 + \frac{R_1}{R_2}, \\ a_3 &= \frac{R_1}{L_1} + \frac{R_1}{L_2} + \frac{1}{C_1 R_2} + \frac{1}{C_2 R_2}, \\ a_2 &= \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_1} + \frac{1}{L_2 C_2}, \\ a_1 &= \frac{1}{L_1 C_1 R_2 C_2} + \frac{R_1}{L_1 L_2 C_2}, \\ a_0 &= \frac{1}{L_1 L_2 C_1 C_2}. \end{aligned} \quad (5.18)$$

Hodnoty pasivních prvků pro  $f_0 = 50$  kHz a Butterworthovou aproximací :

$$C_1 = 5,538 \text{ nF}, C_2 = 1,561 \text{ nF}, L_1 = L_2 = 2,436 \text{ mH}, R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$$

Ekvivalentní zapojení na obr. 5.8 je realizováno s využitím navržených cívek a kondenzátorů pomocí autonomního obvodu z obr. 5.1.



**Obr. 5.8:** Ekvivalentní zapojení filtru čtvrtého řádu

### 5.8.2 Výpočet hodnot pro plovoucí kapacitory

Vypočtené hodnoty kondenzátoru podle (5.7) pro  $C_1 = 5,538 \text{ nF}$ :

$$C_1 = 1 \text{ nF}, R_2 = R_4 = 2,353 \text{ k}\Omega, R_3 = R_5 = 1 \text{ k}\Omega,$$

následně pro  $C_2 = 1,561 \text{ nF}$ :

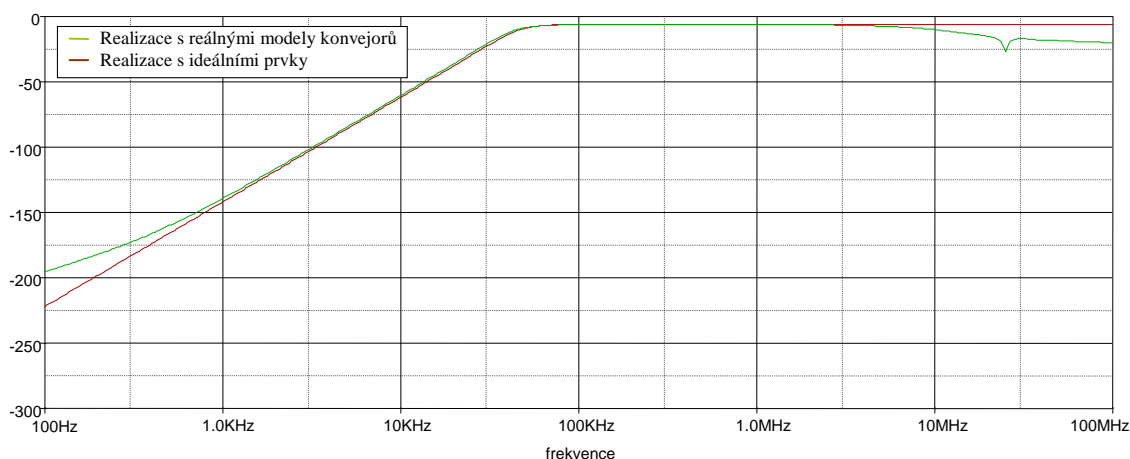
$$C_1 = 1 \text{ nF}, R_2 = R_4 = 1,25 \text{ k}\Omega, R_3 = R_5 = 1 \text{ k}\Omega.$$

### 5.8.3 Výpočet hodnot pro uzemněné induktory

Navrženou plovoucí cívku lze v případě potřeby uzemnit. Nezáleží při tom zda je přiveden na zem vstup nebo výstup autonomního obvodu.

Vypočtené hodnoty cívky podle (5.8) pro  $L_1 = L_2 = 2,436 \text{ mH}$

$$C_2 = 1 \text{ nF}, R_1 = R_3 = 1,56 \text{ k}\Omega, R_4 = R_5 = 1 \text{ k}\Omega.$$

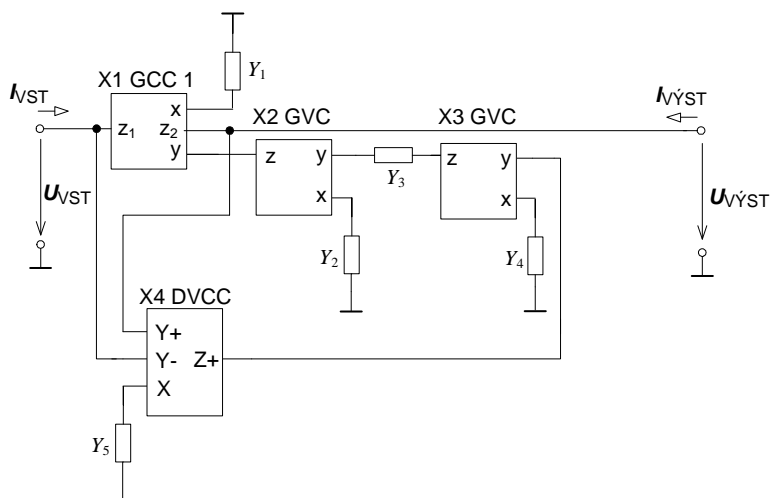


**Obr. 5.9:** Simulace filtru s reálnými modely proudových a napěťových konvektorů a filtrem realizovaným za využití ideální pasivních prvků

Graf na obr. 5.9 nám zobrazuje modulovou charakteristiku horní propusti navrženého filtru a obvodu navrženým pomocí ideálních pasivních součástek. Průběhy velmi dobře vzájemně korespondují a odpovídají teoretickým předpokladům. Odchylka na vyšších kmitočtech je dána omezenou šířkou pásma proudových a napěťových konvektorů s parazitním rezonančním obvodem s mezním kmitočtem okolo 30 MHz. Při praktickém využití lze navrženou strukturu použít v širokém kmitočtovém pásmu.

## 5.9 Modifikace obvodu za pomoci DVCC

Při realizaci autonomního obvodu z kapitoly 5 byly využity univerzální proudové a napěťové konvektory. Při využití těchto prvků byla zjištěna možnost nahradit 4. a 5. aktivní prvek jedním prvkem DVCC viz obr. 5.10.



**Obr. 5.10:** Obvodová realizace s využitím DVCC, GVC a GCC

Pomocí programu SNAP byla získána rovnice vstupní a výstupní admitance ve tvaru (5.19) a (5.20).

$$[Y_{VST}] = \frac{Y_1 Y_3 Y_5 a_1 a_2 a_3 c_{11} c_2 c_3}{Y_2 Y_4 - Y_3 Y_4 a_2 b_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.19)$$

$$[Y_{V\dot{S}T}] = \frac{-Y_1 Y_3 Y_5 a_1 a_2 a_3 c_{12} c_2 c_3}{Y_2 Y_4 - Y_3 Y_4 a_2 b_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.20)$$

Pro získání námi požadované vstupní (5.21) a výstupní admitance (5.22) byly zvoleny koeficienty  $b_2 = 0$ .

$$[Y_{VST}] = \frac{Y_1 Y_3 Y_5 a_1 a_2 a_3 c_{11} c_2 c_3}{Y_2 Y_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.21)$$

$$[Y_{V\dot{S}T}] = \frac{-Y_1 Y_3 Y_5 a_1 a_2 a_3 c_{12} c_2 c_3}{Y_2 Y_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.22)$$

Pro návrh plovoucích prvků musíme dodržet podmínku (5.23), aby nastala rovnost vstupní a výstupní admitance (5.21) a (5.22). Při splnění této podmínky dostáváme vztah (5.24).

$$a_1 a_2 a_3 c_{11} c_2 c_3 = 1 \wedge a_1 a_2 a_3 c_{12} c_2 c_3 = -1, \quad (5.23)$$

$$[Y_{VST, V\dot{S}T}] = \frac{Y_1 Y_3 Y_5}{Y_2 Y_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.24)$$

