

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH KMITOČTOVÝCH FILTRŮ S PROUDOVÝMI  
AKTIVNÍMI PRVKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

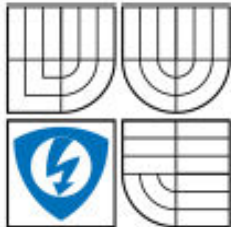
JIŘÍ HORT

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH KMITOČTOVÝCH FILTRŮ S PROUDOVÝMI  
AKTIVNÍMI PRVKY  
DESIGN OF FREQUENCY FILTERS WITH ACTIVE CURRENT ELEMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JIŘÍ HORT

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. KAMIL VRBA, CSc.

BRNO 2008

## ANOTACE

Tato bakalářská práce je věnována návrhu kmitočtových filtrů s proudovými aktivními prvky.

V úvodní části se věnuji popisu základních vlastností a dělení filtrů. Dále jsou pak uvedeny některé možnosti postupu při navrhování takového filtru.

Prvek CMI (Current Mirror and Inverter) se jeví jako nejvhodnější možnost řešení pro aplikace pracující v čistě proudovém módu. Název tohoto prvku by se dal přeložit jako Proudové zrcadlo a invertor, což i plně vystihuje jeho funkci. K návrhovým účelům slouží jeho zobecněná verze GCMI.

Konkrétněji je v této práci popsána metoda návrhu pomocí autonomního obvodu vycházející z plné admitanční sítě s jedním i se dvěma aktivními prvky CMI. Z každé admitanční sítě je vždy odvozeno několik autonomních obvodů s minimálně čtyřmi pasivními prvky. Jednotlivé autonomní obvody jsou pak spolu s jejich charakteristickou rovnicí uvedeny v přehledné tabulce.

Na závěr je ukázán návrh vybraného multifunkčního kmitočtového filtru pracujícího jak v proudovém tak v napěťovém módu i s jednotlivými charakteristikami pro jeho různé přenosové funkce.

## KLÍČOVÁ SLOVA

autonomní obvod, aktivní prvek, kmitočtový filtr, CMI, proudový mód, proudový zesilovač

## ABSTRACT

This bachelor's thesis deal with designing frequency filters with current active elements.

Preamble is devoted to description of basic properties and division of filters. Next part presents some way of designing frequency filter.

The element CMI (Current Mirror and Inverter) seems like optimal possible solution for application working in purely current mode. To design purposes serves generalized version GCMI.

This thesis describes way of designing the autonomous circuit based on full admittance nets with one and two active elements CMI. Several autonomous circuits with four or five passive elements are derived from every admittance network. Individual autonomous circuits are then presented in chart with their characteristic equation.

In conclusion is shown design of selected multifunction frequency filter working in current mode as in voltage mode together with characterization for its various transmission functions.

## KEYWORDS

autonomous circuit, active element, frequency filter, CMI, current mode, current amplifier,

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan

Jméno a příjmení: Jiří Hort

Bytem: Komenského náměstí 620, 665 01, Rosice

Narozen (datum a místo): 5.12.1984 v Brně

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

disertační práce

bakalářská práce

diplomová práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Návrh kmitočtových filtrů s proudovými aktivními prvky

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Ing. Kamil Vrba, CSc

Ústav: telekomunikací

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

tištěné formě – počet exemplářů 1

elektronické formě – počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti  
ihned po uzavření této smlouvy  
1 rok po uzavření této smlouvy  
3 roky po uzavření této smlouvy  
5 let po uzavření této smlouvy  
10 let po uzavření této smlouvy  
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

---

\* hodící se zaškrtněte

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "Návrh kmitočtových filtrů s proudovými aktivními prvky" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona.121/2000Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne .....

.....  
(podpis autora)

## OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b> .....	<b>9</b>
POUŽITÉ SYMBOLY .....	9
POUŽITÉ ZKRATKY .....	10
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>11</b>
<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>2. KMITOČTOVÉ FILTRY</b> .....	<b>13</b>
2.1 HLAVNÍ DĚLENÍ FILTRŮ PODLE PŘENÁŠENÉHO SPEKTRA .....	13
2.2 DĚLENÍ FILTRŮ PODLE TYPU POUŽITÝCH PRVKŮ .....	13
2.3 REŽIMY OBVODŮ .....	14
2.3.1 <i>Napěťový mód</i> .....	14
2.3.2 <i>Proudový mód</i> .....	14
2.3.3 <i>Směšený mód</i> .....	15
<b>3. PROUDOVÝ AKTIVNÍ PRVEK</b> .....	<b>16</b>
3.1 PROUDOVÝ OPERAČNÍ ZESILOVAČ .....	16
3.2 CURRENT MIRROR AND INVERTER (CMI) .....	18
<b>4. METODY NÁVRHU KMITOČTOVÝCH FILTRŮ A OSCILÁTORŮ</b> .....	<b>20</b>
4.1 NÁVRH POMOCÍ AUTONOMNÍHO OBVODU .....	20
4.2 METODA NÁVRHU S VYUŽITÍM SYNTETICKÝCH PRVKŮ .....	22
4.2.1 <i>Imitancní invertor – gyrátor</i> .....	22
4.2.2 <i>Imitancní konvertor – GIC (General Impedance Converter)</i> .....	23
4.2.3 <i>Využití syntetických prvků s imitací vyšších řádů</i> .....	24
4.2.4 <i>Metoda frekvenčně závislých děličů</i> .....	24
4.2.4.1 <i>Admitancní mód</i> .....	25
4.2.4.2 <i>Impedanční mód</i> .....	26
4.3 METODA VYUŽÍVAJÍCÍ INTEGRÁTOROVÉ BLOKY .....	27
4.3.1 <i>Metoda stavové proměnné</i> .....	27
4.3.2 <i>Metoda LEAP-PROG</i> .....	28
<b>5. NÁVRH KMITOČTOVÝCH FILTRŮ S AKTIVNÍM PRVKEM CMI</b> .....	<b>30</b>
5.2 UKÁZKY NÁVRHU KMITOČTOVÉHO FILTRU .....	31
5.2.1 <i>Kmitočtové filtry s jedním aktivním prvkem CMI</i> .....	31
5.2.2 <i>Kmitočtové filtry se dvěma aktivními prvky CMI</i> .....	34
<b>6. ZÁVĚR</b> .....	<b>40</b>
<b>7. POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>41</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

### POUŽITÉ SYMBOLY

symbol	jednotky	význam
$a, b$	[-]	Koeficienty přenosu
C	[F]	Kapacita
$f$	[Hz]	kmitočet
$f_m$	[Hz]	Charakteristický (mezní) kmitočet filtru
G	[S]	Vodivost
I	[A]	Proud
$i$	[A]	Okamžitá hodnota proudu
$I_{IN}$	[A]	Vstupní proud
$I_{OUT}$	[V]	Výstupní proud
$K, K(p)$	[-]	Přenos napětí nebo proudu (Laplaceův obraz)
L	[H]	Indukčnost
$p$	[Hz]	Komplexní proměnná– Laplaceův operátor
Q	[-]	Činitel jakosti filtru
R	[ $\Omega$ ]	Odpor
U	[V]	Napětí
$\omega$	[-]	Úhlový kmitočet
$\omega_m$	[-]	Úhlový mezní kmitočet
X, Y, Z	[-]	Označení svorek prvku CMI
Y	[S]	Admitance
$Y_1, Y_2, Y_3, X, Z_{1+}, Z_{1-}, Z_{2+}, Z_{2-}$	[-]	Označení svorek univerzálního proudového konveju

### **POUŽITÉ ZKRATKY**

<b>zkratka</b>	<b>význam</b>
C/VM	Smíšený režim, buzení proudem a odebírání napětí (Current/Voltage Mode)
CE	Charakteristická rovnice
CMI	Proudové zrcadlo a invertor (Current Mirror and Inverter)
COA	Proudový operační zesilovač (Current Operational Amplifier)
DP	Dolní propust
GCMi	Zobecněná verze proudového zrcadla a invertoru (Generalized Current Mirror and Inverter)
HP	Horní propust
OZ	Operační zesilovač
PP	Pásmová propust
PZ	Pásmová zadrž
SNAP	Program pro symbolickou analýzu obvodů (Symbolic Network Analysis Program)
UCC	Universal Current Conveyor – univerzální proudový konvektor
V/CM	Smíšený režim, buzení napětím a odebírání proud (Voltage/Current Mode)
VM	Napěťový mód (Voltage Mode)
VOA	Napěťový operační zesilovač (Voltage Operational Amplifier)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 2.1</b> Obecné zapojení obvodu v napěťovém módu .....	14
<b>Obr. 2.2</b> Obecné zapojení obvodu v proudovém módu .....	14
<b>Obr. 2.3</b> Obecné zapojení obvodu ve smíšeném módu: a) napěťové buzení, proudový odběr, b) proudové buzení, odběr napětí .....	15
<b>Obr.3.2:</b> Schématická značka CMI .....	18
<b>Obr.3.3</b> a) schématická značka prvku MCMI, b) možná realizace pomocí univerzálního proudového konveju, c) schématická značka prvku GCMI (Generalized Current and Inverter).....	19
<b>Obr.4.1</b> Obecné zapojení aktivního prvku do admitanční sítě .....	20
<b>Obr.4.2</b> Znázornění principu imitačního investoru – gyrátoru .....	22
<b>Obr.4.3</b> Impedanční konvertor: a) impedance na vstupu, b) impedance na výstupu .....	23
<b>Obr.4.4</b> Impedanční dělič v a) proudovém b) napěťovém režimu .....	24
<b>Obr.4.5</b> Admitanční dělič v a) proudovém b) napěťovém režimu .....	24
<b>Obr. 4.6</b> Dělič s admitancemi vyšších řádů v napěťovém módu .....	25
<b>Obr.4.7</b> Dělič tvořený impedancemi vyšších řádů v napěťovém módu .....	26
<b>Obr.4.9</b> Kaskádní zapojení neinvertujících integrátorů se zpětnými vazbami. 28	
<b>Obr.4.10</b> Znázornění zapojení zpětných vazeb u metody LEAP-PROG.....	28
<b>Obr. 5.1</b> Úplná admitanční síť s jedním aktivním prvkem GCMI .....	30
<b>Obr. 5.3</b> Navržený multifunkční kmitočtový filtr v proudovém módu .....	33
<b>Obr. 5.4</b> Navržený multifunkční kmitočtový filtr v napěťovém módu .....	33
<b>Obr.5.5</b> Navržený kmitočtový filtr v proudovém módu .....	36
<b>Obr.5.6</b> Zapojení filtru v proudovém módu .....	37
<b>Obr.5.7</b> Simulované charakteristiky kmitočtového filtru v proudovém módu ...	38
<b>Obr.5.8</b> Navržený kmitočtový filtr v napěťovém módu .....	38
<b>Obr.5.9</b> Simulované charakteristiky kmitočtového filtru v napěťovém módu ...	39

## 1. Úvod

Mezi základní stavební prvky obvodů určených pro zpracování signálů patří kmitočtové filtry. Tyto filtry však nacházejí využití i v dalších oblastech elektroniky a elektrotechniky (radiotechnika, elektroakustika, regulační, silnoproudá či měřicí technika) [1].

Tyto filtry se většinou provozují v napěťovém módu, kde je jako aktivního prvku využito operačního zesilovače OZ (tedy napěťového operačního zesilovače VOA-Voltage Operating Amplifier), nebo prvky pracující ve smíšeném módu (proudové konvejory, nebo transkondukční zesilovače OTA).

S dnešním vývojem elektroniky a elektrotechniky vznikají stále vyšší nároky na jednotlivé vlastnosti kmitočtových filtrů. Mezi tyto vlastnosti patří dosažení větší šířky frekvenčního pásma zpracovávaných signálů, snížení napájecího napětí při zachování dostatečného odstupů zpracovávaného signálu od šumu.

