

Univerzální filtr s proudovými sledovači a transkonduktančními zesilovači

Universal filter with current followers and transconductance amplifiers

Jan Jeřábek, Roman Šotner, Kamil Vrba

jerabekj@feec.vutbr.cz

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně

Abstrakt: V článku je prezentováno zapojení univerzálního kmitočtového filtru s dvěma dvouvýstupovými proudovými sledovači (DO-CF), dvěma dvouvýstupovými transkonduktančními zesilovači (BOTA) a třemi pasivními prvky. Filtr je typu SIMO a disponuje nízkoimpedančním vstupním uzlem a vysokoimpedančními výstupy. V článku jsou zahrnuty výsledky simulací s behaviorálním modelem prvku UCC-N1B 0520 a makromodelem obvodu OPA861.

Abstract: Universal filter with two dual-output current follower (DO-CF), two transconductance amplifiers (OTAs) and three passive elements is presented in this paper. Filter is single-input multiple-output (SIMO) type and operates in the current mode. Our solution utilizes low-impedance input node and high-impedance outputs. Paper contains simulation results that were obtained with help of behavioral model of the UCC-N1B 0520 element and OPA861 macromodel.

UNIVERZÁLNÍ FILTR S PROUDOVÝMI SLEDOVAČI A TRANSKONDUKTANČNÍMI ZESILOVAČI

Jan Jeřábek¹, Roman Šotner², Kamil Vrba¹

¹Ústav telekomunikací, ²Ústav radioelektroniky

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně. Purkyňova 118, Brno

Email: jerabekj@feec.vutbr.cz

Abstrakt – V článku je prezentováno zapojení univerzálního kmitočtového filtru s dvěma dvouvýstupovými proudovými sledovači (DO-CF), dvěma dvouvýstupovými transkonduktančními zesilovači (BOTA) a třemi pasivními prvky. Filtr je typu SIMO a disponuje nízkoimpedančním vstupním uzlem a vysokoimpedančními výstupy. V článku jsou zahrnuty výsledky simulací s behaviorálním modelem prvku UCC-N1B 0520 a makromodelem obvodu OPA861.

Klíčová slova – DO-CF, BOTA, univerzální filtr, proudový mód, SIMO filtr

1. ÚVOD

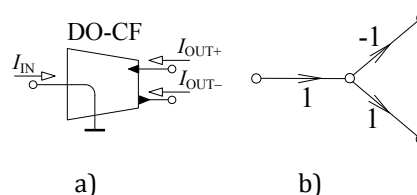
Návrh kmitočtových filtrů v proudovém módu [1] s různými typy aktivních prvků přitahuje neustále pozornost. Jako aktivní prvky filtračních zapojení se využívá celá řada prvků, od jednoduchých proudových sledovačů (CF) [2], [3], přes dvou a vícevýstupové proudové sledovače (DO-CF, MO-CF) [4], [5], dále OTA zesilovače, většinou ve formě OTA-C filtrů [6], [7], proudové konvejory různých generací (CC) [8], [9] až po aktivní prvky, které vznikly kombinací dvou jednodušších bloků, jako jsou např. Current Differencing Transconductance Amplifier (CDTA) [10] – [12], který je složen s diferenčního proudového sledovače a transkonduktančního zesilovače a konečně Current Follower Transconductance Amplifier (CFTA) [13], [14], který se skládá pouze s proudového sledovače a opět transkonduktančního zesilovače.

Z citované literatury je možné rozpoznat dva základní trendy. Prvním je návrh složitějších filtračních struktur s jednoduššími aktivními prvky, např. v [2]. Druhý přístup představuje opak, tedy návrh jednoduchých filtračních struktur se složitějšími aktivními prvky, typicky [11]. V druhém případě pak schéma filtrační struktury vypadá jednodušeji než v prvním, jelikož se v obvodu nachází nižší počet aktivních prvků. Použití složitějších prvků však omezuje variabilitu řešení při návrhu nových struktur a také výrazně zesložituje a prodražuje návrh a vývoj čipu. Kombinace proudových sledovačů a transkonduktančních zesilovačů je pro návrh filtračních struktur pracujících v proudovém módu velmi výhodná, jak se ukázalo v [10] – [14], proto se této variantě věnuje i tento článek. Přístup je však odlišný než v literatuře, pracujeme s dílčími bloky, konkrétně DO-CF a BOTA. To přináší možnost větší variability řešení a snadné dosažení univerzálního řešení. Výhody prezentovaného zapojení spočívají především v jednoduchosti (v obvodu se vyskytuje pouze jedna uzavřená smyčka), univerzálnosti (dosažitelné jsou všechny typy filtračních funkcí), nízké relativní citlivosti na všechny parametry obvodu a také řiditelnosti. Prezentované zapojení je typu Single Input Multiple Output (SIMO), což přináší výhodu jednotné

pozice vstupní svorky, která je navíc nízkoimpedanční, a všechny výstupy jsou vysokoimpedanční. Všechny pasivní součástky jsou uzemněny. Tyto vlastnosti vytvářejí dobré předpoklady pro využití prezentovaného zapojení.