Všechny kombinace koeficientů pro splnění podmínky (5.23) jsou popsány v tab 5.1

**Tab. 5.1:** Navržené kombinace proudových a napět'ových konvektorů

Zapojení	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	X1	X2	X3	X4
1	+	+	+	+	-	+	+	CCII+/-	VCII+	VCII+	DVCC+
2	+	+	+	+	-	-	-	CCII+/-	VCII-	VCII-	DVCC+
3	+	+	+	-	-	+	-	DOCCII-	VCII+	VCII-	DVCC+
4	+	+	+	-	-	-	+	DOCCII-	VCII-	VCII+	DVCC+
5	+	+	-	+	-	+	-	CCII+/-	VCII+	IVCII-	DVCC+
6	+	+	-	+	-	-	+	CCII+/-	VCII-	IVCII+	DVCC+
7	+	+	-	-	-	+	+	DOCCII-	VCII+	IVCII+	DVCC+
8	+	+	-	-	-	-	-	DOCCII-	VCII-	IVCII-	DVCC+
9	+	-	+	+	-	+	-	CCII+/-	IVCII+	VCII-	DVCC+
10	+	-	+	+	-	-	+	CCII+/-	IVCII-	VCII+	DVCC+
11	+	-	+	-	-	+	+	DOCCII-	IVCII+	VCII+	DVCC+
12	+	-	+	-	-	-	-	DOCCII-	IVCII-	VCII-	DVCC+
13	+	-	-	+	-	+	+	CCII+/-	IVCII+	IVCII+	DVCC+
14	+	-	-	+	-	-	-	CCII+/-	IVCII-	IVCII-	DVCC+
15	+	-	-	-	-	+	-	DOCCII-	IVCII+	IVCII-	DVCC+
16	+	-	-	-	-	-	+	DOCCII-	IVCII-	IVCII+	DVCC+
17	-	+	+	+	-	+	-	ICCI+/-	VCII+	VCII-	DVCC+
18	-	+	+	+	-	-	+	ICCI+/-	VCII-	VCII+	DVCC+
19	-	+	+	-	-	+	+	DOICCI-	VCII+	VCII+	DVCC+
20	-	+	+	-	-	-	-	DOICCI-	VCII-	VCII-	DVCC+
21	-	+	-	+	-	+	+	ICCI+/-	VCII+	IVCII+	DVCC+
22	-	+	-	+	-	-	-	ICCI+/-	VCII-	IVCII-	DVCC+
23	-	+	-	-	-	+	-	DOICCI-	VCII+	IVCII-	DVCC+
24	-	+	-	-	-	-	+	DOICCI-	VCII-	IVCII+	DVCC+
25	-	-	+	+	-	+	+	ICCI+/-	IVCII+	VCII+	DVCC+
26	-	-	+	+	-	-	-	ICCI+/-	IVCII-	VCII-	DVCC+
27	-	-	+	-	-	+	-	DOICCI-	IVCII+	VCII-	DVCC+
28	-	-	+	-	-	-	+	DOICCI-	IVCII-	VCII+	DVCC+
29	-	-	-	+	-	+	-	ICCI+/-	IVCII+	IVCII-	DVCC+
30	-	-	-	+	-	-	+	ICCI+/-	IVCII-	IVCII+	DVCC+
31	-	-	-	-	-	+	+	DOICCI-	IVCII+	IVCII+	DVCC+
32	-	-	-	-	-	-	-	DOICCI-	IVCII-	IVCII-	DVCC+



## 6. Praktická realizace

Pro experimentální ověření byl vybrán autonomní obvod č.9 z tabulky v příloze II, toto zapojení bylo využito i při simulacích obr. 5.6. Pro realizaci byla navržena plovoucí cívka pomocí níž byla následně realizována pásmová propust. Rezistory R1 a R5 byly oproti simulacím zvoleny z dostupné řady E24. Ostatní součástky jsou shodné s předchozím návrhem.

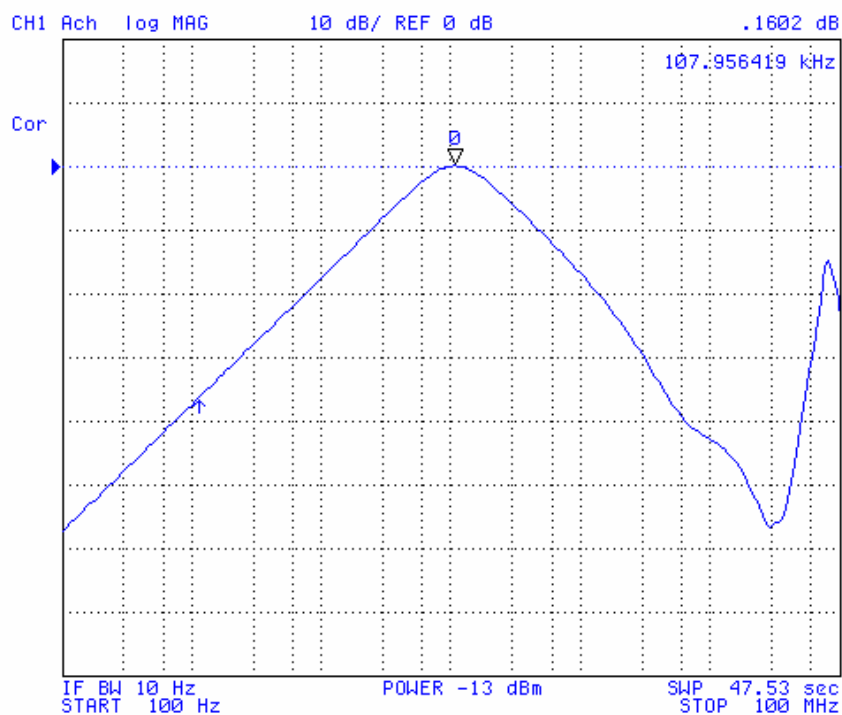
Zvolený obvod byl překreslen do programu EAGLE, ve kterém byla následně navržená experimentální deska plošných spojů. Jedná se o oboustrannou desku s prokovy.

Aktivní prvky byly realizovány pomocí univerzálního proudového (UCC – N1B 0520) a napěťového (UVC– N1C 0520) konveju od firmy AMI Semiconductor, Ltd. V těsné blízkosti pouzder integrovaných obvodů jsou umístěny blokovací kondenzátory. Každý z nich je tvořen dvěma paralelně spájenými kondenzátory ( $47\text{ nF} \parallel 68\text{ pF}$ ) a pro zjednodušení jsou ve schématu zakresleny pouze jako jeden. U napájecích pinů jsou připájeny dva blokovací tantalové kondenzátory ( $4,7\mu\text{F}$ ). Vstupní a výstupní svorka je realizována pomocí BNC konektorů.

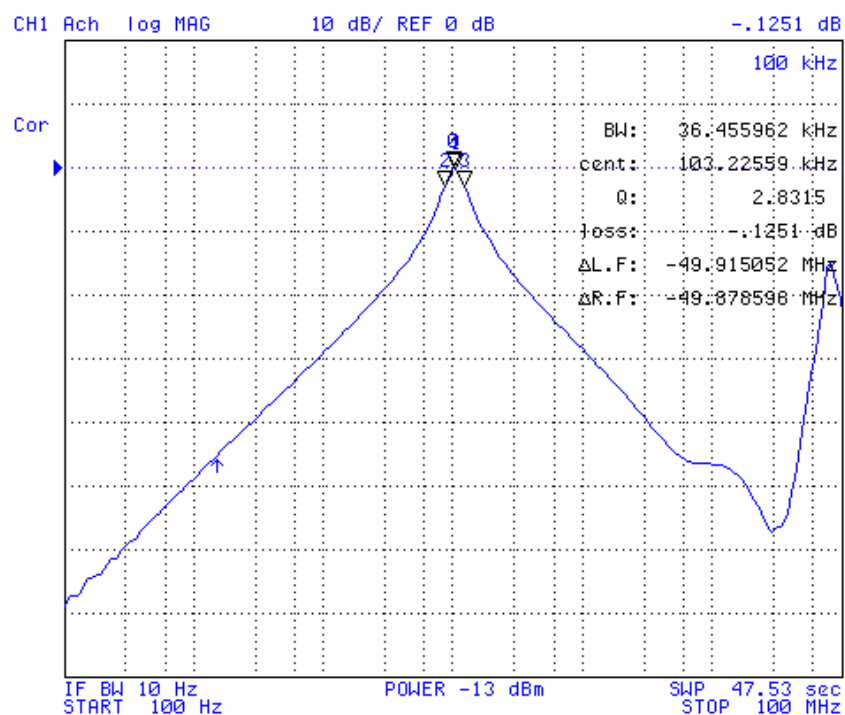
V příloze na obr. II.1 je znázorněno schéma zapojení kmitočtového filtru 2. řádu. Z obr.II.2 a obr.II.3 je zřejmé rozmístění všech součástek na desce plošných spojů a to ze strany TOP tak i BOTTOM. Na obr.II.4 a obr.II.5 jsou znázorněny plošné spoje z vrchní resp. spodní strany. V tab. II.1 je uveden kompletní soupis použitých součástek, které byly využity při realizaci. Obr. II.6 je fotografie osazené desky plošných spojů.