S řešením těchto požadavků přichází používání aktivních prvků v čistě proudovém módu (informace v obvodu přenášená proudovými signály), které se díky svým vlastnostem nacházejí stále větší uplatnění v těchto obvodech.

## 2. KMITOČTOVÉ FILTRY

Kmitočtové filtry jsou dvojbrany, které propouštějí složky spektra zpracovávaných signálů v určitém pásmu kmitočtů, toto pásmo nazýváme propustným pásmem. Naopak mimo toto propustné pásmo jsou spektrální složky silně utlumovány a tvoří nepropustné pásmo neboli pásmo potlačení. Hranici mezi propustným pásmem a pásmem potlačení udává mezní kmitočet  $f_m$ .

### 2.1 HLAVNÍ DĚLENÍ FILTRŮ PODLE PŘENÁŠENÉHO SPEKTRA

Rozdělení filtrů podle přenášeného kmitočtového spektra patří mezi nejdůležitější dělení filtrů. V tab.2.1 jsou uvedeny jednotlivé typy filtrů.

**Tab.2.1** Typy filtrů a jejich obecné tvary přenosů

Číslo	Typ	Popis	Obecný tvar přenosu	Pozn
1	<i>Dolní propust (DP)</i>	propouští signály s nižšími kmitočty než mezní kmitočet $f_m$	$K(p) = \frac{a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$	(2.1)
2	<i>Horní propust (HP)</i>	propouští signály s vyššími kmitočty než mezní kmitočet $f_m$	$K(p) = \frac{a_2 p^2}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$	(2.2)
3	<i>Pásmová propust (PP)</i>	propouští signály s kmitočty mezi dolním a horním mezním kmitočtem $f_m$	$K(p) = \frac{a_1 p}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$	(2.3)
4	<i>Pásmová zádrž (PZ)</i>	propouští všechny signály mimo signálů s kmitočty mezi horním a dolním mezním kmitočtem $f_m$	$K(p) = \frac{a_1 p^2 + a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$	(2.4)

### 2.2 DĚLENÍ FILTRŮ PODLE TYPU POUŽITÝCH PRVKŮ

Podle typu použitých prvků filtry rozdělujeme na aktivní a pasivní. **Pasivní filtry** obsahují pouze pasivní součástky (rezistory, kapacity, indukty). Přenos v propustném pásmu nemůže být větší jak 1. Nevýhodou jsou také indukty, které jsou rozměrné a mají parazitní vlastnosti. Tyto filtry se používají tam, kde nejsou kladeny velké nároky na přesnost aproximace přenosové funkce.

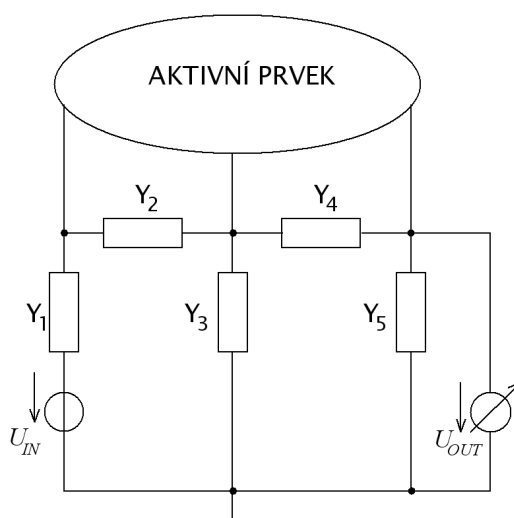
**Aktivní filtry** mohou i zesilovat vstupní signál, úroveň přenosu může být tedy větší než 1. Jako aktivní prvky se nejčastěji využívají operační zesilovače, transkonduktanční a transimpedanční zesilovače, proudové nebo napěťové konvejory. Tyto prvky rozšiřují pracovní schopnost filtrů do velmi vysokého kmitočtového pásma (stovky MHz).

## 2.3 REŽIMY OBVODŮ

Rozdělení režimů, ve kterých obvody mohou pracovat, závisí na tom, s jakými signály dané obvody pracují.

### 2.3.1 Napěťový mód

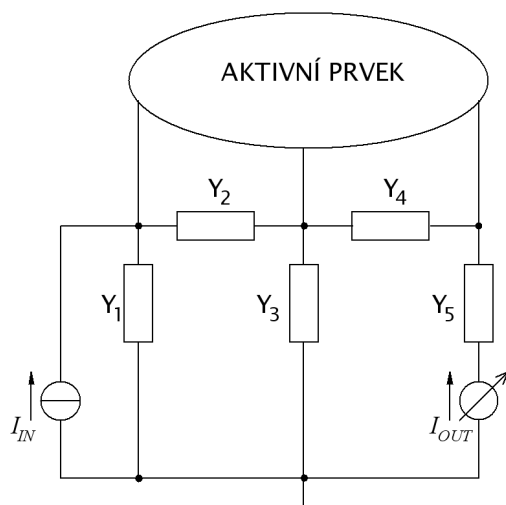
Při použití napěťového módu (Voltage-mode, VM) se připojí k obvodu dva napěťové zdroje. Jeden se připojí ke vstupu a to do větve obvodu a druhý zdroj se připojí k výstupu obvodu, mezi pasivní člen a zem, viz obr.2.1. Na výstupu je pak sledována napěťová odezva buzení vstupního zdroje. Tento mód se používá hlavně v klasických obvodech (obvody s operačními zesilovači (OZ)).



Obr. 2.1 Obecné zapojení obvodu v napěťovém módu

### 2.3.2 Proudový mód

V proudovém módu (Current-mode, CM) sledujeme výstupní proudovou odezvu na buzení proudového zdroje na vstupu obvodu. Vstupní proudový zdroj je zapojený do uzlu, výstupní proudový zdroj je pak připojen do větve, jak je ukázáno na obr. 2.2.



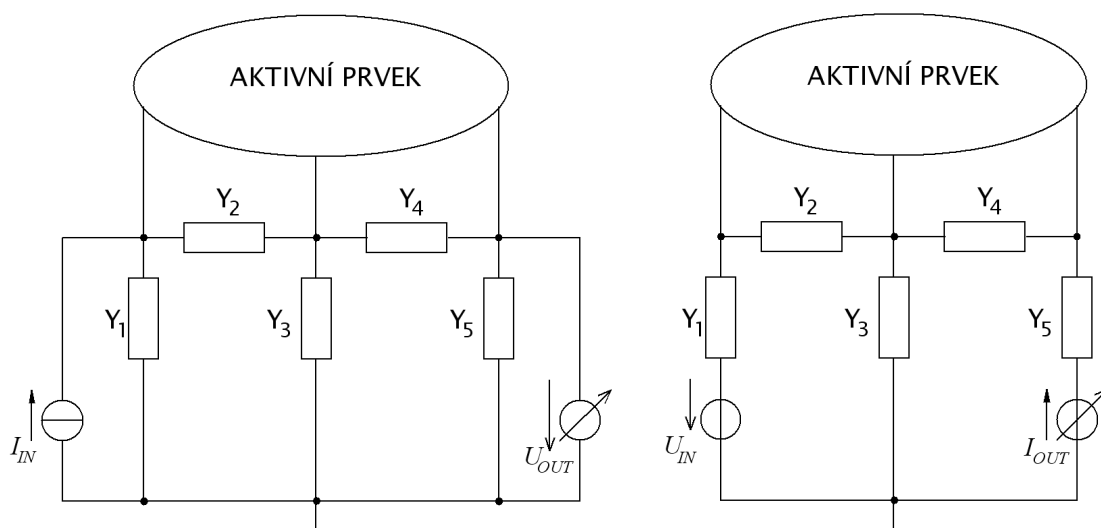
Obr. 2.2 Obecné zapojení obvodu v proudovém módu

Tento mód nachází stále širší uplatnění a to hlavně v aktivních filtrech pro oblast vyšších kmitočtů (řádově desítky MHz) [2]. Klasické RC filtry se standardní strukturou operačního zesilovače (OZ) se zde použít nedají jelikož jim to nedovolí vlastnosti dostupného reálného operačního zesilovače. Další předností obvodů v CM módu je větší dynamika a možnost činnosti při malých stejnosměrných napájecích napětích.

### 2.3.3 Smíšený mód

Tento mód je jakousi kombinací dvou předchozích zapojení (kap.2.3.1 a kap.2.3.2). Jedná se o případ kdy část obvodu, nejčastěji aktivní funkční blok (např. konvejory CCII), pracuje v módu proudovém, ale celkově obvod zpracovává signál napěťový, hovoříme pak o módu V/CM. Obdobně může existovat v obvodě i duální smíšený mód C/VM.

Zapojení zdrojů buzení a odběru signálu je využito z předchozích zapojení (Obr.2.3 a, b).



**Obr. 2.3** Obecné zapojení obvodu ve smíšeném módu: a) napěťové buzení, proudový odběr, b) proudové buzení, odběr napětí

### 3. PROUDOVÝ AKTIVNÍ PRVEK

#### 3.1 PROUDOVÝ OPERAČNÍ ZESILOVAČ

Proudový operační zesilovač COA (Current Operational Amplifier) [3] je duálním obvodem ke klasickému napěťovému operačnímu zesilovači. To znamená, že výstupní proud je řízen rozdílem vstupních proudů, proudový zisk je nekonečný, při působení záporné zpětné vazby je rozdíl proudů nulový.

Proudovými zesilovači s nulovým vstupním a nekonečným výstupním odporem s možností sdružovat vstupní signály s různými znaménky (zesilovače s diferenčními proudovými vstupy) a distribuovat výstupní proud do více míst v obvodu ( zesilovače s více výstupy) lze realizovat většinu základních operací se signály (např.: sumace, resp. difference signálu, násobení signálu konstantou). Váhování proudů se zajišťuje pomocí řízení proudových zisků zesilovačů a přídavnými impedancemi.

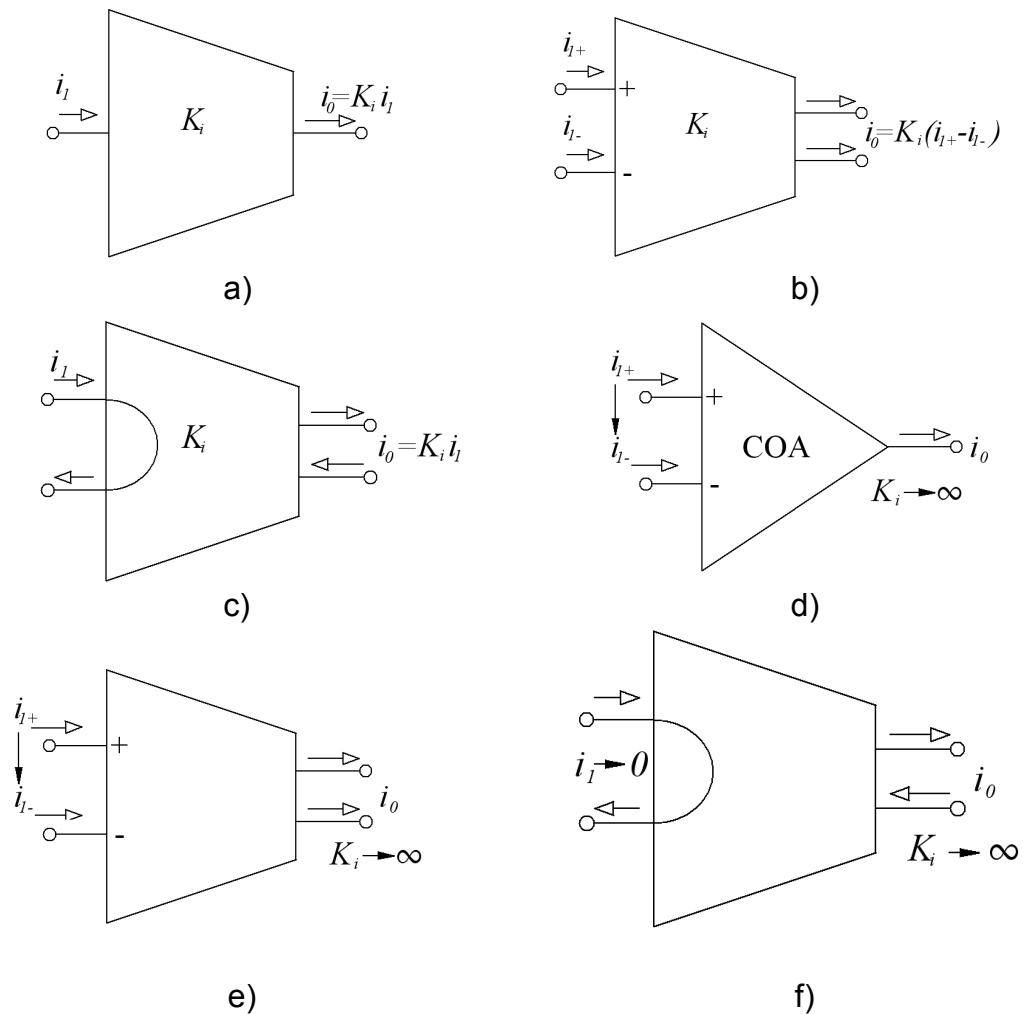
Proudové operační zesilovače z hlediska vstupů rozdělit:

- a) zesilovače s jednoduchým vstupem (jeden nízkaimpedanční vstup s možností sumace vstupních proudů),
- b) zesilovače s diferenčním vstupem (dvojice nízkaimpedančních diferenčních vstupů),
- c) zesilovače s průchozím vstupem („plovoucí“ dvojice typická pro vstupní bránu zdroje řízeného proudem).

