

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 484*

*ISSN 1213-4198*

*thesis* IS

*Ing. Vladimír Axman*

**Obvody s moderními aktivními prvky**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav Radioelektroniky

**Ing. Vladimír Axman**

**Obvody s moderními aktivními prvky**

Circuits with modern active elements

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Teoretická elektrotechnika  
Školitel: Prof. Ing. Tomáš Dostál, DrSc.  
Oponenti: Prof. Ing. Karel Hájek, CSc.  
Doc. Ing. Jiří Sedláček, Csc.  
Datum obhajoby: 17. 6. 2008

**Klíčová slova**

Aktivní filtry, filtry s CCII+, filtry s konvejery, filtry druhého řádu, elektronicky laditelné filtry, aktivní filtry pro vyšší kmitočty

**Keywords**

Active filters, Filters with CCII+, filters with conveyors, second order filters, electrically tuned filters, active filters for higher frequencies

Rukopis disertační práce je uložen na Ústavu Radioelektroniky fakulty Elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.

© Vladimír Axman, 2008

ISBN 978-80-214-3701-2

ISSN 1213-4198

1	ÚVOD5	
1.1	Aktivní RC filtry druhého řádu s konvejory .....	5
1.2	Známá zapojení aktivních RC filtrů s konvejory z pohledu počtu aktivních prvků .....	6
1.3	Známá zapojení aktivních RC filtrů s konvejory vhodnými pro realizaci přenosových funkcí s nulami přenosu .....	7
1.4	Známá zapojení aktivních RC filtrů z hlediska možnosti elektronického přeladování.....	8
1.5	Shrnutí současného stavu .....	8
1.6	Cíle disertační práce.....	9
2	FILTRY DRUHÉHO ŘÁDU S KONVEJORY A JEJICH MOŽNOSTI ELEKTRONICKÉHO LADĚNÍ.....	10
2.1	Filtry se dvěma konvejory pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu.....	10
2.2	Filtry s jedním konvejorem pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu .....	11
2.3	Filtry s jedním konvejorem CCII+ a čtyřmi pasivními prvky .....	11
2.4	Filtry s jedním konvejorem CCII+ a pěti pasivními prvky pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu .....	12
3	ZÁVĚR.....	15



# 1 ÚVOD

Po rozboru situace jsem se rozhodl, že se budu věnovat studiu a výzkumu v oblasti aktivních RC filtrů s konvejory, protože jsem tam našel možnost působení v oblasti filtrů druhého řádu s nulami přenosu a v oblasti filtrů s elektronicky nastavitelnými parametry.

Přesto, že mé zaměření disertační práce je relativně úzké, tak při obhajobě tezí disertační práce bylo rozhodnuto, že název zůstane nezměněn, a proto je název mé disertační práce „Obvody s moderními aktivními prvky“. Toto rozhodnutí komise bylo učiněno také vzhledem k tomu, že se v disertační práci zabývám možností elektronického nastavování parametrů filtrů pomocí metody napěťového bootstrapu, kde využívám moderní elektronické součástky. V tomto případě se skutečně jedná o zapojení, která mohou využívat celou řadu různých aktivních prvků pro realizaci funkce elektronického nastavování parametrů.

## 1.1 AKTIVNÍ RC FILTRY DRUHÉHO ŘÁDU S KONVEJORY

Konvektor jako aktivní prvek je znám již od konce šedesátých let dvacátého století, kdy byl definován K.C.Smithem a A. Sedrou [1].

O možnostech využití konvektorů ve filtrech se začalo uvažovat již od počátku sedmdesátých let. V této době se již vyskytovaly publikace využívající proudový konvektor druhé generace CCII+ a CCII- ke konstrukci gyrátoru. Konvejory zapojené jako gyrátory byly používány pro simulaci cívek v klasických RLC filtrech. Příklad použití konvektorů CCII+ a CCII- jako gyrátoru byl publikován ve [2], kde je také ukázána možnost konstrukce konvektoru pomocí operačního zesilovače a proudových zrcadel. Vzhledem k použití operačního zesilovače ke konstrukci konvektoru a tehdejšímu stavu technologie měly takto konstruované konvejory šířku pásma menší než 1MHz. Praktické měření je také ukázáno v [1].

V osmdesátých letech se stále objevují publikace využívající ke konstrukci konvektorů operační zesilovače a v této době již byla známa zapojení pro simulaci plovoucí cívky pomocí dvou konvektorů CCII-. Ve [3] je uvedeno zapojení, které nahrazuje plovoucí cívku pomocí dvou proudových konvektorů druhé generace CCII-. Ve [3] je také ukázána praktická realizace a měření pásmové propusti konstruované pomocí plovoucí cívky simulované dvěma CCII-, čtyř rezistorů a jednoho kondenzátoru.

Výhodou všech těchto konstrukcí byla možnost použít návrh klasických metod pro návrh RLC filtrů. Nevýhodou těchto zapojení byl značný počet použitých aktivních a pasivních prvků použitých pro konstrukci konvektory a tudíž pro simulaci cívek.

Od počátku devadesátých let začíná prudký rozvoj v konstrukci proudových konvektorů druhé generace a snaha o jejich integraci. Byly publikovány články s proudovými konvejory na bázi operačních zesilovačů (stejný princip jako v předešlých letech), ale vzhledem k rozvoji CMOS technologií se začaly objevovat konvejory na bázi CMOS tranzistorů. Proudový konvektor CCII+ a CCII- konstruovaný na bázi CMOS tranzistorů byl publikován ve [4].

V návaznosti na vývoj v oblasti konstrukce proudových konvektorů druhé generace, CCII+ a CCII-, a jejich integrace začíná počátkem devadesátých let také prudký rozvoj výzkumu týkající se možnosti využití těchto prvků v ARC filtrech, kde by nahradil proudový konvektor CCII+ a CCII- klasický operační zesilovač. Pod pojmem klasický operační zesilovač je míněn operační zesilovač s napěťovou zpětnou vazbou. Začala se objevovat zapojení filtrů druhého řádu (biquadů) s konvejory pro kaskádní syntézu filtrů.