2. POUŽITÉ AKTIVNÍ PRVKY

Prezentovaný filtr pracuje s dvěma typy aktivních prvků. Prvním z nich je dvouvýstupový proudový sledovač DO-CF (Dual-Output Current Follower). Schematická značka a zjednodušený M-C graf jsou znázorněny na Obr. 1.



Obr. 1: a) Schematická značka Dual-Output Current Follower (DO-CF) b) Zjednodušený M-C graf obvodu

Prvek DO-CF je v současné době možné realizovat pro účely simulace a měření několika způsoby. Nejjednodušší je využití univerzálního proudového konveje (UCC) [15], který je možné snadno zapojit jako dvou nebo vícevýstupový proudový sledovač [16]. Pomocí jednoho čipu UCC-N1B 0520 lze realizovat dva prvky DO-CF. Chování prvku DO-CF je popsáno jednoduchými rovnicemi

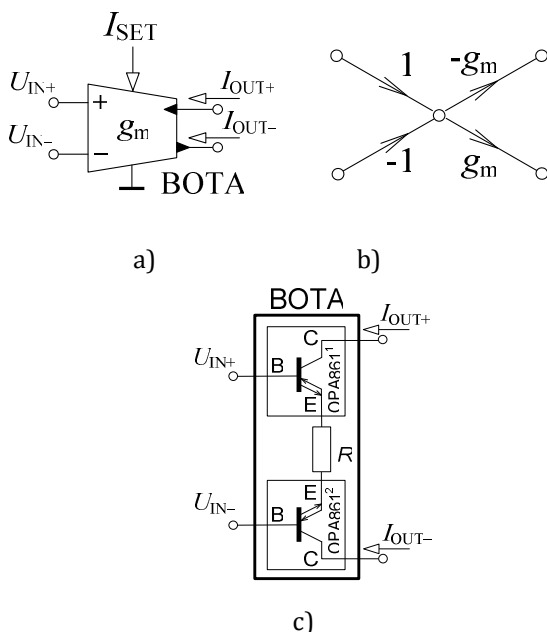
$$I_{OUT+} = -I_{OUT-} = I_{IN}. \quad (1)$$

Druhým použitým blokem je dvouvýstupový transkonduktanční zesilovač BOTA (Balanced Operational Transconductance Amplifier). Schematická značka a zjednodušený M-C graf jsou znázorněny na Obr. 2.

Mezi dvou-výstupové transkonduktanční zesilovače dostupné na trhu patří obvod MAX435 [17]. Tento obvod však nedisponuje potřebnými parametry na vysokých kmitočtech. Proto je výhodnější vytvořit BOTA prostřednictvím struktury na Obr. 2c. Zapojení je složeno ze dvou prvků OPA861 [18] a rezistoru, který umožňuje

nastavení transkonduktance g_m prvku BOTA. Vztahy popisující chování prvku BOTA jsou

$$I_{OUT+} = -I_{OUT-} = g_m(U_{IN+} - U_{IN-}). \quad (2)$$



Obr. 2: a) Schematická značka Balanced Operational Transconductance Amplifier b) Zjednodušený M-C graf obvodu c) Struktura vytvářející prvek BOTA z jednovýstupových OTA prvků

3. NAVRŽENÉ ZAPOJENÍ

Cílem návrhu byla struktura realizující univerzální filtr druhého řádu s minimálním počtem pasivních prvků a pouze jednou smyčkou obvodu. Možné struktury byly analyzovány metodou signálových grafů a jedno z dostupných řešení je naznačeno na Obr. 3a. Zjednodušený M-C graf obvodu je znázorněn na Obr. 3b. Obvod obsahuje dva prvky DO-CF a dva prvky BOTA. Mezi DO-CF a BOTA je vždy uzel, kde jsou připojeny pasivní prvky, které jsou svým druhým pólem uzemněny.