Z hlediska výstupů je jejich rozdělení:

- a) zesilovače s jednoduchým výstupem,
- b) zesilovače s vícenásobným výstupem.

Značení jednotlivých operačních zesilovačů je na obr.3.1, kde šipky u jednotlivých vývodů značí uvažovaný směr proudů vzhledem k definici znaménka proudového přenosu  $K_I$ . Dále tyto šipky naznačují, že se jedná o proudové (nikoli napěťové svorky).



**Obr.3.1** Proudové zesilovače: a) s jedním vstupem a jedním výstupem, b) s diferenčním vstupem a dvojicí identických výstupů, c) s průchozím vstupem a dvojicí inverzních výstupů, d) proudový operační zesilovač COA, e) COA s dvojicí identických výstupů, f) COA s průchozím vstupem a diferenčním výstupem.

Proudový zisk  $K_i$  proudových zesilovačů může být konečný nebo nekonečný. Je-li tento zisk jednotkový, není nutné jej do schématické značky vpisovat. Pokud je ale tento proudový zisk nekonečný, je potřeba odlišit tyto speciální operační zesilovače i jinými schématickými značkami trojúhelníkovou značkou v případě zesilovače s jednoduchým výstupem, nebo značkou lichoběžníkovou pro zesilovače s více výstupy, viz obr. 3.1 b, c, e, f)).

Další variantou je operační zesilovač s průchozím vstupem (obr.3.1c,f), který je zde uveden s diferenčním výstupem.

K značení proudových zesilovačů lze použít následující model obecného značení operačního zesilovače:

$$xlyO, \quad (3.1)$$

kde za písmeno  $x$  lze dosadit označení vstupu (IN), za písmeno  $y$  pak označení typu výstupu (OUT) podle následující tabulky:

**Tab.3.1** Rozdělení značení vstupů a výstupů proudového zesilovače

<b>x – označení vstupu</b>		<b>y – označení výstupu</b>	
<b>S</b> (single)	jednoduchý	<b>S</b> (single)	jednoduchý
<b>D</b> (differential)	diferenční	<b>D</b> (differential)	diferenční
<b>T</b> (through)	průchozí	<b>M</b> (multiple)	vícenásobný
		<b>C</b> (common)	souhlasný

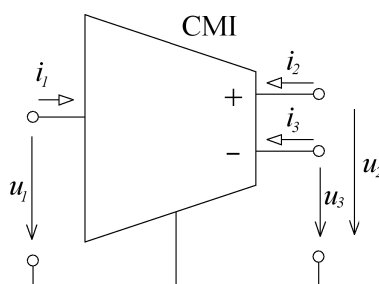
Podle takto uvedeného značení (tab.3.1) lze proudové zesilovače, zobrazené na obrázku 3.1, označit takto:

- SISO – jednoduchý vstup, jednoduchý výstup (obr.3.1a)
- DIMO, konkrétně DICO – diferenční vstup, souhlasný výstup (obr.3.1b,e)
- TIMO, konkrétně TIDO – průchozí vstup, diferenční výstup (obr.3.1c,f)
- DISO – diferenční vstup, jednoduchý výstup (obr.3.1d)

Proudové zesilovače mají výhodu v možnosti elektrického řízení proudového zisku. Této vlastnosti lze využít k elektronickému přeladování nebo řízení dalších přenosových vlastností u aktivních filtrů.

### 3.2 CURRENT MIRROR AND INVERTER (CMI)

Tento proudový aktivní prvek byl zaveden se záměrem rozšíření kmitočtového pásma zpracovávaného signálu a přitom udržet dostatečný odstup signálu od šumu v obvodech analogových kmitočtových filtrů a vychází za studie proudových konvektorů. Prvek CMI [3] je navrhován pro obvody pracující v čistě proudovém módu, což znamená pro obvody, které mají jednak vstupní i výstupní veličinu vyjádřenou proudem, ale také všechny brány aktivního prvku jsou taktéž proudové. Schématická značka prvku CMI je zobrazena na obr.3.2. Branové proudy jsou definovány vztahy  $i_2=i_1$  a  $i_3=-i_1$ .

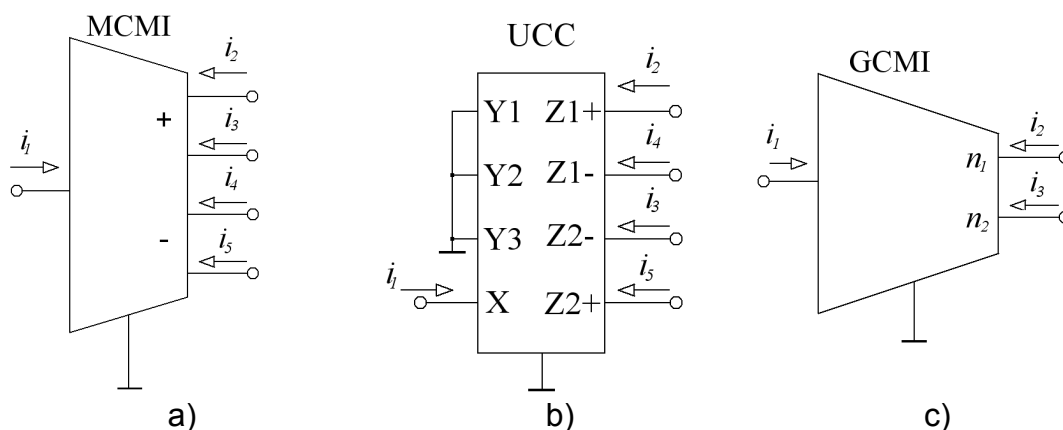


**Obr.3.2:** Schématická značka CMI

Při rozšíření výstupních proudových bran vzniká obecnější prvek MCMi (Multi-output CMI), jehož schématická značka je ukázána na obr.3.3a.

Pro použití aktivních proudových prvků CMI a MCMi lze využít principiální shodnosti s univerzálním proudovým konvejorem UCC. Při použití tohoto UCC je potřeba vstupní napěťové brány uzemnit a využívat pouze proudové brány X a Z (obr.3.3b)

Za účelem co nejvíce zjednodušit navrhování nových obvodů s použitím proudových aktivních prvků byl zaveden zobecněný CMI – GCMI (Generalized Current Mirrors and Inverters). Schématická značka tohoto prvku je zobrazena na obr.3.3c.



**Obr.3.3** a) schématická značka prvku MCMi, b) možná realizace pomocí univerzálního proudového konvejevu, c) schématická značka prvku GCMI (Generalized Current and Inverter)

Tento čistě proudový aktivní prvek lze popsat rovnicemi:

$$i_2 = n_1 i_1 \quad (3.2)$$

$$i_3 = n_2 i_1 \quad (3.3)$$

, kde  $n_1$  a  $n_2$  představují proudové přenosové koeficienty nabývajících hodnot +1 nebo -1. V případě proudového přenosu +1 se jedná o proudové zrcadlení vstupního proudu  $i_1$  na uvažovaný výstup ( $n_1$  nebo  $n_2$ ), naopak, když se proudový přenos bude rovnat -1, tak se jedná o jeho invertování.

Z rovnic 3.2 a 3.3 je vyplývají celkem čtyři možné kombinace orientace výstupních proudů, konkrétní varianty obvodů jsou uvedeny v tab. 3.2.

**Tab. 3.2** Varianty obvodů CMI

Obvod	Hodnota parametru	
	<i>a</i>	<i>b</i>
CMI +/+	+1	+1
CMI +/-	+1	-1
CMI -/+	-1	+1
CMI -/-	-1	-1

Všechny varianty, které vyplývají z definice obvodu GCMI lze realizovat pomocí obvodu UCC s vhodně zapojenými branami jako MCMi.

## 4. METODY NÁVRHU KMITOČTOVÝCH FILTRŮ A OSCILÁTORŮ

Při návrhu kmitočtového filtru si buď můžeme vybrat z již navržených zapojení (řada existujících obvodů s operačními zesilovači), nebo se můžeme pokusit některé tyto zapojení vylepšit, či obměnit.

### 4.1 NÁVRH POMOCÍ AUTONOMNÍHO OBVODU

Metoda návrhu kmitočtového filtru pomocí autonomního obvodu je metodou poměrně mladou, avšak v poslední době hojně využívanou.

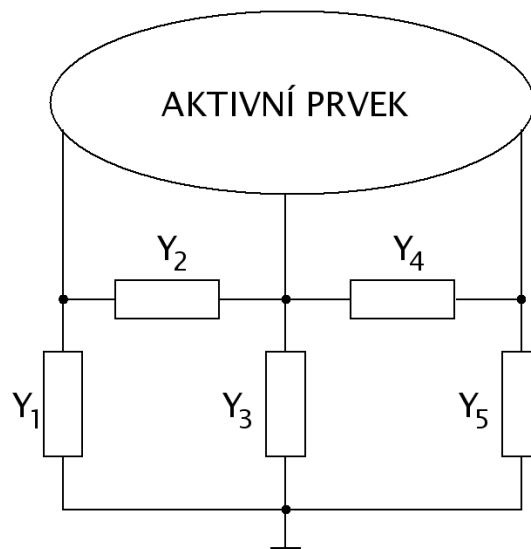
Autonomní obvod je obvod, který nemá vyznačenou žádnou vstupní, či výstupní svorku a ani nemá budící zdroje. Tento obvod má pak tzv. charakteristickou rovnici (CE), která plně daný autonomní obvod charakterizuje.

Charakteristická rovnice CE má tvar součtu součinnů admitancí  $Y_X$ , což je determinant admitanční matice obvodu. Z této rovnice lze vyčíst možné funkce daného obvodu. Při návrhu je výhodné se snažit, aby pasivní prvky byli jedním koncem uzemněny, protože se tyto prvky pak snadněji realizují v integrovaných obvodech.