Shen-Iuan Liu a Hen-Wai Tsao publikovali v [5] velice zajímavé zapojení ARC filtru druhého řádu pro kaskádní syntézu filtrů pomocí jednoho proudového konvektoru druhé generace

V polovině devadesátých let se objevovaly články zabývající se filtry druhého řádu v proudovém módu využívající jako aktivní prvek proudový konvektor druhé generace CCII+ a CCII-. V této době se také začalo objevovat použití konvektorů konstruovaných na principu translineárních obvodů. Proudový konvektor konstruovaný na tomto principu se později stal

základním stavebním kamenem pro konstrukci operačních zesilovačů s proudovou zpětnou vazbou.

V této době byla publikována zapojení filtrů s konvejory a pasivními prvky obsahující více než jeden aktivní prvek CCII+ nebo CCII-. Zajímavá jsou zapojení publikovaná v [6], [7], [8].

V polovině devadesátých let se objevilo zapojení filtru druhého řádu s konvejory umožňující realizaci všech typů přenosových funkcí druhého řádu (DP, PP, HP, PZ, FČ, DPN, HPN), bylo publikováno v [9]. Toto zapojení vychází ze zapojení s operačním zesilovačem (Friend-Deliyannis aktivní RC biquad). Vzhledem k velkému množství prvků v obvodu je však obtížně použitelné pro praxi. V této době se také začínají objevovat práce zabývající se transformacemi mezi zapojeními s operačními zesilovači a s konvejory ([10]).

V druhé polovině devadesátých let se začínaly také objevovat publikace a konstrukce zabývající se konvejory s elektronicky nastavitelnými parametry a v návaznosti na to také zapojení filtrů s elektronicky měnitelnými parametry na bázi konvejořů [11], [12], [21], [22].

V polovině devadesátých let se začaly konvejory objevovat také v komerčně dostupných součástkách od různých výrobců. Jedná se zejména o obvody AD844, OPA660, OPA2662, MAX435 a MAX436. Začínají se také objevovat zapojení aktivních RC filtrů na bázi těchto komerčně vyráběných součástek.

Ke konci devadesátých let se objevily publikace zabývající se syntézou filtrů s konvejory vyšších řádů na bázi bloků prvního nebo druhého řádu. Nejedná se ovšem o kaskádní syntézu, ale většinou o implementaci topologie filtrů s integrátořy. Tato možnost variability je většinou vykoupena velkou složitostí výsledného zapojení filtru a tím vyplývajících nedostatků [16], [18].

## **1.2 ZNÁMÁ ZAPOJENÍ AKTIVNÍCH RC FILTRŮ S KONVEJORY Z POHLEDU POČTU AKTIVNÍCH PRVKŮ**

V současné době je známo několik zapojení aktivních RC filtrů s jedním konvejořem [5] a je také známa transformace zapojení obvodu v napěťovém módu s invertujícím operačním zesilovačem na zapojení v napěťovém nebo proudovém módu s konvejořem [10].

V [5] Shen-Iuan Liu a Hen-Wai Tsao publikovali velice zajímavé zapojení ARC filtru druhého řádu pro kaskádní syntézu filtrů pomocí jednoho proudového konvejořu druhé generace.

Velkou výhodou těchto zapojení je relativně malý počet aktivních a pasivních prvků a velká vstupní impedance filtru z důvodu použití vysokoimpedanční svorky konvejořů pro vstup. Tato výhoda dává velice dobrou možnost řadit tyto filtry kaskádně bez nutnosti dalších oddělovacích prvků. Nevýhodou je nemožnost konstrukce modifikované dolní a horní propusti druhého řádu a fázovacího článku druhého řádu. Další nevýhodou je, že vzhledem k topologii není možné dosáhnout možnosti přeladování všech možných typů filtrů metodou napěťového bootstrapu.

V [10] bylo publikována velice zajímavá možnost transformace zapojení aktivních RC filtrů s operačními zesilovači na zapojení s proudovými konvejory. Transformace umožňuje převést aktivní filtr s invertujícím operačním zesilovačem na aktivní filtr v napěťovém nebo proudovém módu s konvejořem.

V současné době je známo několik možností realizace aktivních RC filtrů se dvěma konvejory. Zajímavá zapojení jsou publikována v [3], [6], [7], [8], [13], [15], [17], [20], [23].

Ve [3] bylo uvedeno zapojení, které nahrazuje plovoucí cívku pomocí dvou proudových konvejořů druhé generace CCII-zapojených jako gyrátoru. Je zde také ukázána praktická realizace a měření konstrukce pásmové propusti pomocí plovoucí cívky simulované dvěma CCII-, čtyř rezistorů a jednoho kondenzátoru. Výhodou použití gyrátoru je možnost použití návrhu klasických metod pro návrh RLC filtrů. Nevýhodou těchto zapojení byl značný počet potřebných aktivních a pasivních prvků pro konstrukci s konvejory a tudíž pro simulaci cívek. Další nevýhodou vyplývající ze složitosti zapojení obvodů pro simulaci cívek byl nízký maximální použitelný kmitočet těchto filtrů.

V [6] bylo publikováno zapojení filtru třetího řádu v proudovém módu se dvěma konvejory CCII+. V tomto článku je velice zajímavá první část filtru která tvoří filtr druhého řádu ve smíšeném módu s jedním konvejorem a jedná se o velice zajímavou topologii. V tomto případě lze konstruovat pouze dolní a pásmovou propust druhého řádu ve smíšeném módu. Výhoda zapojení publikovaného filtru je v necitlivosti přenosu v propustném pásmu na napěťovém přenosu ze svorky Y na X u obou konvejořů. Proudový přenos druhého konvejořu se projeví jako stejnosměrný offset. Pomocí tohoto zapojení nelze realizovat horní propust a filtry s nulami přenosu.

V [7] bylo publikováno zapojení simulující ztrátový gyrátor pomocí dvou konvejořů CCII+ a ukazuje možnost realizace pásmové propusti druhého řádu v proudovém módu. Velkým přínosem tohoto článku je zajímavá konfigurace pásmové propusti druhého řádu se dvěma aktivními prvky (CCII+) a čtyřmi pasivními prvky.

Podobná zapojení jako v [7] a [8] byla publikována také v [13], [15], [17], [20], [23]. Ve všech případech se jedná o zapojení se dvěma konvejory. V [17] a [23] jsou navíc přidány ještě dva napěťové sledovače podobně jako v [8]. Z hlediska konstrukce filtru s konvejory jsou nejzajímavější publikace [13], [15], [20] a [23], které využívají pro konstrukci filtrů dvou konvejořů a maximálně šesti zemněných součástek.