### 6.1 Reálné chování navrženého obvodu

Reálné chování navrženého kmitočtového filtru bylo experimentálně ověřeno pomocí obvodového analyzátoru Agilent 4395A. Hodnota charakteristického kmitočtu  $f_0$  byla stejně jako u simulací na obr 5.5 nastavena na 100 kHz. Pro ověření změny činitele jakosti byly zvoleny hodnoty rezistoru R5  $2,2\text{ k}\Omega$  a  $560\text{ }\Omega$  což dle (5.16) odpovídá činiteli jakosti o hodnotě 0,707 a 3. Výsledky měření pro jednotlivé Q jsou zobrazeny na obr. 6.1 a obr. 6.2

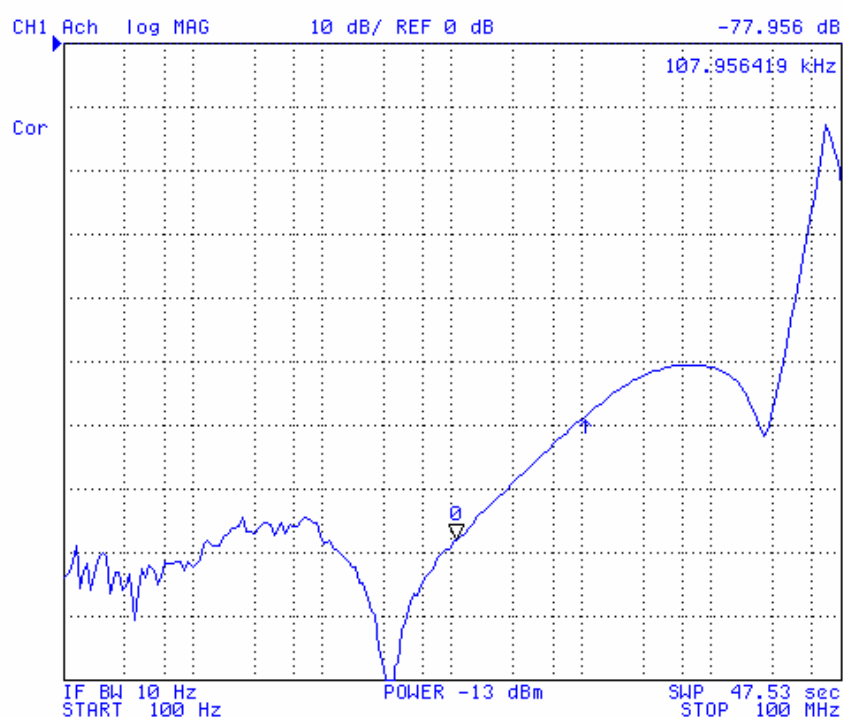


**Obr. 6.1:** Modulová charakteristika měřené pásmové propusti s činitelem jakosti  $Q = 0,707$



**Obr. 6.2:** Modulová charakteristika měřené pásmové propusti s činitelem jakosti  $Q = 3$

Mezní kmitočet u obvodu s Butterworthovou aproximací se posunul na  $f_0 = 107 \text{ kHz}$ . Při navrženém činiteli jakosti  $Q = 3$  byla hodnota mezního kmitočtu  $100 \text{ kHz}$ . Z toho vyplývá že v reálném obvodu je mezní kmitočet mírně závislý i na rezistoru  $R_5$ . Činitel jakosti  $Q$  nedosahuje teoretické hodnoty dle (5.16) což je způsobeno reálnými vlastnostmi aktivních prvků a přizpůsobení hodnoty odporu  $R_5$  dle řady E24. Na obr.6.2 je uveden graf s naměřenou hodnotou činitele jakosti  $Q=2,83$ . V měřeném obvodu v pásmu od  $10 \text{ MHz}$  do  $100 \text{ MHz}$  extrémně narůstá modul přenosu. To může být způsobeno vlivem parazitních vlastností na plošném spoji. Pro ověření těchto parazitních vlivů byla deska změřena bez napájecího napětí obr. 6.3.



**Obr. 6.3:** Modulová charakteristika měřeného obvodu bez napájení

Z grafu na obr. 6.3 je zřejmé že se na desce nachází parazitní rezonanční obvod s mezním kmitočtem okolo  $30 \text{ MHz}$ , který zapříčiňuje narůst modulu přenosu.

## Závěr

Za pomoci analýzy v programu SNAP a zobecněného proudového konveju bylo modifikací konkrétního řešení navrženo 64 zapojení využívajících tříbranové a čtyřbranové proudové konvejory druhé generace. Volbou pasivních prvků lze následně realizovat prvek typu FDNR (floating frequency dependent negative resistance), plovoucí kapacitor, plovoucí induktor a konvertor uzemněné admitance na plovoucí admitanci. Při konkrétním návrhu bylo zvoleno zapojení číslo 13. Pomocí něj byl za pomoci definovaných rovnic realizován plovoucí kondenzátor s kapacitou 1nF a cívka s indukčností 1mH. Tyto prvky byly porovnány s ideální cívkou i kondenzátorem za pomoci simulace v programu PSPICE, kde byla sledována závislost impedance a fáze proudu na kmitočtu. V rozsahu od 100 kHz do 1 MHz se navržené prvky blíží ideálním průběhům. Navržená plovoucí cívka byla otestována pomocí ideálních a reálných proudových konveju na příčkovém filtru druhého řádu, pomocí něhož byla navržena pásmová propust s činitelem jakosti  $Q=0,707$  a mezním kmitočtem  $f_0 = 100$  kHz.

Při návrhu nového autonomního obvodu jsem využil simulační program SNAP. Autonomní obvod je realizován za použití tří proudových a dvou napěťových konveju. Využijeme-li zobecněné aktivní prvky GVC a GCC, lze realizovat 256 zapojení, které splňují požadovaný tvar admitance obvodu, aby bylo možno realizovat zadané prvky. Navržené plovoucí i uzemněné součástky byly vyžity při realizaci pásmové propusti druhého řádu a příčkového filtru čtvrtého řádu realizující horní propust. Výsledky simulací těchto obvodů ukazují, že navrženou strukturu lze využít v širokém kmitočtovém pásmu.

Autonomní obvod z kapitoly 5 byl realizován pomocí univerzálních proudových a napěťových konveju. Při využití těchto prvků byla zjištěna možnost nahradit 4. a 5. aktivní prvek jedním prvkem DVCC. Modifikovaný autonomní obvod využívá shodné admitance pro získání požadovaných prvků. Simulace tohoto obvodu měly stejné průběhy jako původní zapojení.

Pro experimentální měření byla vybrána simulovaná pásmová propust s mezním kmitočtem  $f_0 = 100$  kHz a s činitelem jakosti  $Q = 0,707$  a  $Q = 3$ . Pro realizaci byly využity univerzální proudové (UCC – N1B 0520) a napěťové (UVC– N1C 0520) konvejory od firmy AMI Semiconductor, Ltd, které byly vyvinuty na Ústavu telekomunikací, FEKT VUT v Brně. Naměřené hodnoty činitele jakosti a mezního

kmitočtu odpovídaly teoreticky vypočítaným hodnotám i hodnotám získaným ze simulačního programu PSPICE.