Obvody musí splňovat podmínku stability

Při návrhu oscilátoru jednotlivé koeficienty konkretizujeme na požadovaný tvar charakteristické rovnice, která má obsahovat mocniny operátoru  $p^2$  a  $p^0$  tedy 1 pro zajištění harmonických kmitů

V druhém kroku vypočteme charakteristickou [17] rovnici autonomního obvodu. Tato charakteristická rovnice pak obsahuje všechny mocniny operátoru  $p$  a všechny členy rovnice musí být stejné tedy kladné z důvodů stability



**Obr.4.1** Obecné zapojení aktivního prvku do admitanční sítě

Postup při návrhu kmitočtového filtru pomocí autonomního obvodu (Obr.4.1) lze popsat následujícími kroky [5]:

1. Navrhnutí autonomního obvodu, který bude obsahovat pouze obecné aktivní a obecné pasivní (admittance) prvky. V obvodu se nenachází žádné budící zdroje, není zde ani definováno místo jejich připojení, tedy žádné vstupní ani výstupní svorky.
2. Výpočet charakteristické rovnice daného obvodu. Jistou výhodou je využití nějakého počítačového programu (např. SNAP [6]).
3. Zjednodušení charakteristické rovnice vhodnou volbou přenosových koeficientů a následná úprava CE tak, aby splňovala podmínku stability obvodu ( všechny její členy musí být kladné).
4. Konkretizace pasivních prvků, což znamená, že obecné admittance se nahradí rezistory či kapacitory. Při návrhu kmitočtového filtru musí charakteristické rovnice obsahovat všechny mocniny operátoru  $p$  ( $p^2$ ,  $p^1$  a  $p^0$  tedy 1). Při návrhu oscilátoru se v charakteristické rovnici musí vyskytovat mocniny operátoru  $p^2$  a  $p^0$  tedy 1 pro zajištění harmonických kmitů.
5. Volba vstupních a výstupních svorek. Proudové vstupy lze připojit pouze do uzlu obvodu a proudová odezva se dá sledovat jen ve smyčkách obvodu. Je možné, aby se v jednom obvodu nacházelo více výstupních svorek a realizovat tak multifunkční filtr
6. Určení přenosové funkce filtru. Zde je opět výhodné využití počítačového programu (např. SNAP).

## 4.2 METODA NÁVRHU S VYUŽITÍM SYNTETICKÝCH PRVKŮ

U této metody se využívá dvou transformačních článků, imitačního investoru a imitačního konvertoru. Jsou to lineární dvojbrany, které jsou popsány kaskádními maticemi (4.1)(4.2). Při postupu návrhu se využívá autonomního obvodu.

Syntetické prvky lze také konstruovat pomocí transformačních článků, ale také pomocí bloků, kterých se na vstupní bráně vyskytuje patřičná imitační funkce.

$$\begin{bmatrix} U_{IN} \\ I_{IN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} \\ a_{21} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{OUT} \\ -I_{OUT} \end{bmatrix} \quad Z_{vst} = \frac{a_{12}}{a_{21}} \cdot \frac{1}{Z_{výst}} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} U_{IN} \\ I_{IN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{OUT} \\ -I_{OUT} \end{bmatrix} \quad Z_{vst} = \frac{a_{11}}{a_{22}} \cdot Z_{výst} \quad (4.2)$$

Postup realizace těchto bloků je shodný s realizací transformačních článků. Vstupní impedance je dána vztahem:

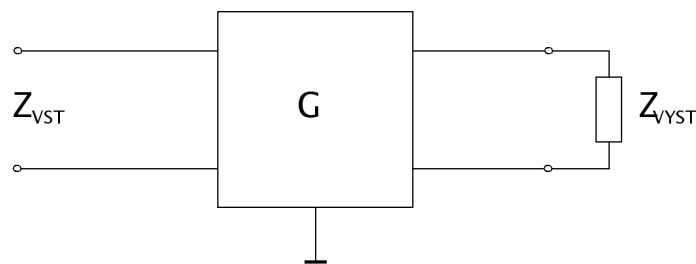
$$Z_{vst} = \frac{A}{D}, \quad (4.3)$$

kde D je charakteristická rovnice, A značí algebraický doplněk.

### 4.2.1 Imitanční invertor – gyrátor

Imitanční investor je zobrazen na obr.4.2. Jeho vstupní impedance  $Z_{VST}$  je úměrná převrácené hodnotě impedance  $Z_{VYST}$  na výstupní bání.

$$Z_{VST} = k_g \frac{1}{Z_{VYST}} \quad (4.4)$$



**Obr.4.2** Znáznornění principu imitačního investoru – gyrátoru

Zda gyrátor pracuje jako pozitivní nebo negativní transformační článek rozhoduje znaménko u konstanty úměrnosti, tzv. gyrační konstanty  $k_G$ :

$$k_G = \frac{a_{12}}{a_{21}} \quad (4.5)$$

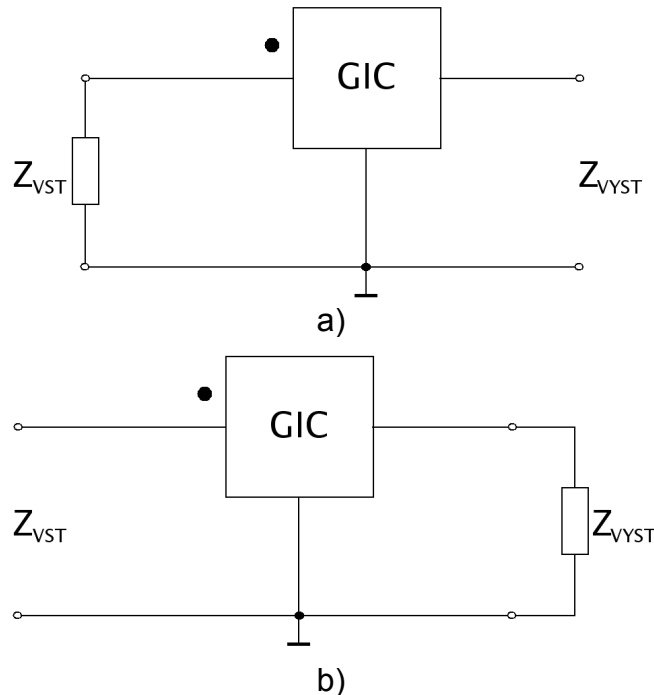
Tento článek se používá pro simulaci syntetických induktorů. Jeho přednosti jsou především v tom, že na rozdíl od impedančního konvertoru nezáleží na orientaci připojené zátěže k bráně. Další výhodou je realizace induktoru s hodnotou indukčnosti až několika stovek Henry. S tímto článkem

lze také simulovat plovoucí a uzemněný syntetický induktory. Prvek s imitační funkcí vyššího řádu lze získat kaskádním zapojením jednotlivých gyrátorů.

#### 4.2.2 Imitanční konvertor – GIC (General Impedance Converter)

Imitanční konvertor GIC přímo realizuje Bretonovu transformaci. Vstupní impedance  $Z_{VST}$  je přímo úměrná výstupní impedanci  $Z_{VYST}$ , připojené k výstupní bráně. Vstupní impedance je označena tečkou (obr.4.3). Znaménko u koeficientu „k“ rozlišuje pozitivní a negativní konvertor.

Negativní imitanční konvertor ( $a_{11}$  a  $a_{22}$  mají rozdílná znaménka) se chová jako nereciprokový dvojbran, a proto se označuje tečkou vstupní brána.



**Obr.4.3** Impedanční konvertor: a) impedance na vstupu, b) impedance na výstupu

U konvertoru s připojenou impedancí na vstupu (obr.4.3a) je tato impedance na výstupu dělená operátorem „p“.

$$Z_{VYST} = \frac{k}{p} Z_{VST} \quad (4.6)$$

Naopak při zapojení impedance na výstup konvertoru, je tato impedance na vstupu operátorem „p“ násobena.

$$Z_{VST} = \frac{p}{k} Z_{VYST} \quad (4.7)$$

Při návrhu těchto článků se využívá metoda návrhu autonomních obvodů.

### 4.2.3 Využití syntetických prvků s imitací vyšších řádů

U této metody se k návrhu využívá běžných aktivních prvků (tab.4.1). Při samotné realizaci návrhu se tedy využívá admitančních a impedančních vlastností [7] syntetických prvků které jsou vytvořeny pomocí transformačních článků.

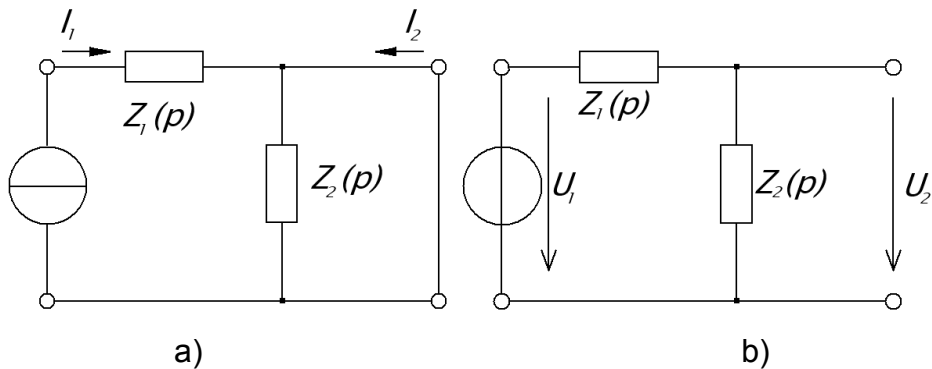
Vytvoření syntetických prvků s imitační funkcí vyšších řádů se dosahuje kaskádním zapojením (do série, či paralelně) transformačních článků.

**Tab.4.1** Elementární dvojpóly a jejich imitační vlastnosti

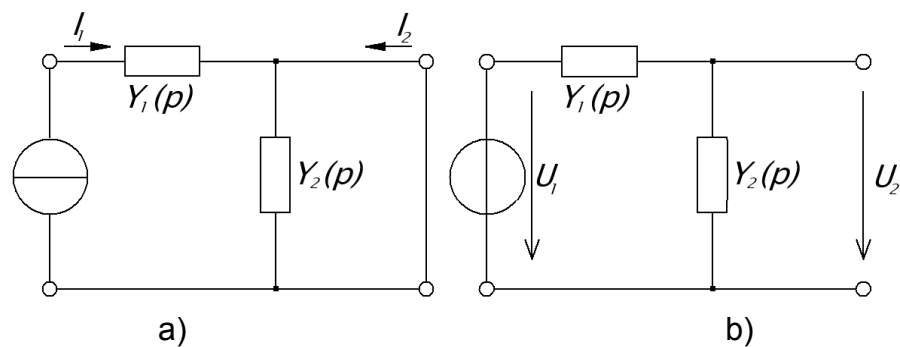
Typ	Řád	Imitance
E	0	$Z(j\omega) = R$
D	0	$Y(j\omega) = G$
E	1	$Z(j\omega) = j\omega L$
D	1	$Y(j\omega) = j\omega C$
E	2	$Z(j\omega) = -\omega^2 E$
D	2	$Y(j\omega) = -\omega^2 D$
E	N	$Z(j\omega) = (j\omega)^N E$
D	N	$Y(j\omega) = (j\omega)^N D$

### 4.2.4 Metoda frekvenčně závislých děličů

Metoda návrhu pomocí frekvenčně závislých děličů využívá impedančního nebo admitančního děliče, resp. jejich přenosy (4.8 až 4.11), které volíme podle toho, zda má filtr pracovat v proudovém nebo napěťovém režimu.