V [15] bylo publikováno topologicky stejné zapojení jako ve [13], s tím rozdílem, že je pro konstrukci filtru druhého řádu využito dvou konvejořů CCII+ (Obr.1.6.) místo CCI-. V tomto článku je také publikováno zapojení filtru druhého řádu s CCI+ s topologií podobnou [7].

Ve [20] byla publikována další varianta zapojení filtru druhého řádu se dvěma konvejory. V tomto případě je využito konvejořů s komplementárními výstupy

Jsou samozřejmě známá také zapojení filtrů s více než dvěma konvejory. Zajímavá zapojení filtrů s více než dvěma konvejory jsou publikována v [9], [14], [16], [18], [21], [22]. V oblasti filtrů druhého řádu s více konvejory můžeme najít zapojení, která byla odvozena s pomocí různých přístupů. V [9] bylo publikováno zapojení, které bylo odvozeno z existujícího zapojení s operačním zesilovačem. Jednalo se o Friend-Deliyannis aktivní RC topologii v provedení s proudovými konvejory. Ve [14] byla publikována zapojení filtru druhého řádu se čtyřmi konvejory, přičemž konstrukce filtrů vycházela z obvodové realizace gyrátorů. V [16], [18], [21], [22] byla publikována zapojení filtrů druhého řádu s konvejory na principu filtrů s integrátory. V tomto případě lze pro převod struktury s operačními zesilovači na strukturu s konvejory použít například transformaci publikovanou v [10] (pokud se jedná o zapojení s invertujícími integrátory).

### **1.3 ZNÁMÁ ZAPOJENÍ AKTIVNÍCH RC FILTRŮ S KONVEJORY VHDNÝMI PRO REALIZACI PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ S NULAMI PŘENOSU**

V současné době je známo několik zapojení aktivních RC filtrů s konvejory vhodnými pro realizaci přenosových funkcí s nulami přenosu. Zajímavá zapojení jsou publikována v [5], [8], [9], [14], [16]. Ve většině publikací, kde je publikována možnost realizace přenosové funkce s nulou přenosu, je publikována pouze možnost realizace pásmové zádrže ([5], [8], [14], [16]). V těchto případech je nejzajímavější [5], poněvadž se jedná o možnost realizace pásmové zádrže pouze s jedním proudovým konvejorem CCII-. Ve všech ostatních případech je nutno více aktivních prvků.

Možnost realizace přenosové funkce typu PZ, DPN a HPN byla publikována v [9]. Tato publikace prezentuje zapojení filtru druhého řádu s konvejory umožňující realizaci všech typů přenosových funkcí druhého řádu (DP, PP, HP, PZ, FČ, DPN, HPN). Toto zapojení vychází ze zapojení s operačním zesilovačem (Friend-Deliyannis aktivní RC topologie). Na rozdíl od zapojení s operačním zesilovačem pracuje zapojení s konvejory s proudovými vstupy a výstupy. Velkou výhodou tohoto zapojení je možnost realizace všech typů přenosové funkce druhého řádu.



Nevýhodou je velká složitost zapojení a nutnost více konvektorů pro některé typy přenosových funkcí a nutnost konvektorů s více výstupy.

## 1.4 ZNÁMÁ ZAPOJENÍ AKTIVNÍCH RC FILTRŮ Z HLEDISKA MOŽNOSTI ELEKTRONICKÉHO PŘELAĐOVÁNÍ

V současné době je známo několik možností realizace elektronicky přesaditelných filtrů s konvektory. Možné způsoby implementace přelađování v aktivních RC filtrech druhého řádu s konvektory byly publikovány v [11], [12], [21], [22].

Jedná se v podstatě o dva způsoby realizace možnosti elektronického přelađování ve filtrech s konvektory. První možnost je elektronicky měnit parametry pasivních součástek filtru přidáním dalších aktivních prvků. Tato možnost je použita v [11], [21]. Další možnost je elektronicky měnit parametry aktivního prvku (proudového konvektoru) a tím dosáhnout možnosti elektronického přelađování. Tato možnost je použita ve [12] a [22].

V [11] je k přelađování využito možnosti elektronické změny parametrů zemněných rezistorů filtru napětím. Jako napětím řízený rezistor je využit CMOS tranzistor v lineárním módu. Filtr využívá realizace gyrátoru pomocí dvou konvektorů a tudíž se jedná o filtr se zemněným gyrátorem, u kterého se změnou hodnoty rezistorů dociluje změny gyračních konstant gyrátoru.

Ve [21] byla publikována možnost realizace laditelného oscilátoru. Bylo publikováno několik možností zapojení oscilátoru se třemi konvektory obsahující zemněné pasivní prvky vhodné pro možnost elektronického přelađování. I v tomto případě bylo k přelađování využito možnosti elektronické změny parametrů rezistorů v obvodu. Bohužel v článku nebylo publikováno, jakým způsobem bylo změny parametrů zemněných rezistorů dosaženo.

Ve [12] byl prezentován konvektor řízený proudem, který může být vhodný pro realizaci elektronicky přesaditelných filtrů. Jako možnost aplikace tohoto konvektoru je v článku obsažen elektronicky laditelný filtr se dvěma konvektory CCCII+ v zapojení jako pásmová propust. Topologie zapojení filtru je podobná s topologií publikovanou v [7]. V tomto případě je využito změny velikosti parazitního rezistoru na svorce X konvektoru prostřednictvím změny velikosti proudu nastavujícího stejnosměrný pracovní bod tranzistorů uvnitř konvektoru.

V [22] byla prezentována další možnost realizace řízeného konvektoru. V tomto případě se využívalo elektronické změny proudového přenosu konvektoru ze svorky X na svorku Y. Změny parametrů bylo opět dosaženo pomocí změny biasovacího proudu. Publikovaný laditelný filtr se skládal ze sedmi konvektorů druhého řádu a osmi pasivních prvků. Tento článek je přínosný především ukázkou možnosti realizace konvektoru s měnitelným proudovým přenosem.

## 1.5 SHRUTÍ SOUČASNÉHO STAVU

V současné době je známo zapojení filtrů druhého řádu s jedním konvektorem CCII+ pro realizaci DP, PP, HP a zapojení s jedním konvektorem CCII- pro realizaci DP, PP, HP, PZ a FČ prvního řádu publikované v [5]. Pokud je mi známo, tak nebyla publikována zapojení pro realizaci přenosové funkce typu DPN a HPN. Nebyla publikována také zapojení umožňující elektronickou změnu parametrů filtru.