## Literatura

- [1] SEDLÁČEK, J., HÁJEK, K.: *Kmitočtové filtry* 1. vyd. Praha : BEN, 2002. 535 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [2] VRBA, K.: *Analogová technika*. Skriptum FEKT VUT v Brně.
- [3] DOSTÁL, T.: *Elektrické filtry*. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, MJ servis, 2004.
- [4] TOMAN, K.: *Reproduktory a reprosoustavy – 1.díl* 1. vyd. Praha : BEN, 2002. 199s. EAN 8591459280805.
- [5] VRBATA, J.: *Nové prostředky v řešení aproximační úlohy pro návrh selektivních obvodů*. Praha: České vysoké učení technické, Disertační práce 1999.
- [6] BEČVÁŘ, D., STEHLÍK, J.: *Návrh analogových integrovaných obvodů*. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, MJ servis, 2006
- [7] SEDRA, A., SMITH, K.C.: *The current conveyor: A new circuit building block*, *Proc. IEEE*, roč. 56, s. 1368-1369, Srpen 1968
- [8] SEDRA, A., SMITH, K.C.: *A second-generation current conveyor and its applications*. *IEEE Transaction on Circuit Theory*, roč. 17, s. 132-134, 1970.
- [9] FABRE, A.: *A third-generation current conveyor: a new helpful active element*. *Electronics Letters*, 1995, roč. 31, č. 5, s. 338-339.
- [10] JEŘÁBEK, J., VRBA, K.: *Vybrané vlastnosti univerzálního proudového konveju, ukázka návrhu aplikace*. *Elektronický časopis Elektrevue*. 2006 [cit. 2010-10-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrevue.cz/clanky/06041/index.html>>
- [11] BEČVÁŘ, D., VRBA, K.: *Univerzální proudový konveju*. *Elektronický časopis Elektrevue*. 2000 [cit. 2010-10-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrevue.cz/clanky/00007/index.html>>.
- [12] JEŘÁBEK, J., VRBA, K.: *SIMO type low-input and high-output impedance current-mode universal filter employing three universal current conveyors*, *Int J of Electronics and Communications (AEU)*, roč. 64, č. 6, s. 588-593, 2010.
- [13] MINARČÍK, M.: *Návrh koncepce napěťového konveju a jeho aplikační možnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Disertační práce, 2008.
- [14] ACAR, A., OZOGUZ, S.: *A new versatile building block: Current differencing buffered amplifier suitable for analog signal-processing filters*, *Microelectronics Journal*, č.30, s. 157-160, 1999.

- [15] ELWAN, H. O., SOLIMAN, A. M.: *Novel CMOS differential voltage current conveyor and its application*. IEE Proc.- Circuits Devices Syst, roč. 144, č. 3., s. 195-200, 1997.
- [16] HERENCSÁR, N., KOTON, J., JEŘÁBEK, J., VRBA, K., CICEKOGLU, O.: *Voltage-Mode All-Pass Filters Using Universal Voltage Conveyor and MOSFET-Based Electronic Resistors* Radioengineering, roč. 20, č. 1, s 10-14, 2010
- [17] YUCE, E.: *On the realization of the floating simulators using only grounded passive components*. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, roč. 49, č. 2, s. 161-166, 2006.
- [18] KUMAR, P., SENANI, R.: *New grounded simulated inductance circuit using a single PFTFN*. Analog Integr. Circ. Sig. Process., roč. 62, č. 1, s. 105-112, 2010.
- [19] HERENCSÁR, N.; KOTON, J.; VRBA, K. *CFTA-Based Active-C Grounded Positive Inductance Simulator And Its Application*. Elektrovue - Internetový časopis (<http://www.elektrovue.cz>), 2010, roč. 2010, č. 88, s. 1-4. ISSN: 1213- 1539.

## Seznam použitých zkratek a symbolů

$a, b, c$	Zobecněné koeficienty GCC a GVC
$C$	Kapacita, jednotka farad [F]
CC	Proudový konvektor ( <i>Current Conveyor</i> )
CE	Charakteristická rovnice
DP	Doplň propust
DVCC	Diferenční napěťově proudový konvektor (differential voltage current conveyor)
$f$	Frekvence, jednotka hertz [Hz]
$f_0$	Mezní frekvence, jednotka hertz [Hz]
FČ	Fázovací článek
FDNR	Frekvenčně závislé negativní resistance (floating frequency dependent negative resistance)
$G$	Vodivost, jednotka siemens [S]
GCC	Zobecněný proudový konvektor ( <i>General Current Conveyor</i> )
GVC	Zobecněný napěťový konvektor ( <i>General Voltage Conveyor</i> )
HP	Horní propust
$I$	Proud, jednotka ampér [A]
$K(p)$	Přenosová funkce dvojbranu
$L$	Elektrická indukčnost, jednotka henry [H]
$p$	Laplaceův operátor
PP	Pásmová propust
PZ	Pásmová zadrž
$Q$	Činitel jakosti
$R$	Odpor, jednotka ohm [ $\Omega$ ]
$U$	Napětí, jednotka volt [V]
UCC	Univerzální proudový konvektor ( <i>Universal Current Conveyor</i> )
UVC	Univerzální napěťový konvektor ( <i>Universal Voltage Conveyor</i> )
VC	Napěťový konvektor ( <i>Voltage Conveyor</i> )
X	Vstupní veličiny
Y	Výstupní veličiny
Z	Impedance, jednotka ohm [ $\Omega$ ]



$\alpha_{xi}, \gamma_{xi}$	Reálné přenosové koeficienty proudového konveju druhé generace
$\alpha_{ci}, \beta_{ci}, \gamma_{ci}$	Reálné přenosové koeficienty univerzálního proudového konveju
$\alpha_{vj}, \beta_{vj}, \gamma_{vj}$	Reálné přenosové koeficienty univerzálního napěťového konveju
$\varphi$	Fázový posuv, jednotka stupeň [°]
$\omega$	Úhlová frekvence $\omega = 2\pi f$
$\Delta$	Determinant grafu

## Přílohy:

### Příloha I: Kombinace koeficientů a volba aktivních prvků

Zapojení	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>5</sub>	X1	X2	X3	X4	X5
1	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	CCII+/-	VCII+	VCII+	CCII	CCII-
2	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	DOCCII+	VCII+	VCII+	ICCII	CCII-
3	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	CCII+/-	VCII+	VCII-	CCII	CCII+
4	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	DOCCII+	VCII+	VCII-	ICCII	CCII+
5	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	CCII+/-	VCII-	VCII+	CCII	CCII+
6	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	DOCCII+	VCII-	VCII+	ICCII	CCII+
7	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	CCII+/-	VCII-	VCII-	CCII	CCII-
8	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	DOCCII+	VCII-	VCII-	ICCII	CCII-
9	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	CCII+/-	VCII+	VCII+	CCII	CCII+
10	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	DOCCII-	VCII+	VCII+	ICCII	CCII+
11	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	CCII+/-	VCII+	VCII-	CCII	CCII-
12	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-	DOCCII-	VCII+	VCII-	ICCII	CCII-
13	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	CCII+/-	VCII-	VCII+	CCII	CCII-
14	+	+	+	-	+	-	-	-	+	-	DOCCII-	VCII-	VCII+	ICCII	CCII-
15	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	CCII+/-	VCII-	VCII-	CCII	CCII+
16	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	DOCCII-	VCII-	VCII-	ICCII	CCII+
17	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	DOCCII+	VCII+	VCII+	CCII	ICCII+
18	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	CCII+/-	VCII+	VCII+	ICCII	ICCII+
19	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	DOCCII+	VCII+	VCII-	CCII	ICCII-
20	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-	CCII+/-	VCII+	VCII-	ICCII	ICCII-
21	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	DOCCII+	VCII-	VCII+	CCII	ICCII-
22	+	+	+	-	-	-	+	-	+	-	CCII+/-	VCII-	VCII+	ICCII	ICCII-
23	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+	DOCCII+	VCII-	VCII-	CCII	ICCII+
24	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+	CCII+/-	VCII-	VCII-	ICCII	ICCII+
25	+	+	+	-	-	+	-	+	+	-	CCII+/-	VCII+	VCII+	ICCII	ICCII-
26	+	+	+	+	-	-	-	+	+	-	DOCCII-	VCII+	VCII+	CCII	ICCII-
27	+	+	+	-	-	+	-	+	-	+	CCII+/-	VCII+	VCII-	ICCII	ICCII+
28	+	+	+	+	-	-	-	+	-	+	DOCCII-	VCII+	VCII-	CCII	ICCII+
29	+	+	+	-	-	+	-	-	+	+	CCII+/-	VCII-	VCII+	ICCII	ICCII+
30	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	DOCCII-	VCII-	VCII+	CCII	ICCII+
31	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	CCII+/-	VCII-	VCII-	ICCII	ICCII-
32	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	DOCCII-	VCII-	VCII-	CCII	ICCII-
33	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	DOCCII+	VCII+	IVCII+	ICCII	CCII+
34	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	CCII+/-	VCII+	IVCII+	CCII	CCII+
35	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	DOCCII+	VCII+	IVCII-	ICCII	CCII-
36	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	CCII+/-	VCII+	IVCII-	CCII	CCII-
37	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	DOCCII+	VCII-	IVCII+	ICCII	CCII-
38	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	DOCCII+	VCII-	IVCII+	ICCII	CCII-
39	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	CCII+/-	VCII-	IVCII-	CCII	CCII+
40	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	DOCCII+	VCII-	IVCII-	ICCII	CCII+
41	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	CCII+/-	VCII+	IVCII+	CCII	CCII-
42	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	DOCCII-	VCII+	IVCII+	ICCII	CCII-
43	+	+	-	+	+	+	-	+	-	+	CCII+/-	VCII+	IVCII-	CCII	CCII+
44	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	DOCCII-	VCII+	IVCII-	ICCII	CCII+
45	+	+	-	+	+	+	-	-	+	+	CCII+/-	VCII-	IVCII+	CCII	CCII+
46	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+	DOCCII-	VCII-	IVCII+	ICCII	CCII+
47	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	CCII+/-	VCII-	IVCII-	CCII	CCII-