**Obr.4.4** Impedanční dělič v a) proudovém b) napěťovém režimu



**Obr.4.5** Admitanční dělič v a) proudovém b) napěťovém režimu

Proudový a napěťový přenos pro impedanční dělič:

$$Ki(p) = \frac{I_2}{I_1} = \frac{Z_1(p)}{Z_1(p) + Z_2(p)} \quad (4.8)$$

$$Ku(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_2(p)}{Z_1(p) + Z_2(p)} \quad (4.9)$$

Proudový a napěťový přenos pro admitanční dělič:

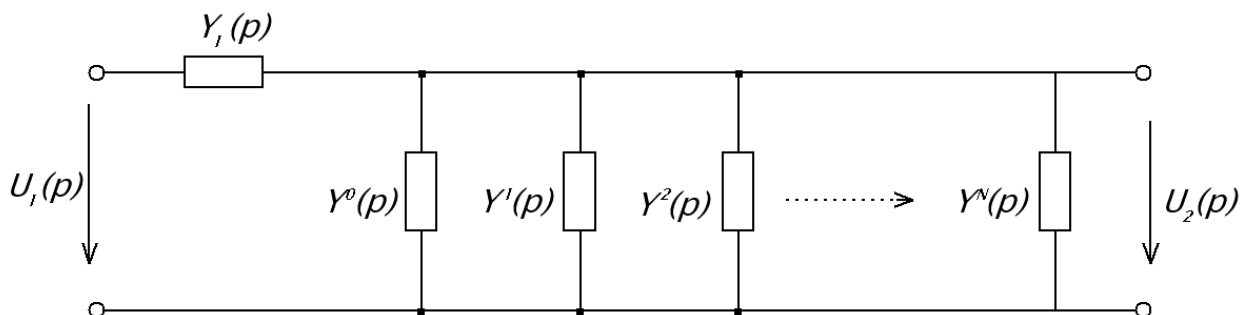
$$Ki(p) = \frac{I_2}{I_1} = \frac{Y_2(p)}{Y_1(p) + Y_2(p)} \quad (4.10)$$

$$Ku(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Y_2(p)}{Y_1(p) + Y_2(p)} \quad (4.11)$$

Při návrhu filtru N-tého řádu se volí dvojpól s imitační funkcí N-tého řádu.

#### 4.2.4.1 Admitanční mód

Admitanční mód, jak už název napovídá, vychází z admitančního děliče. K vytvoření admitance vyšších řádů se využívá kombinací jednotlivých admitancí (obr. 4.6).



**Obr. 4.6** Dělič s admitancemi vyšších řádů v napěťovém módů

Admitance  $Y_2(p)$  určuje admitanční funkci N-tého řádu, proto se označuje  $Y_2^N(p)$ . Admitance vyšších řádů lze vytvořit paralelní kombinací jednotlivých impedancí, za předpokladu, že bude platit:

$$Y_2^N(p) = Y^0(p) + Y^1(p) + Y^2(p) + \dots + Y^{N-1}(p) + Y^N(p) \quad (4.12)$$

Takhle můžeme vytvořit admitanční funkci N-tého řádu bez nultého prvního řádu a pokud  $Y_1(p)$  se zvolí vhodně, lze podle této metody vytvořit filtr. Přenosová funkce pro dolní propust pak vypadá:

$$Ku(p) = \frac{Y_1(p)}{Y_2(p) + Y_1(p)} = \frac{1}{1 + p \frac{b_1}{G_0} + p^2 \frac{b_2}{G_0} + p^3 \frac{b_3}{G_0} + \dots + p^N \frac{b_N}{G_0}} \quad (4.13)$$

Pokud dosadíme za jednotlivé admitance

$$Y_1(p) = G_0 \quad Y_2^N(p) = pb + p^2 b_2 + p^3 b_3 + \dots + p^N b_N \quad (4.14)$$

nebo

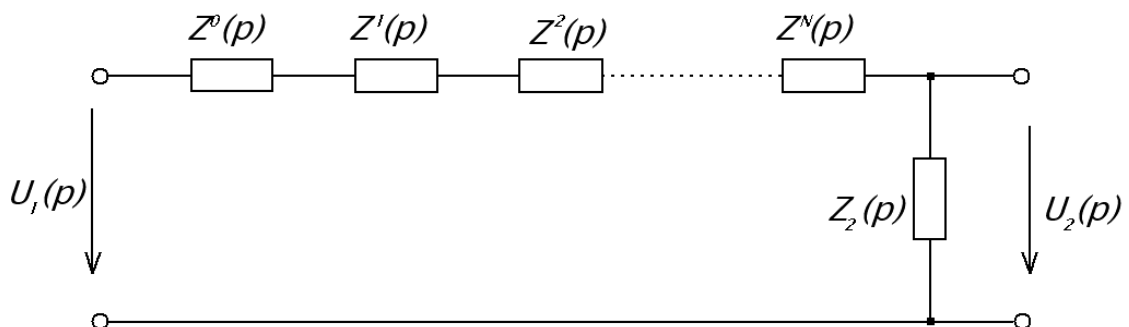
$$Y_1(p) = pC_0 \quad Y_2^N(p) = p^2 b_2 + p^3 b_3 + \dots + p^{N+1} b_{N+1} \quad (4.15)$$

Touto funkcí lze pak realizovat pomocí zapojením jednotlivých přenosových článků, kde transformační článek realizuje imitační funkci konkrétního řádu a bude součástí admitančního děliče, nebo využitím bloků simulující admitanční funkci vyšších řádů. Tato metoda se dá použít pro vytvoření filtru druhého a vyššího řádu pro dolní propust nebo pro horní propust.

#### 4.2.4.2 Impedanční mód

U této metody se vychází z kombinací spojování jednotlivých impedancí (obr.4.7), čímž docílíme vytvoření imitací vyšších řádů. Tato funkce je realizovatelná pomocí impedance  $Z_1(p)$ , která je řešená sériovým řazením jednotlivých dvojpolů, které znázorňuje rovnice:

$$Z_1^N(p) = Z^0(p) + Z^1(p) + Z^2(p) + \dots + Z^{N-1}(p) + Z^N(p) \quad (4.16)$$



**Obr.4.7** Dělič tvořený impedancemi vyšších řádů v napěťovém módu

Impedance  $Z_1(p)$  představuje impedanci N-tého řádu a je označena  $Z_1^N(p)$ . Opět lze zde vytvořit imitační funkci N-tého řádu bez nultého a prvního a pokud se zvolí takové  $Z_2(p)$ , aby odpovídalo požadované funkci, lze s ním vytvořit požadovaný filtr.

Pro dolní propust pak přenosová funkce vypadá takhle:

$$Ku(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_2(p)}{Z_1(p) + Z_2(p)} = \frac{R_0}{R_0 + pb + p^2b_2 + p^3b_3 + \dots p^N b_N} \quad (4.17)$$

Pokud dosadíme za jednotlivé impedance

$$Z_2(p) = R_0 \quad Z_1^N(p) = pb + p^2b_2 + p^3b_3 + \dots p^N b_N \quad (4.18)$$

nebo

$$Z_2(p) = \frac{1}{pC_0} \quad Z_1^N(p) = pb_1 + p^2b_2 + p^3b_3 + \dots p^{N-1}b_{N-1} \quad (4.19)$$

### 4.3 METODA VYUŽÍVAJÍCÍ INTEGRÁTOROVÉ BLOKY

U této metody je základním stavebním prvkem integrátor s přenosem  $1/p$ , kde kaskádním řazením těchto prvků se zvolenými zpětnými vazbami dosáhneme příslušnou přenosovou funkci.

Podle propojení zpětných vazeb lze rozlišit dva druhy návrhu:

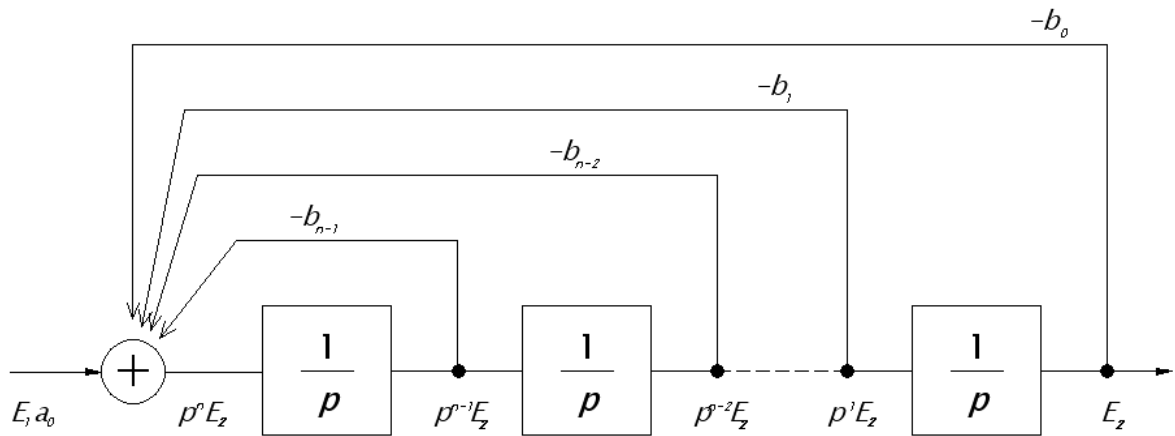
- a) metodu stavové proměnné,
- b) metoda LEAP-PROG.

#### 4.3.1 Metoda stavové proměnné

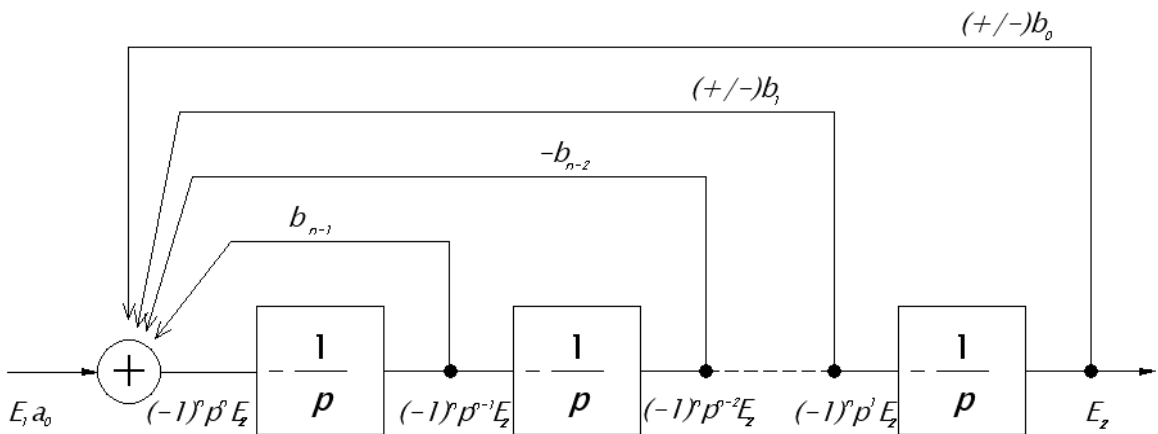
V této metodě se využívá kaskádního zapojení neinvertujících (Obr.4.8), ale i invertujících (pro proudové konvejory)integrátorů (Obr.4.9) Z každého výstupu integrátoru je zavedena zpětná vazba, která je váhována koeficientem  $b(n)$  (u kaskády neinvertujících integrátorů je záporná). Tyto zpětné vazby jsou přivedeny na sčítačku, která je na vstupu kaskády, kde se tyto zpětné vazby sečtou se vstupní veličinou (4.20). Touto strukturou dosáhneme kanonického tvaru přenosové funkce(4.21).

$$p^n E_2 = a_0 E_1 - p^{n-1} E_2 b_{(n-1)} - p^{n-2} E_2 b_{(n-2)} \dots - p^1 E_2 b_{(3)} - E_2 b_{(0)} \quad (4.20)$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{a_0}{p^n + p^{n-1} b_{n-1} + p^{n-2} b_{n-2} \dots p^1 b_1 + b_0} \quad (4.21)$$



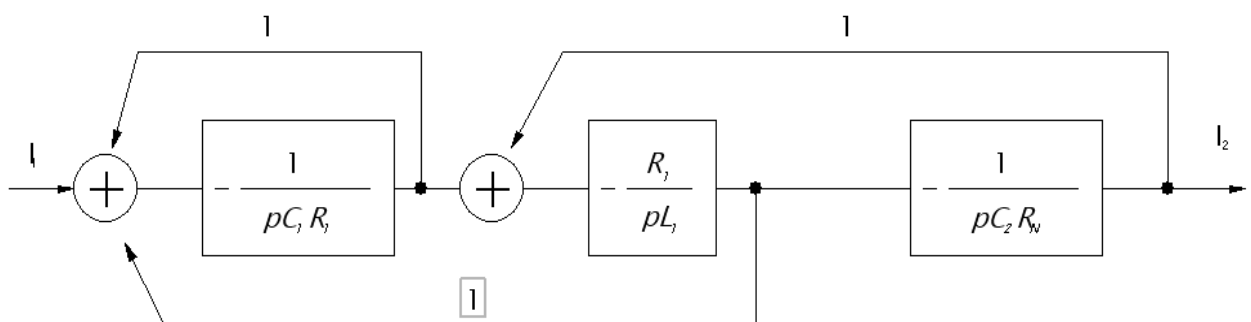
**Obr.4.8** Kaskádní zapojení neinvertujících integrátorů se zpětnými vazbami



**Obr.4.9** Kaskádní zapojení neinvertujících integrátorů se zpětnými vazbami

### 4.3.2 Metoda LEAP-PROG

U metody LEAP-PROG se také využívá vlastnosti integrátorových článků zapojených kaskádně se zavedenými zpětnými vazbami. Rozdíl od výše uváděných zapojení je v provedení zpětných vazeb. U této metody je zpětná vazba z výstupu jednoho bloku vedena zpět na vstup bloku předchozího (obr.4.10).