## 1.6 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je vytvořit nové možnosti realizace (zapojení) filtrů druhého řádu s jedním nebo dvěma konvejory vhodné pro realizaci přenosové funkce typu DP, PP, HP PZ, FČ, DPN a HPN s malým počtem pasivních prvků a snadnou možností návrhu parametrů filtru.

Cílem disertační práce je vytvořit nové možnosti realizace filtrů s konvejory s možností elektronického nastavování parametrů filtru.

U nových zapojení filtrů bude kladen důraz zejména na možnost použití těchto zapojení filtrů pro konstrukci filtrů v kmitočtové oblasti nad 1MHz nebo na možnosti elektronického měnění parametrů filtru.

Nová zapojení budou ověřena počítačovými simulacemi s ideálními prvky v programu SNAP.

Nová zapojení budou ověřena počítačovými simulacemi s modely reálných prvků v programu PSpice.

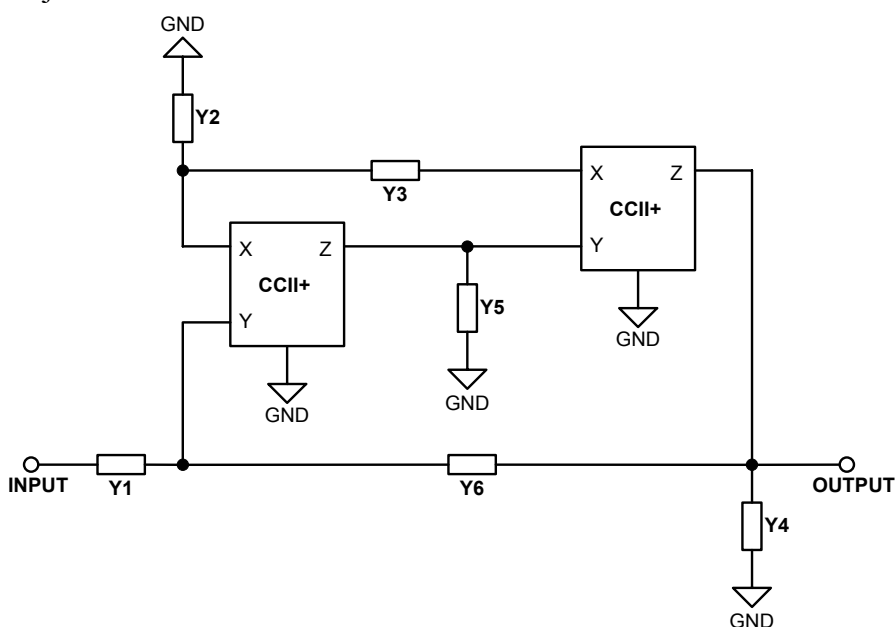
Některá zapojení budou ověřena praktickou realizací v oblasti nízkých (akustických) kmitočtů nebo v oblasti vysokých kmitočtů.

## 2 FILTRY DRUHÉHO ŘÁDU S KONVEJORY A JEJICH MOŽNOSTI ELEKTRONICKÉHO LADĚNÍ

Na začátku doktorského studia bylo nutné abych se seznámil s proudovými konvejory, jejich vlastnostmi a známými možnostmi použití. Poté, co jsem se dozvěděl, že na komerčním trhu jsou poměrně snadno dostupné proudové konvejory CCII+ obsaženy v obvodech AD844 a OPA 660, jsem se rozhodl, že se zaměřím právě na filtry druhého řádu s proudovými konvejory CCII+. Na popud mého školitele jsem se začal věnovat obvodům publikovaným ve [12] a [24].

### 2.1 FILTRY SE DVĚMA KONVEJORY PRO REALIZACI PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ S NULOU PŘENOSU

Nejdříve jsem se věnoval zapojením filtrů se dvěma proudovými konvejory. Zjistil jsem, že nejsou běžně publikována zapojení s konvejory pro realizaci filtrů s nulami přenosu, proto jsem se začal zabývat touto oblastí. Vytvořil jsem zapojení vhodné pro realizaci přenosových funkcí s nulami přenosu. Topologie se dvěma konvejory umožňující realizaci přenosových funkcí s nulami přenosu je uvedena na Obr.2.1.



Obr.2.1 topologie pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu.

Nová myšlenka spočívá v zavedení zpětné vazby mezi konvejory přes svorky „X“. Tvar obecné přenosové funkce tohoto zapojení je

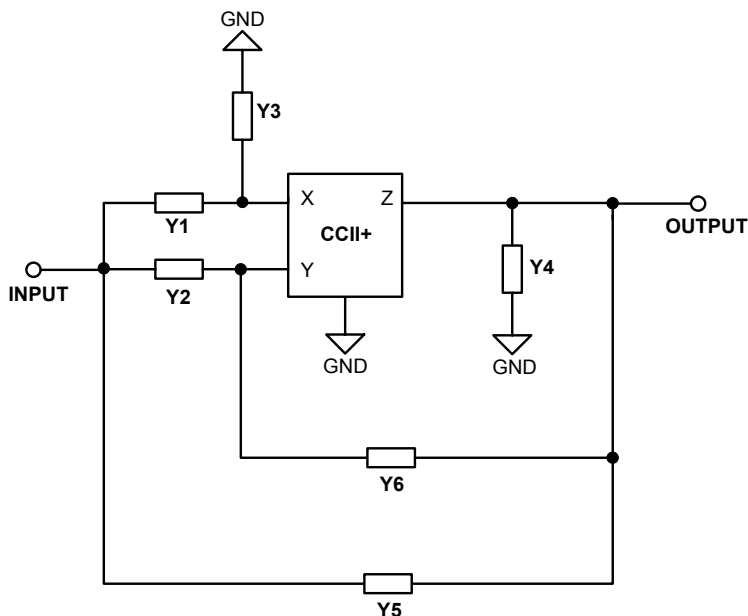
$$K(p) = \frac{Y1 \cdot Y5 \cdot Y6 + Y1 \cdot Y3 \cdot Y6 + Y1 \cdot Y2 \cdot Y3 - Y1 \cdot Y3 \cdot Y5}{Y4 \cdot Y5 \cdot Y6 + Y4 \cdot Y5 \cdot Y1 + Y4 \cdot Y6 \cdot Y3 + Y4 \cdot Y1 \cdot Y3 + Y1 \cdot Y5 \cdot Y6 + Y3 \cdot Y5 \cdot Y6 - Y2 \cdot Y3 \cdot Y6 + Y6 \cdot Y1 \cdot Y3} \quad (1)$$