Zapojení	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>5</sub>	X1	X2	X3	X4	X5
48	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	DOCCII-	VCII-	IVCII-	ICCII	CCII-
49	+	+	-	+	-	+	+	+	+	-	DOCCII+	VCII+	IVCII+	CCII	ICCII-
50	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	CCII+/-	VCII+	IVCII+	ICCII	ICCII-
51	+	+	-	+	-	+	+	+	-	+	DOCCII+	VCII+	IVCII-	CCII	ICCII+
52	+	+	-	-	-	-	+	+	-	+	CCII+/-	VCII+	IVCII-	ICCII	ICCII+
53	+	+	-	+	-	+	+	-	+	+	DOCCII+	VCII-	IVCII+	CCII	ICCII+
54	+	+	-	-	-	-	+	-	+	+	CCII+/-	VCII-	IVCII+	ICCII	ICCII+
55	+	+	-	+	-	+	+	-	-	-	DOCCII+	VCII-	IVCII-	CCII	ICCII-
56	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	CCII+/-	VCII-	IVCII-	ICCII	ICCII-
57	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	DOCCII-	VCII+	IVCII+	CCII	ICCII+
58	+	+	-	-	-	+	-	+	+	+	CCII+/-	VCII+	IVCII+	ICCII	ICCII+
59	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	DOCCII-	VCII+	IVCII-	CCII	ICCII-
60	+	+	-	-	-	+	-	+	-	-	CCII+/-	VCII+	IVCII-	ICCII	ICCII-
61	+	+	-	+	-	-	-	-	+	-	DOCCII-	VCII-	IVCII+	CCII	ICCII-
62	+	+	-	-	-	+	-	-	+	-	CCII+/-	VCII-	IVCII+	ICCII	ICCII-
63	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	DOCCII-	VCII-	IVCII-	CCII	ICCII+
64	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+	CCII+/-	VCII-	IVCII-	ICCII	ICCII+
65	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	CCII+/-	IVCII+	VCII+	CCII	CCII+
66	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	DOCCII+	IVCII+	VCII+	ICCII	CCII+
67	+	-	+	-	+	+	+	+	-	-	DOCCII+	IVCII+	VCII-	ICCII	CCII-
68	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	CCII+/-	IVCII+	VCII-	CCII	CCII-
69	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	DOCCII+	IVCII-	VCII+	ICCII	CCII-
70	+	-	+	+	+	-	+	-	+	-	CCII+/-	IVCII-	VCII+	CCII	CCII-
71	+	-	+	-	+	+	+	-	-	+	DOCCII+	IVCII-	VCII-	ICCII	CCII+
72	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	CCII+/-	IVCII-	VCII-	CCII	CCII+
73	+	-	+	+	+	+	-	+	+	-	CCII+/-	IVCII+	VCII+	CCII	CCII-
74	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-	DOCCII-	IVCII+	VCII+	ICCII	CCII-
75	+	-	+	+	+	+	-	+	-	+	CCII+/-	IVCII+	VCII-	CCII	CCII+
76	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	DOCCII-	IVCII+	VCII-	ICCII	CCII+
77	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	CCII+/-	IVCII-	VCII+	CCII	CCII+
78	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	DOCCII-	IVCII-	VCII+	ICCII	CCII+
79	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	CCII+/-	IVCII-	VCII-	CCII	CCII-
80	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	DOCCII-	IVCII-	VCII-	ICCII	CCII-
81	+	-	+	+	-	+	+	+	+	-	DOCCII+	IVCII+	VCII+	CCII	ICCII-
82	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	CCII+/-	IVCII+	VCII+	ICCII	ICCII-
83	+	-	+	+	-	+	+	+	-	+	DOCCII+	IVCII+	VCII-	CCII	ICCII+
84	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	CCII+/-	IVCII+	VCII-	ICCII	ICCII+
85	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	DOCCII+	IVCII-	VCII+	CCII	ICCII+
86	+	-	+	-	-	-	+	-	+	+	CCII+/-	IVCII-	VCII+	ICCII	ICCII+
87	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	DOCCII+	IVCII-	VCII-	CCII	ICCII-
88	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-	CCII+/-	IVCII-	VCII-	ICCII	ICCII-
89	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	CCII+/-	IVCII+	VCII+	ICCII	ICCII+
90	+	-	+	+	-	-	-	+	+	+	DOCCII-	IVCII+	VCII+	CCII	ICCII+
91	+	-	+	-	-	+	-	+	-	-	CCII+/-	IVCII+	VCII-	ICCII	ICCII-
92	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-	DOCCII-	IVCII+	VCII-	CCII	ICCII-
93	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	CCII+/-	IVCII-	VCII+	ICCII	ICCII-
94	+	-	+	+	-	-	-	-	+	-	DOCCII-	IVCII-	VCII+	CCII	ICCII-
95	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	CCII+/-	IVCII-	VCII-	ICCII	ICCII+
96	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	CCII+/-	IVCII-	VCII-	ICCII	ICCII+
97	+	-	-	+	+	-	+	+	+	-	CCII+/-	IVCII+	IVCII+	CCII	CCII-
98	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	DOCCII+	IVCII+	IVCII+	ICCII	CCII-