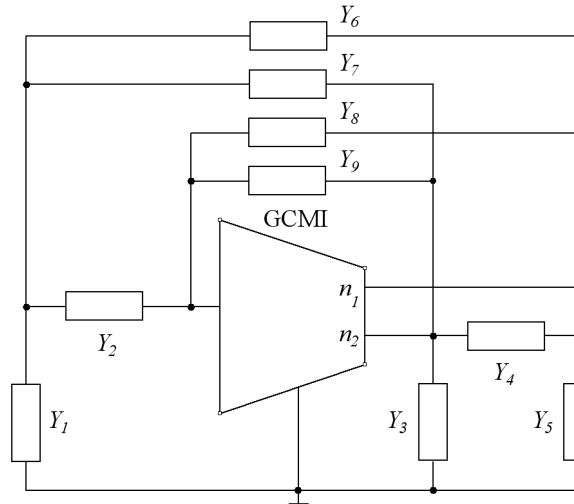
**Obr.4.10** Znárodnění zapojení zpětných vazeb u metody LEAP-PROG

Při návrhu filtru touto metodou se využívají RLC příčkové články jako předloha. Postup u této metody lze rozložit do následujících kroků:

1. určení vektoru proudu a napětí,
2. vytvoření grafu signálových toků,
3. úpravy grafu pro realizovatelnost integrátory
4. realizace grafu pomocí bloků s integrátory.

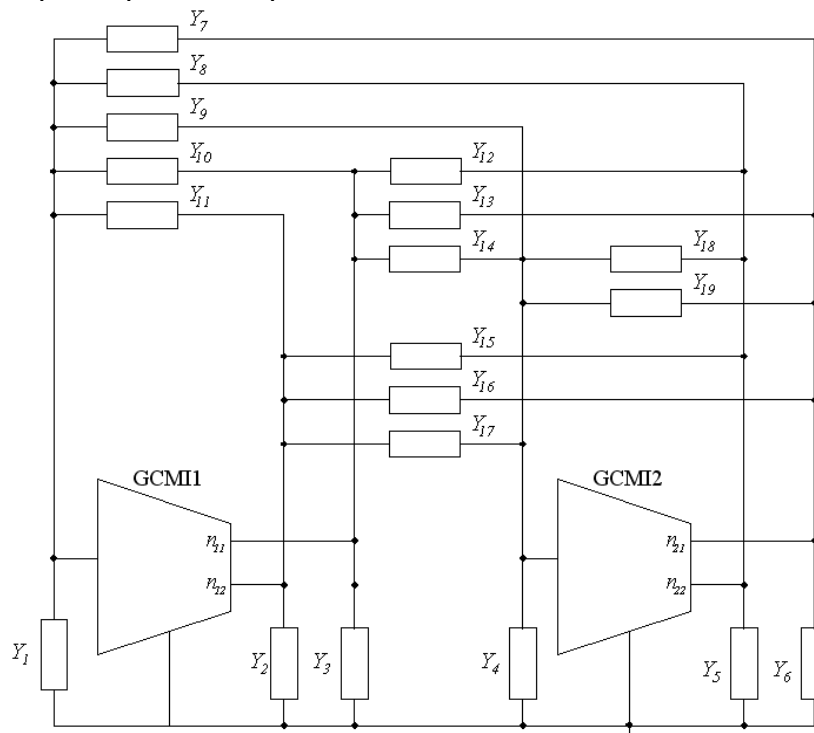
## 5. NÁVRH KMITOČTOVÝCH FILTRŮ S AKTIVNÍM PRVKEM CMI

Při hledání autonomních obvodů pro návrh kmitočtového filtru s aktivním prvkem CMI vycházíme z plné admitanční sítě. Taková admitanční síť s jedním aktivním prvkem je zobrazena na obr 5.1.



**Obr. 5.1** Úplná admitanční síť s jedním aktivním prvkem GCMC

Zapojení kmitočtových filtrů obsahující pouze jeden aktivní prvek CMI umožňuje realizovat obvykle jednu či dvě filtrační funkce. Z tohoto důvodu je zajímavější zapojení se dvěma aktivními prvky CMI (Obr. 5.2), které je už schopné realizovat tři a více filtračních funkcí (multifunkční filtry) za použití minimálního počtu pasivních prvků.



**Obr. 5.2** Úplná admitanční síť se dvěma aktivními prvky GCMC

## 5.2 UKÁZKY NÁVRHU KMITOČTOVÉHO FILTRU

### 5.2.1 Kmitočtové filtry s jedním aktivním prvkem CMI

Při navrhování kmitočtových filtrů s jedním aktivním prvkem CMI se vychází z autonomních obvodů odvozených z úplné admitanční sítě, která je zobrazena na Obr.5.1. Tyto autonomní obvody spolu s jejich charakteristickou rovnicí jsou uvedeny v Tab. 5.1.

**Tab.5.1** Autonomní obvody a jejich charakteristické rovnice s jedním CMI

číslo	autonomní obvod	charakteristická rovnice
1		$D = Y_1 Y_3 + Y_1 Y_4 + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4 + Y_3 Y_4 + b Y_2 Y_3 = 0$
2		$D = -a(Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4) + b(Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3) + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4 + Y_1 Y_4 = 0$
3		$D = a(Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4) + b Y_2 Y_3 + Y_1 Y_3 + Y_1 Y_4 + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4 + Y_3 Y_4 = 0$

4		$D = Y_1 Y_4 + a Y_1 Y_4 + Y_1 Y_3 + a Y_1 Y_3 + b Y_1 Y_3 + Y_1 Y_2 + a Y_1 Y_2 + b Y_1 Y_2 + Y_4 Y_3 + Y_4 Y_2 = 0$
5		$D = -a(Y_2 Y_4 - Y_2 Y_5) + Y_1 Y_3 + Y_1 Y_4 + Y_1 Y_5 + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4 + Y_2 Y_5 + Y_3 Y_4 + Y_3 Y_5 = 0$
6		$D = -a Y_2 Y_4 + Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_1 Y_4 + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4 = 0$

V tab.5.1 byly obvody č.1 až č.3 odvozeny v literatuře [8], další obvody byly odvozeny a ověřeny pomocí programu SNAP [6].

Pro názornou ukázkou návrhu kmitočtového filtru s jedním aktivním prvkem byl zvolen autonomní obvod č.1 z tab.5.1. Charakteristická rovnice (CE) tohoto obvodu, určená pomocí programu SNAP v3.02, je

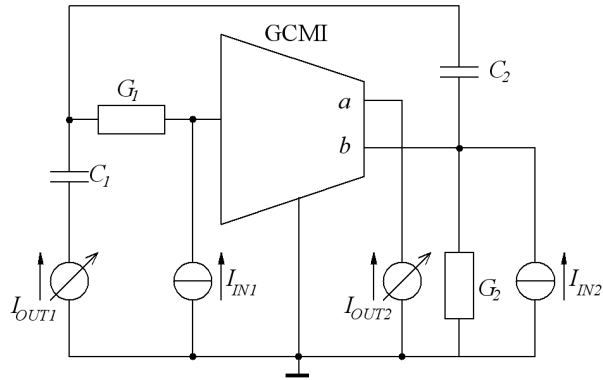
$$D = Y_1 Y_3 + Y_1 Y_4 + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4 + Y_3 Y_4 + b Y_2 Y_3 = 0 \quad (5.1)$$

Dosazením za koeficient  $b=-1$  získáme z rovnice (5.1) následující

$$D = Y_1 Y_3 + Y_1 Y_4 + Y_2 Y_4 + Y_3 Y_4 = 0 \quad (5.2)$$

Dosazením za obecné pasivní prvky  $Y_1=pC_1$ ,  $Y_2=G_1$ ,  $Y_3=pC_2$  a  $Y_4=G_2$  vznikne z rovnice (5.2)

$$D = p^2 C_1 C_2 + p(C_1 G_2 + C_2 G_2) + G_1 G_2 = 0 \quad (5.3)$$



**Obr. 5.3** Navržený multifunkční kmitočtový filtr v proudovém módu

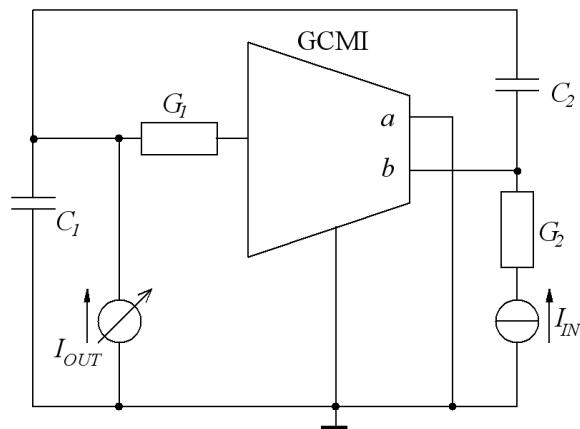
Kmitočtový filtr, zobrazený na obr 5.3, pracuje v čistě proudovém módu a při daném umístění vstupních a výstupních svorek má tento filtr přenosové funkce:

$$K_{OUT1} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN1}} = \frac{-p^2 C_1 C_2}{p^2 C_1 C_2 + p(C_1 G_2 + C_2 G_2) + G_1 G_2} \quad (5.4)$$

$$K_{OUT2} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN2}} = \frac{-p^2 C_1 C_2}{p^2 C_1 C_2 + p(C_1 G_2 + C_2 G_2) + G_1 G_2} \quad (5.5)$$

$$K_{OUT3} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN2}} = \frac{p C_2 G_1}{p^2 C_1 C_2 + p(C_1 G_2 + C_2 G_2) + G_1 G_2} \quad (5.6)$$

Z předchozích přenosových funkcí vyplývá, že filtr na obr. 5.3 lze využít jako tzv. multifunkční filtr. Multifunkční filtr je takový filtr, který je schopen realizovat více filtračních funkcí v rámci jednoho obvodu pouze změnou zapojení vstupních a výstupních terminálů. Daný obvod je tedy schopen realizovat invertující horní propust HP (5.4 a 5.5), případně pásmovou propust PP (5.6).



**Obr. 5.4** Navržený multifunkční kmitočtový filtr v napěťovém módu

Při daném zapojení bude mít kmitočtový filtr (obr.5.4) pracující v napěťovém režimu přenosovou funkci

$$K_{OUT} = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{pC_2G_2}{p^2C_1C_2 + p(C_1G_2 + C_2G_1) + G_1G_2} \quad (5.7)$$

Kmitočtový filtr bude tedy pracovat jako pásmová propust PP (5.7).