Použitím na admitancích Y5 a Y6 kondenzátorů a Y1 až Y4 vodivostí (rezistorů) vznikne zapojení dolní propusti s nulou přenosu (DPN) s přenosovou funkcí ve tvaru

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot (C1 \cdot C2 \cdot G1) + p \cdot (G1 \cdot G3 \cdot (C2 - C1)) + G1 \cdot G2 \cdot G3}{p^2 \cdot (C1 \cdot C2 \cdot (G1 + G3 + G4)) + p \cdot (C2 \cdot G3 \cdot G4 + C2 \cdot G1 \cdot G3 - C2 \cdot G2 \cdot G3 + C1 \cdot G1 \cdot G4) + G1 \cdot G3 \cdot G4} \quad (2)$$

## 2.2 FILTRY S JEDNÍM KONVEJOREM PRO REALIZACI PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ S NULOU PŘENOSU

Věnoval jsem se také zapojením s jedním konvejorem a snažil jsem se vytvořit zapojení pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu na bázi jednoho konvejevu. Vytvořil jsem topologii umožňující realizaci filtru pouze s jedním konvejorem. Tato topologie je znázorněna na Obr.2.2. Jedná se o zapojení s více zpětnými vazbami a šesti pasivními prvky. Přenosová funkce tohoto zapojení má tvar (3).



Obr.2.2. Topologie pro realizaci filtrů s nulou přenosu s jedním konvejorem.

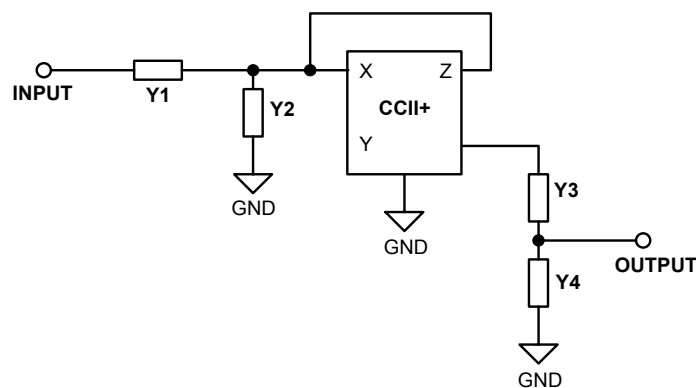
$$K(p) = \frac{Y5 \cdot Y6 + Y5 \cdot Y2 + Y6 \cdot Y2 + Y2 \cdot Y3 - Y6 \cdot Y1}{Y5 \cdot Y6 + Y5 \cdot Y2 + Y6 \cdot Y2 + Y6 \cdot Y4 + Y2 \cdot Y4 - Y6 \cdot Y1 - Y6 \cdot Y3} \quad (3)$$

Pro realizaci dolní propusti s nulou přenosu jsem Y1, Y2, Y3 a Y4 nahradil kondenzátory a Y5, Y6 jsem nahradil rezistory. V tomto případě se změní obecná přenosová funkce (3).

Při nízkých kmitočtech (menších než kmitočet pólu) se uplatňuje přenosová cesta ze vstupu filtru na výstup přes vodivost G1. Při vysokých kmitočtech (vyšších než kmitočet nuly) se uplatňuje přenosová cesta ze vstupu přes konvejevu na výstup. Ze schématu zapojení je patrné, že ke svorce "X" konvejevu jsou připojeny kondenzátory, které mají pro vysoké kmitočty malou impedanci. Z toho vyplývá, že se nepříznivě projeví parazitní rezistor na svorce "X" konvejevu. V tomto případě tento parazitní rezistor nelze kompenzovat a projeví se v přenosových charakteristikách filtru.

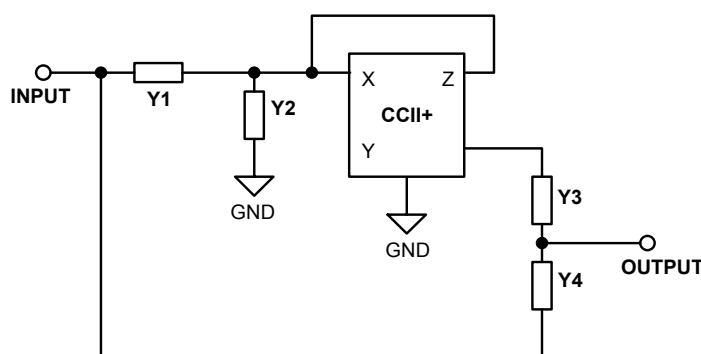
## 2.3 FILTRY S JEDNÍM KONVEJOREM CCII+ A ČTYŘMI PASIVNÍMI PRVKY

Vytvořil jsem topologii pro realizaci filtrů druhého řádu typu DP, PP, HP, PZ a FČ na bázi jednoho proudového konvejevu zapojeného jako negativní impedanční konvertor. Obecné schéma zapojení pro realizaci těchto filtrů je na Obr.2.3. a Obr.2.4. Obecná přenosová funkce pro DP, PP, HP viz. Rovnice (4) a obecná přenosová funkce pro PZ a FČ viz. (5).



Obr. 2.3. Topologie filtru s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky pro realizaci DP, PP, HP.

$$K(p) = \frac{Y1 \cdot Y3}{Y1 \cdot Y3 + Y1 \cdot Y4 + Y2 \cdot Y3 + Y2 \cdot Y4 - Y3 \cdot Y4} \quad (4)$$



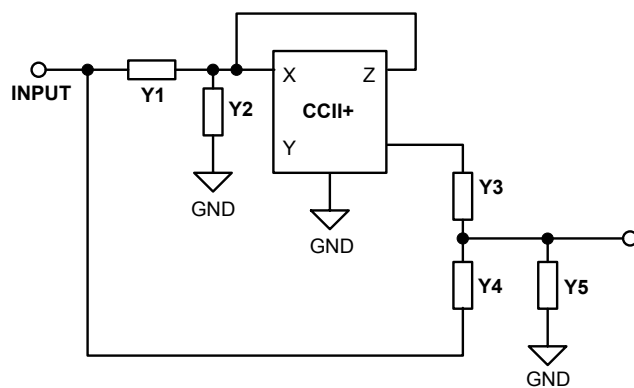
Obr. 2.4. Topologie filtru s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky pro realizaci PZ, FČ.

$$K(p) = \frac{Y2 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y3 - Y3 \cdot Y4}{Y1 \cdot Y3 + Y1 \cdot Y4 + Y2 \cdot Y3 + Y2 \cdot Y4 - Y3 \cdot Y4} \quad (5)$$

Zapojení využívají proudového konvejevu druhé generace se zkratovanými svorkami Y a Z. Jedná se o velice jednoduchou konfiguraci umožňující použít minimální počet aktivních a pasivních prvků.