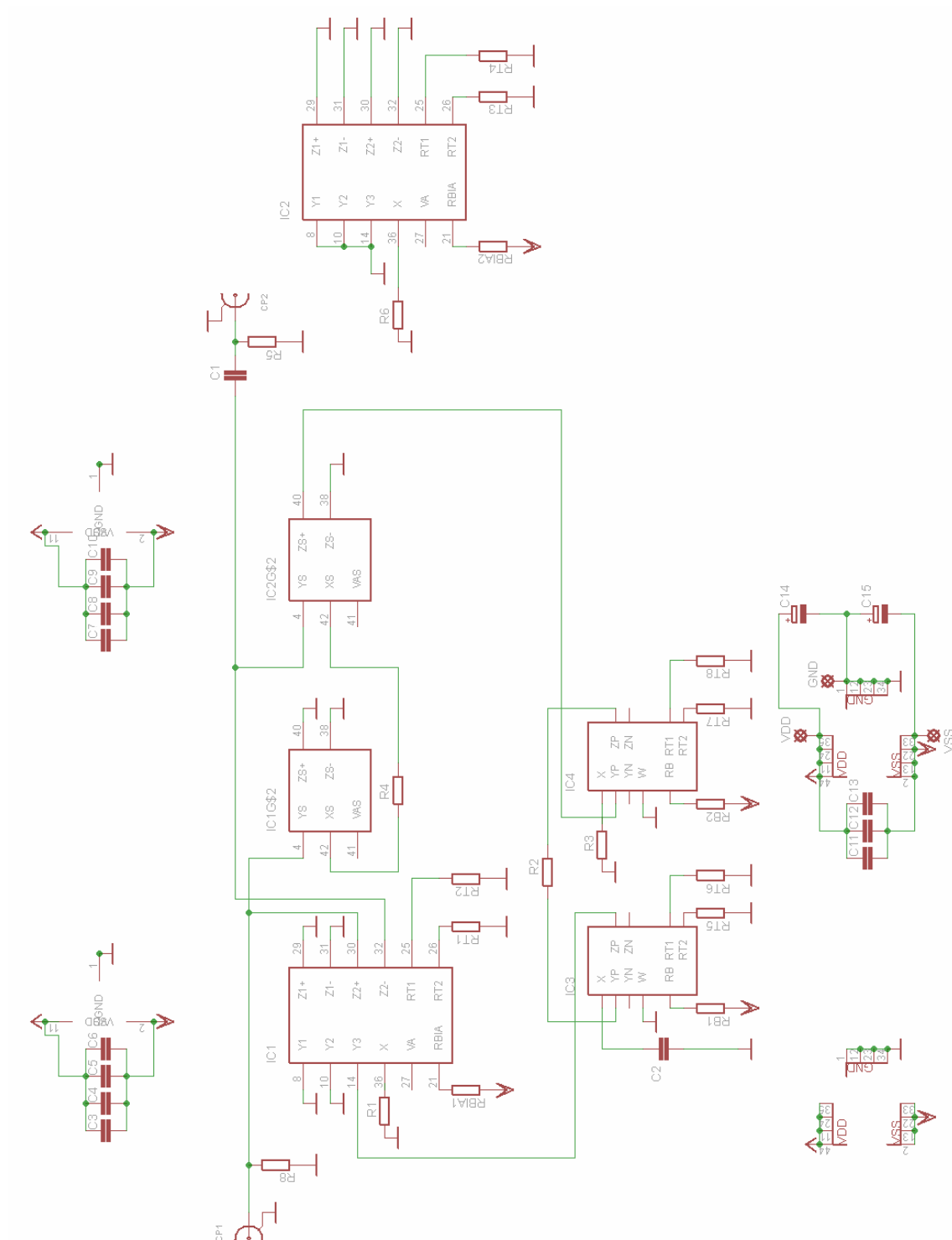
Zapojení	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>5</sub>	X1	X2	X3	X4	X5
99	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	CCII+/-	IVCII+	IVCII-	CCII	CCII+
100	+	-	-	-	+	+	+	+	-	+	DOCCII+	IVCII+	IVCII-	ICCII	CCII+
101	+	-	-	+	+	-	+	-	+	+	CCII+/-	IVCII-	IVCII+	CCII	CCII+
102	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	DOCCII+	IVCII-	IVCII+	ICCII	CCII+
103	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	DOCCII+	IVCII-	IVCII-	ICCII	CCII-
104	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	CCII+/-	IVCII-	IVCII-	CCII	CCII-
105	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	CCII+/-	IVCII+	IVCII+	CCII	CCII+
106	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	DOCCII-	IVCII+	IVCII+	ICCII	CCII+
107	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-	CCII+/-	IVCII+	IVCII-	CCII	CCII-
108	+	-	-	-	+	-	-	+	-	-	DOCCII-	IVCII+	IVCII-	ICCII	CCII-
109	+	-	-	+	+	+	-	-	+	-	CCII+/-	IVCII-	IVCII+	CCII	CCII-
110	+	-	-	-	+	-	-	-	+	-	DOCCII-	IVCII-	IVCII+	ICCII	CCII-
111	+	-	-	+	+	+	-	-	-	+	CCII+/-	IVCII-	IVCII-	CCII	CCII+
112	+	-	-	-	+	-	-	-	-	+	DOCCII-	IVCII-	IVCII-	ICCII	CCII+
113	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	DOCCII+	IVCII+	IVCII+	CCII	ICCII+
114	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	CCII+/-	IVCII+	IVCII+	ICCII	ICCII+
115	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	DOCCII+	IVCII+	IVCII-	CCII	ICCII-
116	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	CCII+/-	IVCII+	IVCII-	ICCII	ICCII-
117	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	DOCCII+	IVCII-	IVCII+	CCII	ICCII-
118	+	-	-	-	-	-	+	-	+	-	CCII+/-	IVCII-	IVCII+	ICCII	ICCII-
119	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	DOCCII+	IVCII-	IVCII-	CCII	ICCII+
120	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+	CCII+/-	IVCII-	IVCII-	ICCII	ICCII+
121	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	DOCCII-	IVCII+	IVCII+	CCII	ICCII-
122	+	-	-	-	-	+	-	+	+	-	CCII+/-	IVCII+	IVCII+	ICCII	ICCII-
123	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	DOCCII-	IVCII+	IVCII-	CCII	ICCII+
124	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	CCII+/-	IVCII+	IVCII-	ICCII	ICCII+
125	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	CCII+/-	IVCII-	IVCII+	ICCII	ICCII+
126	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	DOCCII-	IVCII-	IVCII+	CCII	ICCII+
127	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	CCII+/-	IVCII-	IVCII-	ICCII	ICCII-
128	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	DOCCII-	IVCII-	IVCII-	CCII	ICCII-
129	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	DOICCII+	VCII+	VCII+	ICCII	CCII+
130	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	ICCII+/-	VCII+	VCII+	CCII	CCII+
131	-	+	+	-	+	+	+	+	-	-	DOICCII+	VCII+	VCII-	ICCII	CCII-
132	-	+	+	-	+	+	+	+	-	-	DOICCII+	VCII+	VCII-	ICCII	CCII-
133	-	+	+	+	+	-	+	-	+	-	ICCII+/-	VCII-	VCII+	CCII	CCII-
134	-	+	+	-	+	+	+	-	+	-	DOICCII+	VCII-	VCII+	ICCII	CCII-
135	-	+	+	+	+	-	+	-	-	+	ICCII+/-	VCII-	VCII-	CCII	CCII+
136	-	+	+	-	+	+	+	-	-	+	DOICCII+	VCII-	VCII-	ICCII	CCII+
137	-	+	+	+	+	+	-	+	+	-	ICCII+/-	VCII+	VCII+	CCII	CCII-
138	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	DOICCII-	VCII+	VCII+	ICCII	CCII-
139	-	+	+	+	+	+	-	+	-	+	ICCII+/-	VCII+	VCII-	CCII	CCII+
140	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	DOICCII-	VCII+	VCII-	ICCII	CCII+
141	-	+	+	+	+	+	-	-	+	+	ICCII+/-	VCII-	VCII+	CCII	CCII+
142	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	DOICCII-	VCII-	VCII+	ICCII	CCII+
143	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	ICCII+/-	VCII-	VCII-	CCII	CCII-
144	-	+	+	-	+	-	-	-	-	-	DOICCII-	VCII-	VCII-	ICCII	CCII-
145	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	DOICCII+	VCII+	VCII+	CCII	ICCII-
146	-	+	+	-	-	-	+	+	+	-	ICCII+/-	VCII+	VCII+	ICCII	ICCII-
147	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	DOICCII+	VCII+	VCII-	CCII	ICCII+
148	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	ICCII+/-	VCII+	VCII-	ICCII	ICCII+
149	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+	DOICCII+	VCII-	VCII+	CCII	ICCII+