### 5.2.2 Kmitočtové filtry se dvěma aktivními prvky CMI

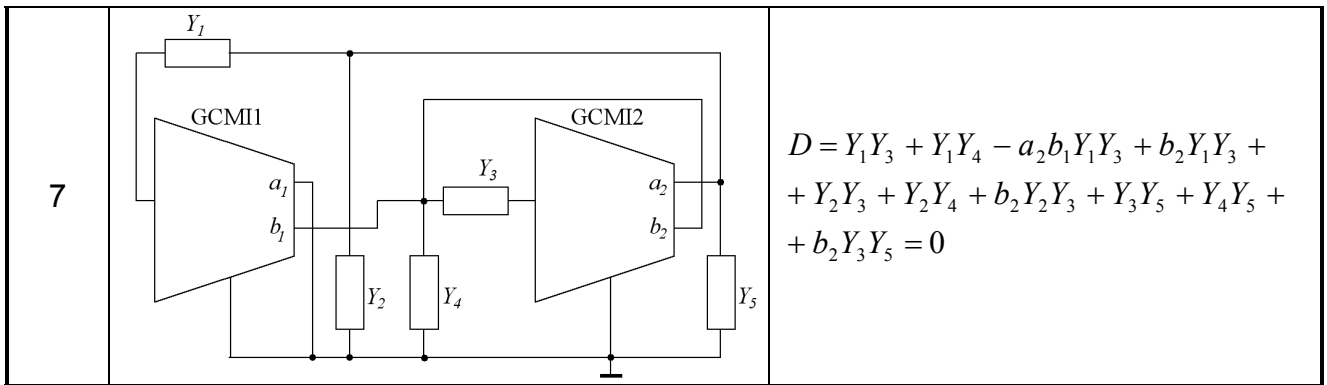
Kmitočtové filtry se dvěma aktivními prvky CMI poskytují jistou výhodu, protože poskytují mnohem více možností: Lze jimi realizovat filtry, které umožňují realizovat i více filtračních funkcí (multifunkční filtry [8]).

Při hledání autonomních obvodů se opět vychází z úplné admitanční sítě se dvěma aktivními prvky CMI (Obr. 5.2). Odvozené autonomní obvody [2], [8] spolu s jejich charakteristickou rovnicí jsou uvedeny v Tab. 5.2.

**Tab.5.2** Autonomní obvody a jejich charakteristické rovnice se dvěma CMI

číslo	autonomní obvod	charakteristická rovnice
1		$D = Y_2Y_3 + a_1Y_2Y_3 + Y_1Y_3 - a_1a_2Y_1Y_3 + Y_1Y_2 + a_2Y_1Y_2 + Y_2Y_4 + Y_1Y_4 = 0$
2		$D = Y_1Y_3 + Y_1Y_4 + Y_2Y_3 + Y_2Y_4 + Y_3Y_4 + b_1Y_1Y_3 + b_1Y_1Y_4 - a_1a_2Y_1Y_3 - a_1a_2Y_1Y_4 - a_1a_2Y_2Y_3 - a_1a_2Y_2Y_4 - a_1a_2Y_3Y_4 - a_1b_2Y_1Y_3 = 0$

3		$D = Y_2 Y_3 + Y_1 Y_3 + a_1 Y_1 Y_3 + a_2 Y_2 Y_3 + a_2 Y_1 Y_3 + a_1 a_2 Y_1 Y_3 + b_2 Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4 + Y_1 Y_4 + a_1 Y_1 Y_4 + b_2 Y_2 Y_4 = 0$
4		$D = Y_1 Y_4 + a_1 Y_1 Y_4 - a_2 b_1 Y_4 Y_1 + Y_2 Y_4 + a_1 Y_1 Y_3 + Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3 = 0$
5		$D = Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3 + a_2 Y_1 Y_3 + a_2 Y_2 Y_3 - a_1 b_2 Y_2 Y_3 + Y_1 Y_4 + Y_2 Y_4 - a_1 b_2 Y_2 Y_4 = 0$
6		$D = Y_3 Y_4 + a_1 Y_3 Y_4 - b_1 b_2 Y_3 Y_4 + Y_3 Y_5 + a_1 Y_3 Y_5 - b_1 a_2 Y_3 Y_5 - b_1 b_2 Y_3 Y_5 + Y_1 Y_4 + a_1 Y_1 Y_4 + Y_1 Y_5 + a_1 Y_1 Y_5 + Y_2 Y_4 + a_1 Y_2 Y_4 + b_1 Y_2 Y_4 + Y_2 Y_5 + a_1 Y_2 Y_5 + b_1 Y_2 Y_5 = 0$



$$D = Y_1 Y_3 + Y_1 Y_4 - a_2 b_1 Y_1 Y_3 + b_2 Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4 + b_2 Y_2 Y_3 + Y_3 Y_5 + Y_4 Y_5 + b_2 Y_3 Y_5 = 0$$

Opět uvedeme ukázkou návrhu kmitočtu se dvěma aktivním prvky CMI na jednom autonomním obvodu vybraném z tab. 5.2, např. na obvodu č.7. Charakteristická rovnice tohoto obvodu je

$$D = Y_1 Y_3 + Y_1 Y_4 - a_2 b_1 Y_1 Y_3 + b_2 Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4 + b_2 Y_2 Y_3 + Y_3 Y_5 + Y_4 Y_5 + b_2 Y_3 Y_5 \quad (5.8)$$

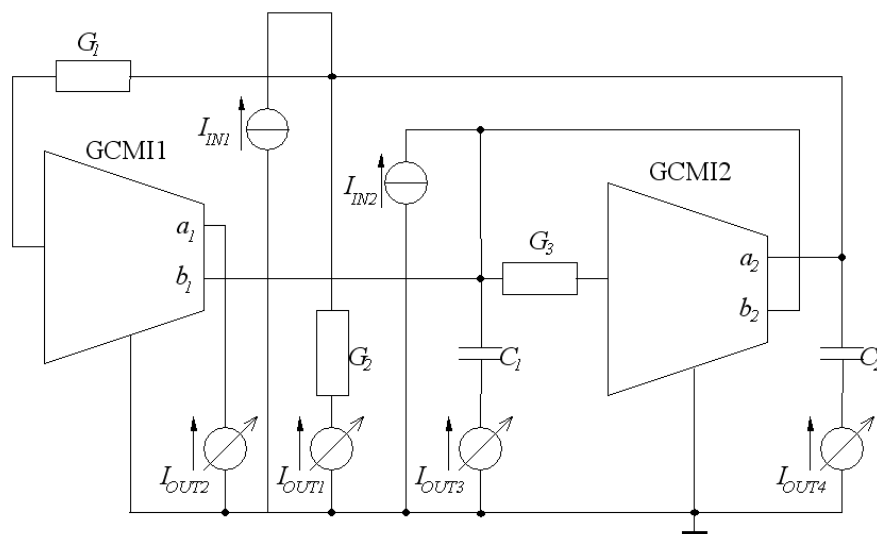
Vhodnou volbou koeficientů se opět provede zjednodušení rovnice (opět platí dodržení podmínky stability). Za předpokladu, že  $b_2 = -1$ ,  $a_2 b_1 = -1$  rovnice (5.10) bude mít následující tvar

$$D = Y_1 Y_4 + Y_1 Y_3 + Y_2 Y_4 + Y_5 Y_4 \quad (5.9)$$

Následuje vhodná volba pasivních prvků. Po dosazení za  $Y_1 = G_1$ ,  $Y_2 = G_2$ ,  $Y_3 = G_3$ ,  $Y_4 = pC_1$  a  $Y_5 = pC_2$  vznikne rovnice

$$D = p^2 C_1 C_2 + p(C_1 G_1 + C_1 G_2) + G_1 G_3 \quad (5.10)$$

Navržený kmitočtový filtr, pracující v čistě proudovém módu je zobrazen na obr.5.5



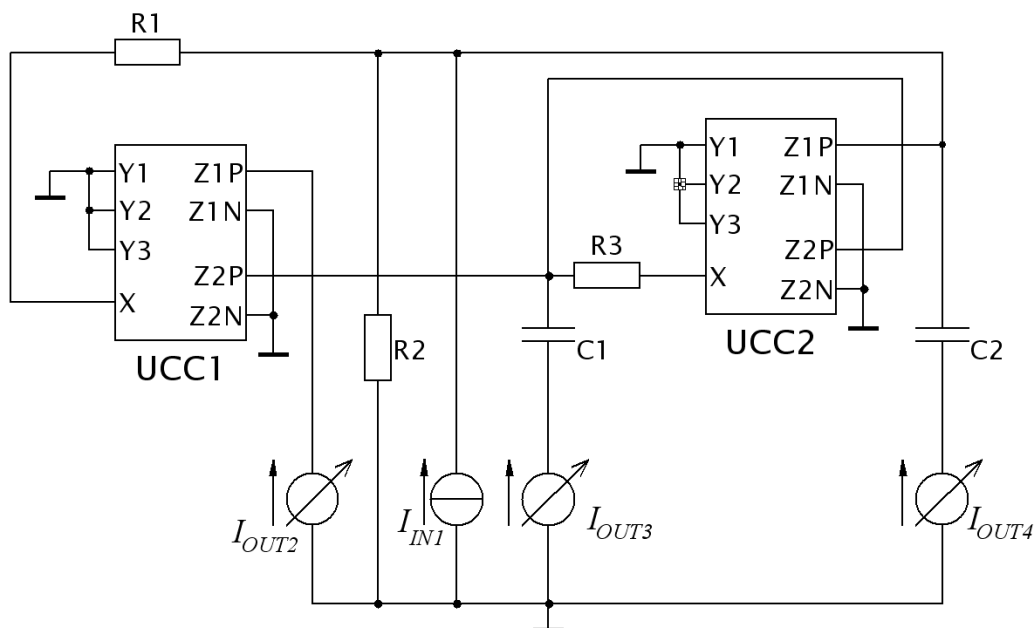
**Obr.5.5** Navržený kmitočtový filtr v proudovém módu

Na obr.5.5 je zároveň uvedeno možné proudové vstupní a výstupní terminály. Přenosové funkce takto navrženého filtru jsou shrnuty do tab.5.3

**Tab. 5.3** Přenosové funkce filtru v proudovém módu

číslo	přenosová funkce	typ filtru
1	$K_{OUT1} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN1}} = \frac{-p(C_1G_2)}{D}$	invertující pásmová propust PP
2	$K_{OUT2} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN1}} = \frac{pC_1G_1}{D}$	pásmová propust PP
3	$K_{OUT3} = \frac{I_{OUT3}}{I_{IN1}} = \frac{-p(C_1G_1)}{D}$	invertující pásmová propust PP
4	$K_{OUT4} = \frac{I_{OUT4}}{I_{IN2}} = \frac{pC_2G_3}{D}$	pásmová propust PP
5	$K_{OUT5} = \frac{I_{OUT4}}{I_{IN1}} = \frac{-p^2(C_1C_2)}{D}$	invertující horní propust HP
6	$K_{OUT6} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN2}} = \frac{G_1G_2}{D}$	dolní propust DP
7	$K_{OUT7} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN2}} = \frac{-G_1G_3}{D}$	invertující dolní propust DP