## 2.4 FILTRY S JEDNÍM KONVEJOREM CCII+ A PĚTI PASIVNÍMI PRVKY PRO REALIZACI PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ S NULOU PŘENOSU

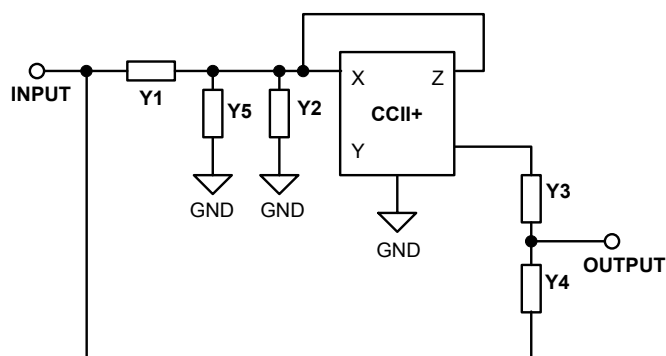
Z pásmové zádrže prezentované v předešlé kapitole jsem odvodil možná zapojení pro konstrukci filtrů typu DPN a HPN. Jedná se celkem o tři velice podobná zapojení, která se liší polohou jednoho pasivního prvku vytvářejícího z pásmové zádrže filtr typu DPN a HPN. Tři možné varianty jsou zobrazeny na Obr.2.5, Obr.2.6.



Obr.2.5. Topologie pro realizaci filtru druhého řádu s nulou přenosu – varianta 1.

Obecná přenosová funkce obvodu z Obr.2.5. je vyjádřena v (6).

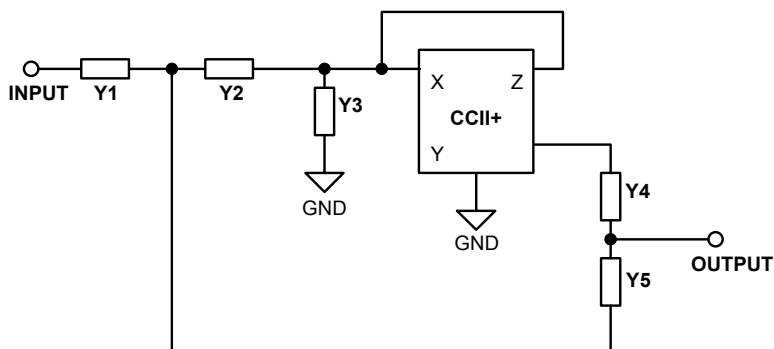
$$K(p) = \frac{Y2 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y3 - Y3 \cdot Y4}{Y1 \cdot Y3 + Y1 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y5 + Y2 \cdot Y3 + Y2 \cdot Y4 + Y2 \cdot Y5 - Y3 \cdot Y4 - Y3 \cdot Y5} \quad (6)$$



Obr.2.6. Topologie pro realizaci filtru druhého řádu s nulou přenosu – varianta 2.

Obecná přenosová funkce obvodu z Obr.2.5. je vyjádřena v (7).

$$K(p) = \frac{Y1 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y3 + Y4 \cdot Y5 + Y4 \cdot Y2 - Y3 \cdot Y4}{Y1 \cdot Y3 + Y1 \cdot Y4 + Y3 \cdot Y5 + Y3 \cdot Y2 + Y4 \cdot Y5 + Y4 \cdot Y2 - Y3 \cdot Y4} \quad (7)$$



Obr.2.7. Topologie pro realizaci filtru druhého řádu s nulou přenosu – varianta 3.

Obecná přenosová funkce obvodu z Obr.2.6. je vyjádřena v (8)

$$K(p) = \frac{Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_5 + Y_1 \cdot Y_3 \cdot Y_5 + Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_4 - Y_1 \cdot Y_4 \cdot Y_5}{Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_4 + Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_5 + Y_1 \cdot Y_3 \cdot Y_4 + Y_1 \cdot Y_3 \cdot Y_5 + Y_2 \cdot Y_3 \cdot Y_4 + Y_2 \cdot Y_3 \cdot Y_5 + Y_3 \cdot Y_4 \cdot Y_5 - Y_1 \cdot Y_4 \cdot Y_5} \quad (8)$$

### 3 ZÁVĚR

Vytvořil jsem nová zapojení filtrů s jedním a dvěma konvejory pro realizaci filtrů druhého řádu. Schémata zapojení, a tvary přenosových funkcí jsou uvedeny ve druhé kapitole této disertační práce. Za zmínku stojí čtyři topologie filtrů druhého řádu s konvejory.

Nejprve jsem ve druhé kapitole uvedl topologii pro konstrukci filtrů se dvěma proudovými konvejory druhé generace CCII+. Tato topologie je vhodná pro konstrukci filtrů typu DP, PP, HP. Tato zapojení lze také použít pro konstrukci elektricky laditelných filtrů. Tyto filtry jsem také použil při konstrukci laboratorního přípravku pro měření elektronicky laditelných filtrů s konvejory.

Dále jsem se zaměřil na možnosti konstrukce filtrů druhého řádu s nulami přenosu. Vytvořil jsem několik možných zapojení pro realizaci těchto filtrů se dvěma konvejory a nakonec i s jedním konvejorem. Z těchto možností jsem nakonec zvolil zapojení s jedním konvejorem a šesti pasivními prvky. Tyto filtry nejsou vhodné pro realizaci PZ a FČ. Jsou vhodné pouze pro konstrukci filtrů DPN a HPN. Tyto filtry nejsou vhodné pro elektronické ladění z důvodu nevhodné topologie zapojení.