Zapojení	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>5</sub>	X1	X2	X3	X4	X5
150	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	ICCII+/-	VCII-	VCII+	ICCII	ICCII+
151	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	DOICCII+	VCII-	VCII-	CCII	ICCII-
152	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-	ICCII+/-	VCII-	VCII-	ICCII	ICCII-
153	-	+	+	-	-	+	-	+	+	+	ICCII+/-	VCII+	VCII+	ICCII	ICCII+
154	-	+	+	-	-	+	-	+	+	+	ICCII+/-	VCII+	VCII+	ICCII	ICCII+
155	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-	DOICCII-	VCII+	VCII-	CCII	ICCII-
156	-	+	+	-	-	+	-	+	-	-	ICCII+/-	VCII+	VCII-	ICCII	ICCII-
157	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	DOICCII-	VCII-	VCII+	CCII	ICCII-
158	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	ICCII+/-	VCII-	VCII+	ICCII	ICCII-
159	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	DOICCII-	VCII-	VCII-	CCII	ICCII+
160	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+	ICCII+/-	VCII-	VCII-	ICCII	ICCII+
161	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-	DOICCII+	VCII+	IVCII+	ICCII	CCII-
162	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	ICCII+/-	VCII+	IVCII+	CCII	CCII-
163	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	DOICCII+	VCII+	IVCII-	ICCII	CCII+
164	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	ICCII+/-	VCII+	IVCII-	CCII	CCII+
165	-	+	-	-	+	+	+	-	+	+	DOICCII+	VCII-	IVCII+	ICCII	CCII+
166	-	+	-	+	+	-	+	-	+	+	ICCII+/-	VCII-	IVCII+	CCII	CCII+
167	-	+	-	-	+	+	+	-	-	-	DOICCII+	VCII-	IVCII-	ICCII	CCII-
168	-	+	-	-	+	+	+	-	-	-	DOICCII+	VCII-	IVCII-	ICCII	CCII-
169	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	ICCII+/-	VCII+	IVCII+	CCII	CCII+
170	-	+	-	-	+	-	-	+	+	+	DOICCII-	VCII+	IVCII+	ICCII	CCII+
171	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	ICCII+/-	VCII+	IVCII-	CCII	CCII-
172	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	DOICCII-	VCII+	IVCII-	ICCII	CCII-
173	-	+	-	+	+	+	-	-	+	-	ICCII+/-	VCII-	IVCII+	CCII	CCII-
174	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	DOICCII-	VCII-	IVCII+	ICCII	CCII-
175	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	ICCII+/-	VCII-	IVCII-	CCII	CCII+
176	-	+	-	-	+	-	-	-	-	+	DOICCII-	VCII-	IVCII-	ICCII	CCII+
177	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	DOICCII+	VCII+	IVCII+	CCII	ICCII+
178	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	ICCII+/-	VCII+	IVCII+	ICCII	ICCII+
179	-	+	-	+	-	+	+	+	-	-	DOICCII+	VCII+	IVCII-	CCII	ICCII-
180	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-	ICCII+/-	VCII+	IVCII-	ICCII	ICCII-
181	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	DOICCII+	VCII-	IVCII+	CCII	ICCII-
182	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	ICCII+/-	VCII-	IVCII+	ICCII	ICCII-
183	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	DOICCII+	VCII-	IVCII-	CCII	ICCII+
184	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	ICCII+/-	VCII-	IVCII-	ICCII	ICCII+
185	-	+	-	-	-	+	-	+	+	-	ICCII+/-	VCII+	IVCII+	ICCII	ICCII-
186	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	DOICCII-	VCII+	IVCII+	CCII	ICCII-
187	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	ICCII+/-	VCII+	IVCII-	ICCII	ICCII+
188	-	+	-	+	-	-	-	+	-	+	DOICCII-	VCII+	IVCII-	CCII	ICCII+
189	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	ICCII+/-	VCII-	IVCII+	ICCII	ICCII+
190	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	ICCII+/-	VCII-	IVCII+	ICCII	ICCII+
191	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	DOICCII-	VCII-	IVCII-	CCII	ICCII-
192	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	ICCII+/-	VCII-	IVCII-	ICCII	ICCII-
193	-	-	+	+	+	-	+	+	+	-	ICCII+/-	IVCII+	VCII+	CCII	CCII-
194	-	-	+	-	+	+	+	+	+	-	DOICCII+	IVCII+	VCII+	ICCII	CCII-
195	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	ICCII+/-	IVCII+	VCII-	CCII	CCII+
196	-	-	+	-	+	+	+	+	-	+	DOICCII+	IVCII+	VCII-	ICCII	CCII+
197	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	DOICCII+	IVCII-	VCII+	ICCII	CCII+
198	-	-	+	+	+	-	+	-	+	+	ICCII+/-	IVCII-	VCII+	CCII	CCII+
199	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	DOICCII+	IVCII-	VCII-	ICCII	CCII-
200	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	ICCII+/-	IVCII-	VCII-	CCII	CCII-

Zapojení	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>5</sub>	X1	X2	X3	X4	X5
201	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	ICCII+/-	IVCII+	VCII+	CCII	CCII+
202	-	-	+	-	+	-	-	+	+	+	DOICCCII-	IVCII+	VCII+	ICCII	CCII+
203	-	-	+	+	+	+	-	+	-	-	ICCII+/-	IVCII+	VCII-	CCII	CCII-
204	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-	DOICCCII-	IVCII+	VCII-	ICCII	CCII-
205	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	ICCII+/-	IVCII-	VCII+	CCII	CCII-
206	-	-	+	-	+	-	-	-	+	-	DOICCCII-	IVCII-	VCII+	ICCII	CCII-
207	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	ICCII+/-	IVCII-	VCII-	CCII	CCII+
208	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	DOICCCII-	IVCII-	VCII-	ICCII	CCII+
209	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+	DOICCCII+	IVCII+	VCII+	CCII	ICCII+
210	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	ICCII+/-	IVCII+	VCII+	ICCII	ICCII+
211	-	-	+	+	-	+	+	+	-	-	DOICCCII+	IVCII+	VCII-	CCII	ICCII-
212	-	-	+	-	-	-	+	+	-	-	ICCII+/-	IVCII+	VCII-	ICCII	ICCII-
213	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	DOICCCII+	IVCII-	VCII+	CCII	ICCII-
214	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	ICCII+/-	IVCII-	VCII+	ICCII	ICCII-
215	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	DOICCCII+	IVCII-	VCII-	CCII	ICCII+
216	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	ICCII+/-	IVCII-	VCII-	ICCII	ICCII+
217	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	DOICCCII-	IVCII+	VCII+	CCII	ICCII-
218	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	ICCII+/-	IVCII+	VCII+	ICCII	ICCII-
219	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	ICCII+/-	IVCII+	VCII-	ICCII	ICCII+
220	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	DOICCCII-	IVCII+	VCII-	CCII	ICCII+
221	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	ICCII+/-	IVCII-	VCII+	ICCII	ICCII+
222	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	DOICCCII-	IVCII-	VCII+	CCII	ICCII+
223	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	ICCII+/-	IVCII-	VCII-	ICCII	ICCII-
224	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	DOICCCII-	IVCII-	VCII-	CCII	ICCII-
225	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	DOICCCII+	IVCII+	IVCII+	ICCII	CCII+
226	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	DOICCCII+	IVCII+	IVCII+	ICCII	CCII+
227	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	ICCII+/-	IVCII+	IVCII-	CCII	CCII-
228	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	DOICCCII+	IVCII+	IVCII-	ICCII	CCII-
229	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	ICCII+/-	IVCII-	IVCII+	CCII	CCII-
230	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	DOICCCII+	IVCII-	IVCII+	ICCII	CCII-
231	-	-	-	+	+	-	+	-	-	+	ICCII+/-	IVCII-	IVCII-	CCII	CCII+
232	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	DOICCCII+	IVCII-	IVCII-	ICCII	CCII+
233	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-	ICCII+/-	IVCII+	IVCII+	CCII	CCII-
234	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	DOICCCII-	IVCII+	IVCII+	ICCII	CCII-
235	-	-	-	+	+	+	-	+	-	+	ICCII+/-	IVCII+	IVCII-	CCII	CCII+
236	-	-	-	-	+	-	-	+	-	+	DOICCCII-	IVCII+	IVCII-	ICCII	CCII+
237	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	ICCII+/-	IVCII-	IVCII+	CCII	CCII+
238	-	-	-	-	+	-	-	-	+	+	DOICCCII-	IVCII-	IVCII+	ICCII	CCII+
239	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	ICCII+/-	IVCII-	IVCII-	CCII	CCII-
240	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	DOICCCII-	IVCII-	IVCII-	ICCII	CCII-
241	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	DOICCCII+	IVCII+	IVCII+	CCII	ICCII-
242	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	ICCII+/-	IVCII+	IVCII+	ICCII	ICCII-
243	-	-	-	+	-	+	+	+	-	+	DOICCCII+	IVCII+	IVCII-	CCII	ICCII+
244	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+	ICCII+/-	IVCII+	IVCII-	ICCII	ICCII+
245	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	DOICCCII+	IVCII-	IVCII+	CCII	ICCII+
246	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+	ICCII+/-	IVCII-	IVCII+	ICCII	ICCII+
247	-	-	-	+	-	+	+	-	-	-	DOICCCII+	IVCII-	IVCII-	CCII	ICCII-
248	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	ICCII+/-	IVCII-	IVCII-	ICCII	ICCII-
249	-	-	-	+	-	-	-	+	+	+	DOICCCII-	IVCII+	IVCII+	CCII	ICCII+
250	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	ICCII+/-	IVCII+	IVCII+	ICCII	ICCII+
251	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	DOICCCII-	IVCII+	IVCII-	CCII	ICCII-

Zapojení	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>5</sub>	X1	X2	X3	X4	X5
252	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	ICCII+/-	IVCII+	IVCII-	ICCII	ICCII-
253	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	DOICCII-	IVCII-	IVCII+	CCII	ICCII-
254	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	ICCII+/-	IVCII-	IVCII+	ICCII	ICCII-
255	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	ICCII+/-	IVCII-	IVCII-	ICCII	ICCII+
256	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	DOICCII-	IVCII-	IVCII-	CCII	ICCII+