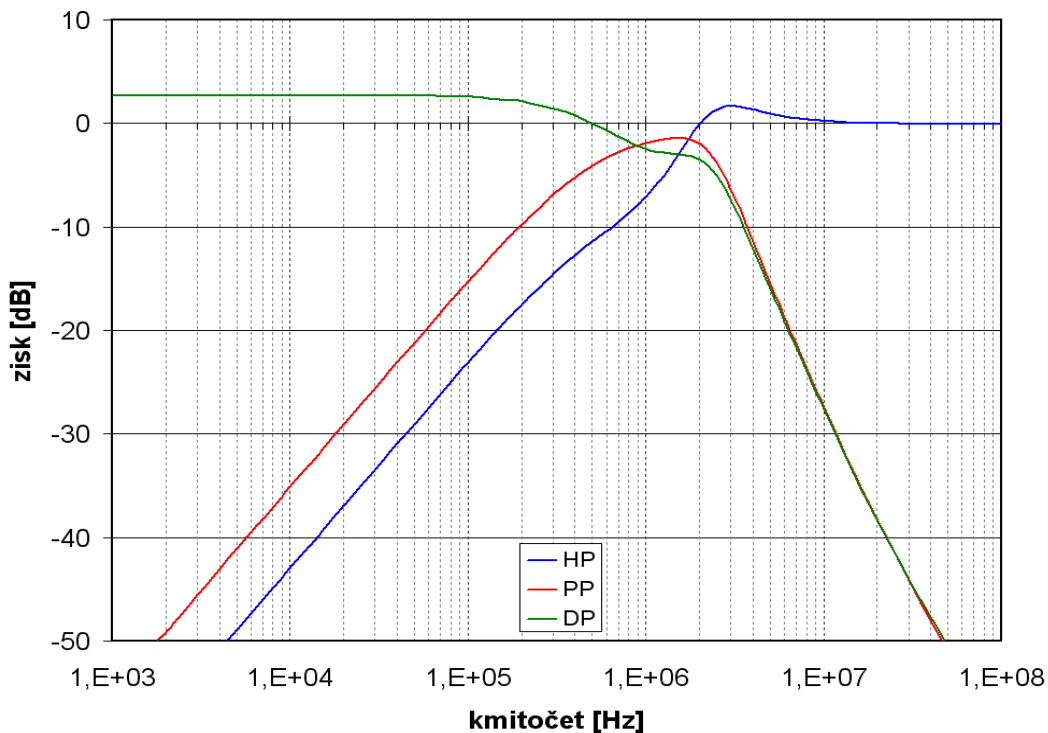
Z tab. 5.3 je zřejmá jistá výhoda kmitočtových filtrů se dvěma aktivními prvky. Jeden obvod obsahující dva aktivní CMI a pět pasivních prvků je schopen realizovat více filtračních funkcí jen změnou vstupních a výstupních svorek, než obvody jedním aktivním prvkem.



**Obr.5.6** Zapojení filtru v proudovém módu

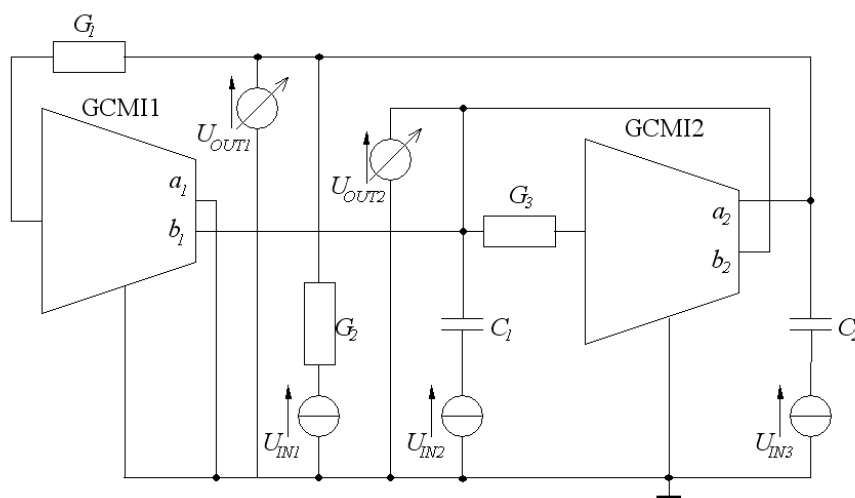
Zapojení obvodu v programu OrCAD, ve kterém bylo zapojení ověřeno simulací je na obr. 5.6. V zapojení byly zvoleny následující hodnoty součástek  $R_1=R_3=39\Omega$ ,  $R_2=220\Omega$ ,  $C_1=10\text{nF}$ ,  $C_2=2\text{nF}$ ,  $f_0=1\text{MHz}$ .

Na obr.5.7 jsou zobrazeny simulované charakteristiky při daném zapojení obvodu kmitočtového filtru, aktivní prvky GCM1 byly realizovány pomocí obvodů UCC-N1B. (obr.5.6.).



**Obr.5.7** Simulované charakteristiky kmitočtového filtru v proudovém módu

Obvod může pracovat i v napěťovém módu. Zapojení tohoto filtru do napěťového režimu je na obr.5.8.



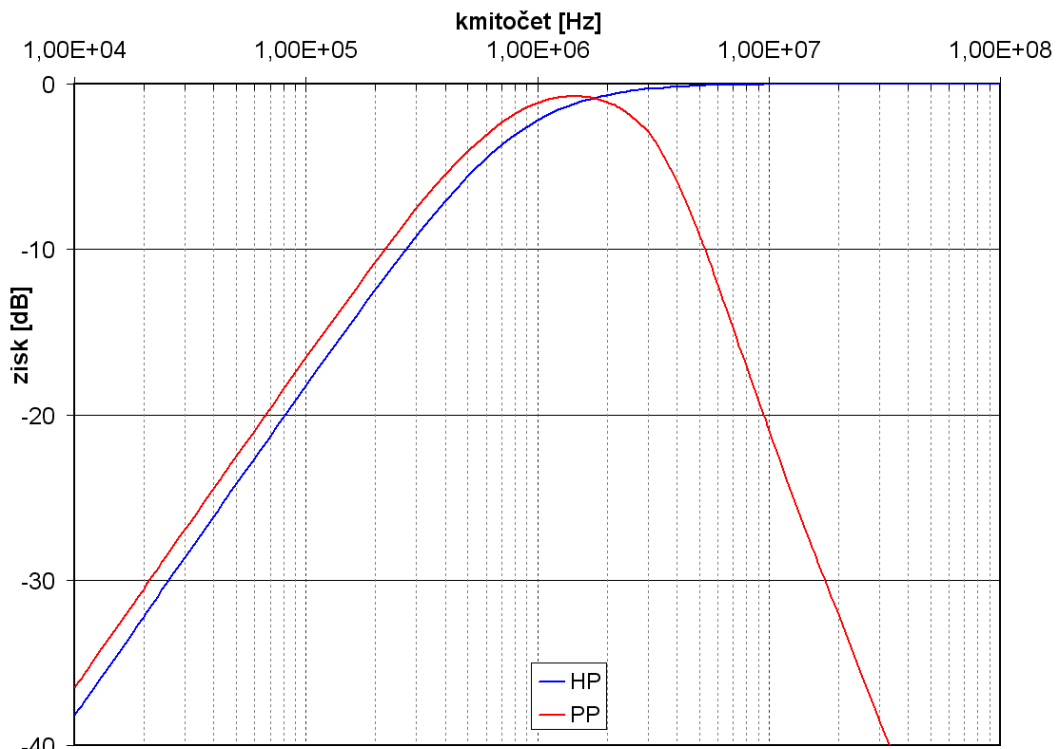
**Obr.5.8** Navržený kmitočtový filtr v napěťovém módu

Výsledné přenosové funkce takto navrženého kmitočtového filtru jsou shrnuty v tab.5.4

**Tab. 5.4** Přenosové funkce filtru v napěťovém módu

číslo	přenosová funkce	typ filtru
1	$K_{OUT1} = \frac{U_{OUT1}}{U_{IN1}} = \frac{pG_2C_1}{D}$	pásmová propust PP
2	$K_{OUT2} = \frac{U_{OUT1}}{U_{IN2}} = \frac{-p(C_1G_3)}{D}$	invertující pásmová propust PP
3	$K_{OUT3} = \frac{U_{OUT1}}{U_{IN3}} = \frac{p^2C_1C_2}{D}$	horní propust HP
4	$K_{OUT4} = \frac{U_{OUT2}}{U_{IN1}} = \frac{G_1G_2}{D}$	dolní propust DP
5	$K_{OUT5} = \frac{U_{OUT2}}{U_{IN3}} = \frac{pC_2G_1}{D}$	pásmová propust PP

Výsledné charakteristiky tohoto kmitočtového filtru zapojeného do napěťového režimu (obr.5.8) jsou zobrazeny na obr.5.9.



**Obr.5.9** Simulované charakteristiky kmitočtového filtru v napěťovém módu

## 6. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhování kmitočtových filtrů s proudovými aktivními prvky. V úvodu práce bylo provedeno seznámení se základními vlastnostmi kmitočtových filtrů a jejich rozdělení z typu použitých prvků a podle přenášeného kmitočtového pásma. Dále byly uvedeny možné režimy, ve kterých mohou obvody pracovat, a to sice napěťový, proudový a smíšený.

Dále jsou uvedeny a popsány různé metody návrhu kmitočtových filtrů. Tato práce se zabývá návrhem kmitočtového filtru pomocí autonomního obvodu, protože tato metoda patří mezi nejčastěji používané metody návrhu. Tuto metodu návrhu lze využít i k návrhu oscilátorů.

V další části byli představeny proudové aktivní prvky - proudový operační zesilovač COA a aktivní prvek CMI. Samotný návrh kmitočtového filtru je ukázán s aktivním prvkem CMI pomocí autonomního obvodu.

Při návrhu se vychází z úplné admitanční sítě s jedním, popř. se dvěma aktivními prvky CMI. Z takové admitanční sítě je vždy odvozeno několik autonomních obvodů se čtyřmi a pěti pasivními prvky, a dále na vybraném příkladu ukázán další postup návrhu kmitočtu. V ukázce návrhu kmitočtového filtru s jedním aktivním prvkem je i ukázán příklad filtru v napěťovém režimu, ostatní návrhy jsou brány v režimu čistě proudovém. Dále je zde ukázáno i návrh filtru s více filtračními funkcemi, tzv. multifunkční filtr.

Pro vybraný multifunkční kmitočtový filtr jsou nasimulovány i přenosové charakteristiky filtru, pracujícím v proudovém režimu. Obvod je schopen pracovat jako multifunkční filtr i v režimu napěťovém (tab.5.4). Aktivní prvky GCMI byly realizovány pomocí obvodů UCC-N1B. Filtr pracuje jako dolní propust DP, pásmová propust PP i jako horní propust HP (obr. 5.7).

Výpočty charakteristických rovnic a přenosových funkcí byly provedeny za pomoci programu Snap v3.02 a OrCAD v10.3, pro tvorbu schémat program ProfiCAD v4.6.4.

## 7. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HÁJEK, K., SEDLÁČEK, J. Kmitočtové filtry. Nakladatelství BEN, Praha 2002, 529 stran, ISBN 80-7300-023-7.
- [2] LATTENBERG, I., VRBA, K. Návrh kmitočtových filtrů s CMI vycházející z obecné admitanční sítě, Internetový časopis Elektorevue [online], [www.elektorevue.cz](http://www.elektorevue.cz)
- [3] BIOLEK, D., GUBEK, T., Nové obvodové prvky pro zpracování signálů v proudovém módu, [online]. Internetový časopis Elektorevue, [www.elektorevue.cz](http://www.elektorevue.cz)
- [4] JEŘÁBEK, J., VRBA, K. Kmitočtové filtry s univerzálním CMI [online]. Internetový časopis Elektorevue, [www.elektorevue.cz](http://www.elektorevue.cz)
- [5] ČAJKA, J., VRBA, K.: Konvejory – Návrh obvodů s konvejory. Výzkumná zpráva, FEKT VUT v Brně, 2003.
- [6] KOLKA, Z.: Uživatelská příručka programu SNAP verze 3, elektronická příručka programu, FEKT VUT v Brně 2003.
- [7] ŠPONAR, R.: Syntetické dvojpólové prvky s imitacemi vyšších řádů v kmitočtových filtrech s proudovými konvejory, [online], Internetový časopis Elektorevue, [www.elektorevue.cz](http://www.elektorevue.cz)
- [8] JEŘÁBEK, J., KOTON, J., VRBA, K. Zobecněná metoda návrhu multifunkčních kmitočtových filtrů, [online], Internetový časopis Elektorevue, [www.elektorevue.cz](http://www.elektorevue.cz)