Dále jsem vytvořil zapojení filtrů typu DP, HP, PP s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky. Tato zapojení jsou velice vhodná pro konstrukci filtrů na vyšších kmitočtech (řádově desítky MHz). Jedná se o jednoduchá zapojení velice vhodná pro elektronické ladění. Z těchto zapojení jsem odvodil zapojení pro PZ a FČ druhého řádu, které lze také elektronicky přeladovat.

Z předešlé topologie filtrů jsem odvodil zapojení pro realizaci filtrů DPN a HPN v několika konfiguracích. Jednotlivé konfigurace jsem uvedl ve druhé kapitole. Velikou výhodou těchto filtrů je možnost elektronického ladění. Jedná se o jedinou topologii filtrů s nulou přenosu, na bázi konvejořů, kterou lze elektronicky přeladovat.

Všechna uvedená zapojení jsem otestoval simulacemi v programu SNAP (ověření s ideálními prvky) v programu SPICE (ověření s modely reálných prvků AD844, MAX435) a praktickou realizací v oblasti nízkých kmitočtů. Výsledky praktického ověření jsou uvedeny ve třetí kapitole této disertační práce.

Jako aktivního prvku jsem používal převážně obvod AD844, který obsahuje jeden proudový konvejoř CCII+ a napěťový sledovač vstupem připojený na svorku Z proudového konvejořu.

S tímto aktivním prvkem lze konstruovat filtry do mezního kmitočtu jednotek Mhz.



## Použitá literatura

- [1] K. C. Smith, A. Sedra, The current conveyor – A new circuit building block, Proc. IEEE (Lett.), vol.56, Aug. 1968, pp. 1368 – 1369.
- [2] Gary G. A. Black, Roger T. Friedmann, Adel S. Sedra, Gyrator Implementation With Integrable Current Conveyors, IEEE Journal, December 1971, vol. Sc-6, no. 6.
- [3] Vimal Singh, An Implementation of CCII- Current Conveyor, With Application, IEEE Journal, september 1989, vol. 36, no. 9.
- [4] Wanlop Surakamponton, Vanchai Riewruja, Kiattisak Kumwachara, Kobchai Dejhan, Accurate CMOS-based Current Conveyors, IEEE Journal, August 1991, vol. 40, no. 4.
- [5] Shen - Iuan Liu, Hen - Wai Tsao, The Single CCII Biquads with High-Input Impedance, IEEE Journal, April 1991, vol.38, no. 4.
- [6] R. Nandi, Insensitive Current Mode Realization of Third-Order Butterworth Characteristic Using Current Conveyors, IEEE Journal, december 1994, vol. 41, no. 12.
- [7] Alain Fabre, Mustapha Alami, Universal Current Mode Biquad Implemented from Two Second Generation Current Conveyors, IEEE Journal, july 1995, vol. 42, no.7.
- [8] Shen – Iuan Liu, Dong – Shih Wu, New Current-Feedback Amplifier-Based Universal Biquadratic filter, IEEE Journal, august 1995, vol.44, no 4.
- [9] P. V. Ananda Mohan, New Current-Mode Biquad on Friend-Deliyannis Active RC Biquad, IEEE Journal, march 1995, vol. 42, no. 3.
- [10] S. Celma, P. A. Martinez, J. sabadell, A Transformation Method For Equivalent Infinite-Gain Op Amp to Unity-Gain CCII Networks, IEEE Journal, january 1996, vol. 43, no.1.
- [11] Hassan O. Elwan, Ahmed M. Soliman, A Novel CMOS Current Conveyor Realization with an Electronically Tunable Current Mode Filter Suitable for VLSI, IEEE Journal, september 1996, vol. 43, no. 9.
- [12] Alain Fabre, Omar Saaid, Francis Wiest, Christophe Boucheron, High Frequency Application Based on a New Current Controlled Conveyor, IEEE Journal, february 1996, vol. 43, no. 2.
- [13] Muhammad Taher Abuelma'atti, Abdallah Al - Ali Al - Ghumaiz, Novel CCI-Based Single-Element-Controlled Oscillators Employing Grounded Resistors and Capacitors, IEEE Journal, february 1996, vol. 43, no. 2.
- [14] Chun – Ming Chang, Multifunction Biquadratic Filters Using Current Conveyors, IEEE Journal, november 1997, vol.44, no. 11.
- [15] K. Vrba, J. Čajka, V. Zeman, New RC-Active Networks Using Current Conveyors, Radioengineering, june 1997, vol. 6, no. 2.
- [16] J. Čajka, T. Dostál, K. Vrba, Realization of Nth-Order Voltage Transfer Function Using Current Conveyors CCII, Radioengineering, june 1997, vol.6, no. 2.
- [17] T. Dostál, ARC Filters With Diamond Transistors and Buffers, Radioengineering, december 1998, vol. 7, no. 4.
- [18] K. Vrba, J. Čajka, V. Zeman, N-th Order Filters Using Balanced-Output CCII+/- Conveyors, Radioengineering, september 1998, vol. 7, no. 3.
- [19] T. Dostál, High Frequency State-Variable Biquadratic Active Filters, Radioengineering, april 1998, vol. 7, no. 1.
- [20] Chun – Ming Chang, Ming – Jye Lee, Voltage-Mode Multifunction Filter with Single Input and Three Outputs Using Two Compound Current Conveyors, IEEE Journal, november 1999, vol. 46, no. 11.
- [21] Pedro A. Martinez, Justo Sabadell, Concepción Aldea, Santiago Celma, Variable Frequency Sinusoidal Oscillator Based on CCII+, IEEE Journal, november 1999, vol. 46, no. 11.
- [22] C. A. Karybakas, C. A. Papazoglou, Low-Sensitive CCII-Based Biquadratic Filters Offering Electronic Frequency Shifting, IEEE Journal, april 1999, vol. 46, no. 4.
- [23] T. Dostál, ARC Filters Using Only Followers, Radioengineering, april 1999, vol. 8, no. 1.