## Příloha II: Praktická realizace zapojení v Eaglu

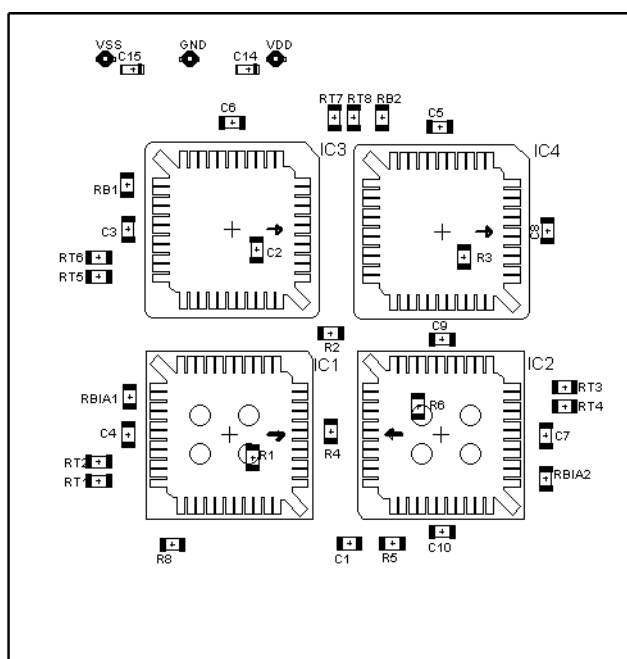


**Obr. II.1.:** Schéma zapojení realizovaného obvodu

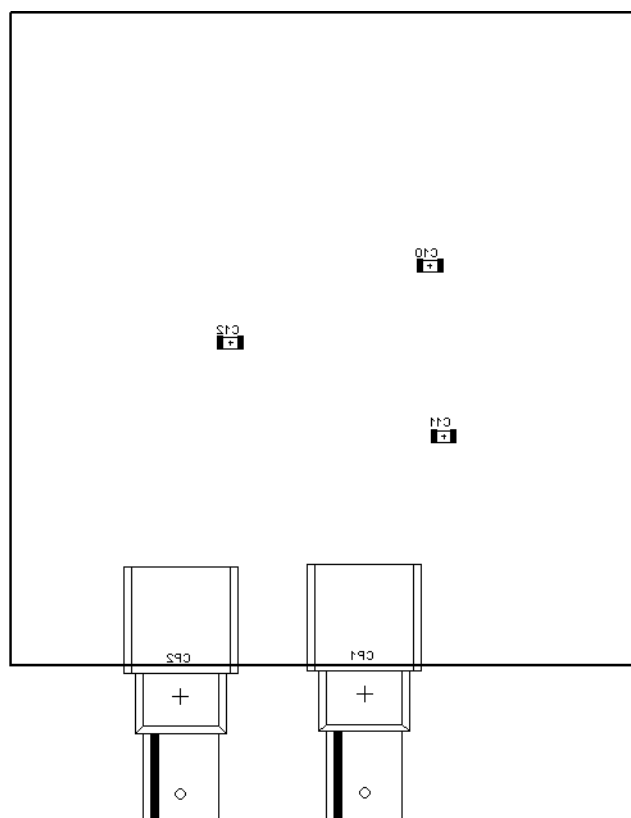


**Tab. II.1: Seznam součástek**

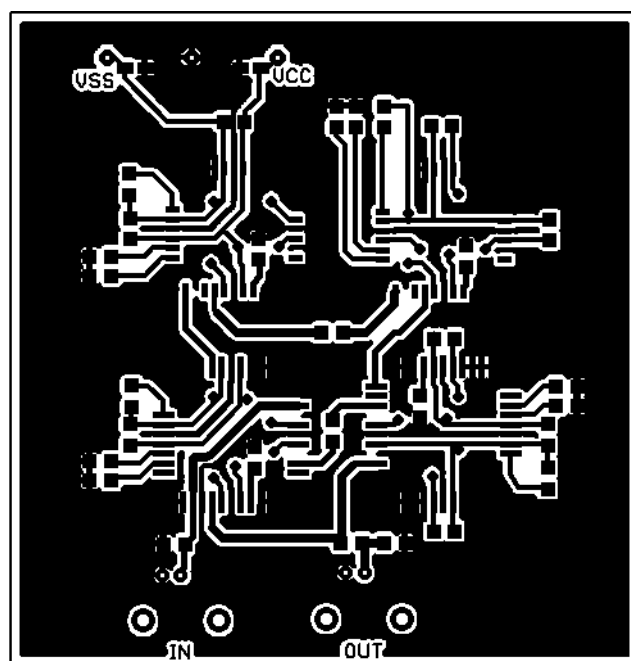
Označení	Hodnota	Pouzdro
C1,C2	1nF	C1206
C3-C13	47 nF    68 pF	C1206
C14,C15	4,7 $\mu$ F	A/3216-18R
CP1,CP2	-	BNC
IC1,IC2	UCC – N1B 0520	PLCCSM44
IC3,IC4	UVC– N1C 0520	PLCCSM44
R1	2,4 k $\Omega$	R1206
R2,R3,R4,R6	1 k $\Omega$	R1206
R5	2,2 k $\Omega$ pro Q=0,707 560 $\Omega$ pro Q=3	R1206
RB1,RB2,RBIA1,RBIA2	4,7 k $\Omega$	R1206
RT1-RT8	8,2 k $\Omega$	R1206
VDD	-	pad 1,6/0,8
VSS	-	pad 1,6/0,8
GND	-	pad 1,6/0,8



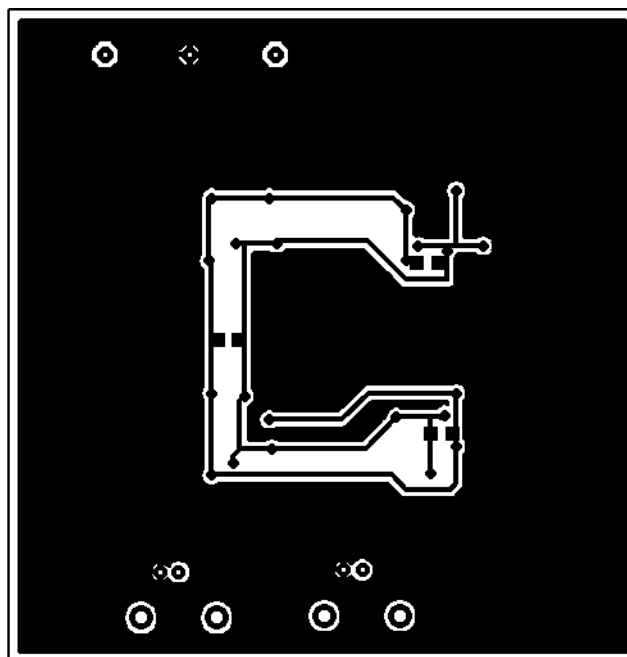
**Obr. II.2.: Rozmístění součástek strana TOP**



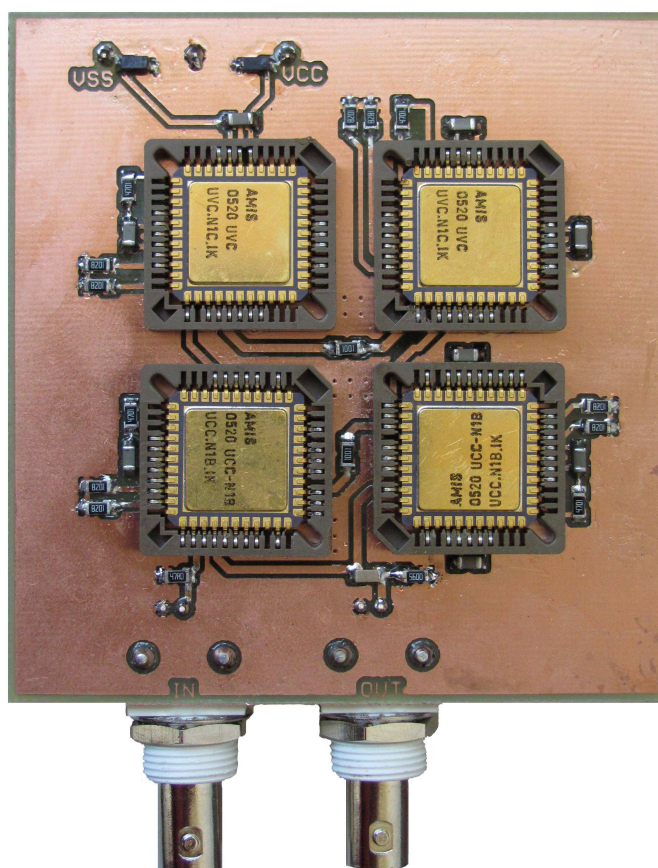
**Obr. II.3.:** Rozmístění součástek strana BOTTOM



**Obr. II.4.:** Deska plošných spojů strana TOP



**Obr. II.5.:** Deska plošných spojů strana BOTTOM



**Obr. II.6.:** Realizovaná prototypová deska plošných spojů