- [24] K. Vrba, T. Dostál, J. Čajka, Adjoint Networks With Inverting And Noninverting Current Conveyors, Radioengineering, april 2000, vol. 9, no. 1.
- [25] Jiun – Wei Horng, New Configuration for Realizing Universal Voltage Mode Filter Using Two Current Feedback Amplifiers, IEEE Journal, october 2000, vol. 49, no. 5.
- [26] Giuseppe Ferri, Nicola Guerrini, High-Valued Passive Element Simulation Using Low-Voltage Low-Power Current Conveyors for Fully Integrated Application, IEEE Journal, april 2001, vol. 48, no. 4.
- [27] Fabrice Seugin, Alain Fabre, New Second Generation Current Conveyor with Reduced Parasitic Resistance and Bandpass Filter Application, IEEE Journal, june 2001, vol. 48, no. 6.
- [28] Jiun – Wei Horng, High Input Impedance Voltage-Mode Universal Biquadratic Filter Using Three Plus-Type CCII, IEEE Journal, october 2001, vol. 48, no. 10.
- [29] J. Čajka, T. Dostál, K. Vrba, High-Order Lowpass Filters Using DVCC Elements, Radioengineering, june 2002, vol. 11, no. 2.
- [30] Jiří Pospíšil, Zdeněk Kolka, Stanislav Hanus, Tomáš Dostál, Jaromír Brzobohatý, New Second-Order Optimized Filter Design, Radioengineering, 2003
- [31] Tomáš Dostál, All-Pass Filters in Current Mode, Radioengineering, 2005, p. 48 – 53.
- [32] Datasheet AD844 – Analog Devices
- [33] Datasheet OPA660 – Texas Instrument

## Publikované práce

- [1] Dostál T., Axman V., Macura P., Conveyor-based elliptic-function filters, in EDS'01. Electronic Devices and Systems EDS01. Brno: Faculty of el. eng. and comp. science, BUT, Brno, 2001, s 184 – 187, ISBN 80-214-1960-1
- [2] AXMAN V., Voltage and current followers in elliptic biquadratic filter, proceedings of 7th conference STUDENT FEI 2001, Brno, Czech Republic, 2001, s. 182 – 186, ISBN 80-214-1860-5
- [3] Axman V., Macura P., Netradiční filtry s netradičními funkčními bloky. (přednáška)
- [4] Axman V., Second order filters by voltage and current followers, conference proceedings. RADIOELEKTRONIKA 2002, FEI SUT Bratislava, 2002, s. 14 – 16, ISBN 80-227-1700-2
- [5] Axman V., Dostál T., Přeladitelné filtry pro laboratorní výuku, sborník konference Elektrotechnika a informatika 2002, Plzeň, 2002, s. 14 – 16, ISBN 80-7082-904-4
- [6] Axman V., Dostál T., Conveyor based elliptic fiction filters, sborník konference Elektrotechnika a informatika 2002, Plzeň, 2002, s. 14 – 16, ISBN 80-7082-904-4
- [7] Axman V., Využití transimpedančních zesilovačů v aktivních filtrech, sborník konference ATP2002, Brno, 2002, s. 53 – 59, ISBN 80-214-2128-2
- [8] Axman V., Macura P., Přeladování aktivních filtrů pomocí napěťově řízených zesilovačů, sborník konference ATP2002, Brno, 2002, s. 91 – 96, ISBN 80-214-2128-2
- [9] Axman V., Přeladitelné aktivní filtry pro výuku v laboratořích, sborník příspěvků a prezentací, Odborné semináře 2002, Brno, 2002, s. 1 – 27, ev. č. REL01V
- [10] Axman V., Aktivní filtry s obvodem AD844, sborník příspěvků a prezentací, Odborné semináře 2002, Brno, 2002, s. 28 – 41, ev. č. REL01V
- [11] Axman V., Biquads by current conveyor second generation and one voltage follower, Volume 3, Student EEICT 2002, Brno, 2002, s. 282 – 286, ISBN 80-214-2116-9
- [12] Axman V., Možnosti využití moderních integrovaných obvodů v aktivních filtrech, závěrečná zpráva k projektu FRVŠ 1751/2002
- [13] Axman V., Diskrétní realizace elektronicky přeladitelných filtrů, závěrečná zpráva k projektu FRVŠ 1928/2002
- [14] Axman V., Tunable aktive filters with current conveyors, proceedings of the 4-th International conference of PhD students, Maďarsko, 2003, s.253 – 258, ISBN 963-661-590-X

- [15] Axman V., Device for education of parasitic influence of tuning amplifiers in tunable active filters, proceedings of conference, Applied Electronics 2003, 2003, s. 11 – 14, ISBN 80-7082-951-6
- [16] Axman V., Aktivní filtry s konvejery pro kmitočty nad 1 MHz, sborník příspěvků a prezentací, Odborné semináře 2003, REL02V, Brno, 2003, s. 1 - 20
- [17] Dostál T., Axman V., Eliptic ARC filters based on current conveyors, proceedings of conference, ERK2004, Ljubljana: IEEE, 2004, s. 57 – 60, ISBN 1581-4572
- [18] Dostál T., Axman V., Biquads Based on Single Negative Impedance Converter Implemented by Classical Current Conveyor, Radioengineering, vol. 16, no. 3, ISSN 1210-2512
- [19] Dostál T., Axman V., Current conveyor CCII with Connected Ports Y-Z, proceedings of conference, Radioelektronika 2007, Brno, 2007, s. 47 – 50, ISBN 1-4244-0821-0

# Vladimír Axman, Ing.

## Personal informations:

**First name:** Vladimír  
**Surname:** AXMAN  
**Title:** Ing.  
**Place of birth:** Boskovice, Czech Republic  
**Nationality:** Czech  
**Age:** 31  
**Address:** Gagarinova 33  
680 01, Boskovice  
Czech Republic  
**Phone:** +420 608 336 937

## Education:

- 2000 to present **Brno University of technology**
- PhD. study at Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Radio Electronics.
  - specialization: Theoretical electrical engineering.
  - Topic: “Circuits with modern active elements”.
- 1995 – 2000 **Brno University of technology (BUT)**
- undergraduate study at Faculty of Electrical Engineering and Communication (FEEC).
  - specialization: Instrument engineering.
  - work on the thesis “Measuring electronics circuits by computer”.
  - In 2000 take one’s degree and received Master of Science degree.
- 1991 – 1995 **ISŠ Jedovnice (High school)**
- specialization: Automation technology.
  - Study finished in 1995 by leaving examination.

## Abstract

PhD. thesis is deals about second order ARC filters for cascade synthesis of Active filters. Here are presented new configurations of second order filters with current conveyors usable for higher frequencies and new second order filters with current conveyors usable for electrical tunable filters. In PhD. Thesis are presented schematics and equations for new second order filters. There are presented also practical realizations of these filters and basic measure results.