Přenosové funkce obvodu jsou dány vztahy:

$$\frac{I_{IDP}}{I_{VST}} = -\frac{g_{m1}g_{m2}}{D}, \quad \frac{I_{PP}}{I_{VST}} = \frac{pC_2G_1}{D}, \quad (3, 4)$$

$$\frac{I_{iHP}}{I_{VST}} = \frac{I_{iHP} + I_{iPP} + I_{PP}}{I_{VST}} = -\frac{p^2C_1C_2}{D}, \quad (5)$$

$$\frac{I_{iPZ}}{I_{VST}} = \frac{I_{iHP} + I_{iPP} + I_{PP} + I_{IDP}}{I_{VST}} = -\frac{p^2C_1C_2 + g_{m1}g_{m2}}{D}, \quad (6)$$

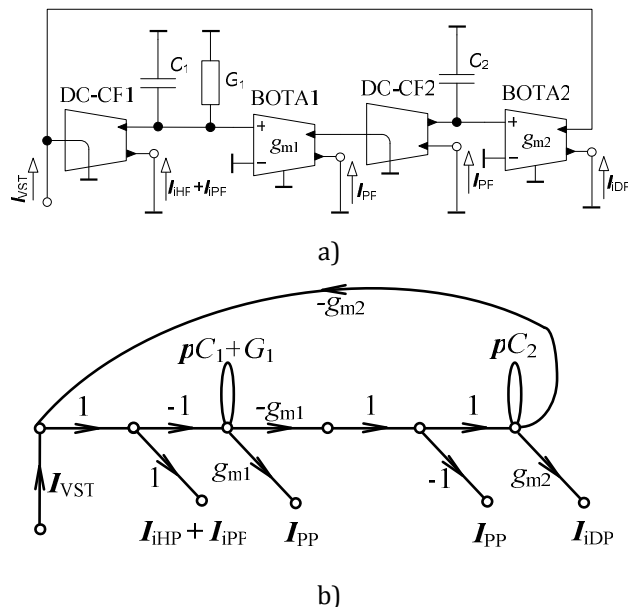
$$\frac{I_{iFC}}{I_{VST}} = \frac{I_{iHP} + I_{iPP} + I_{PP} + I_{IDP}}{I_{VST}} = -\frac{p^2C_1C_2 - pC_2G_1 + g_{m1}g_{m2}}{D}, \quad (7)$$

kde

$$D = p^2C_1C_2 + pC_2G_1 + g_{m1}g_{m2} = 0. \quad (8)$$

Rovnice (5)–(7) platí za předpokladu, že $G_1 = g_{m1}$.

Z přenosových funkcí (3)–(7) je patrné, že filtr je univerzální. V případě filtru typu PP lze změnou G_1 nastavovat činitel jakosti.



Obr. 3: a) Navržený univerzální filtr s jednou smyčkou obvodu b) zjednodušený M-C graf obvodu

4. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Jestliže vezmeme v potaz všechny přenosové koeficienty, které se v obvodu vyskytují, pak charakteristická rovnice přejde na tvar

$$D = p^2C_1C_2 + pC_2G_1 + g_{m1}g_{m2}\beta_p\beta_n = 0, \quad (9)$$

kde dle [5] je β_p je označení pozitivního přenosu prvku DO-CF1 a β_n negativního přenosu prvku DO-CF2 v jediné smyčce obvodu.

Skutečný úhlový kmitočet a činitel jakosti jsou vyjádřeny vztahy

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}\beta_p\beta_n}{C_1C_2}}, \quad Q = \frac{1}{G_1} \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}\beta_p\beta_n C_1}{C_2}}. \quad (10, 11)$$

Citlivosti mezního kmitočtu a činitele jakosti na jednotlivé komponenty jsou rovny

$$S_{G_1}^{a_0} = 0, \quad S_{G_1}^Q = -1, \quad (12, 13)$$

$$S_{\beta_p}^{a_0} = S_{\beta_n}^{a_0} = S_{g_{m1}}^{a_0} = S_{g_{m2}}^{a_0} = 0.5, \quad (14)$$

$$S_{C_1}^{a_0} = S_{C_2}^{a_0} = S_{C_2}^Q = -0.5, \quad (15)$$

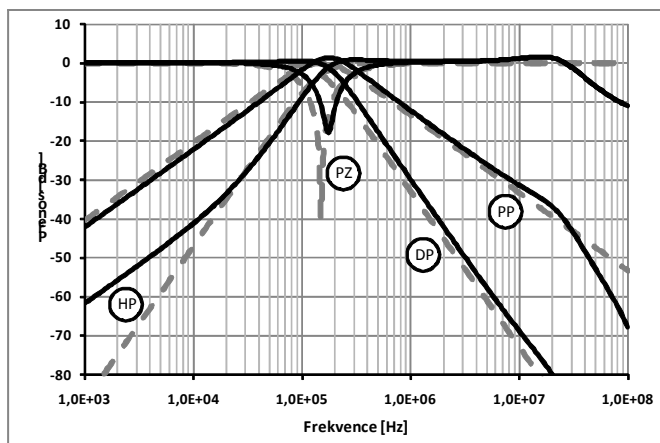
$$S_{\beta_p}^Q = S_{\beta_n}^Q = S_{g_{m1}}^Q = S_{g_{m2}}^Q = S_{C_1}^Q = 0.5. \quad (16)$$

Z předcházejícího vyjádření je patrné, že všechny citlivosti jsou nízké.

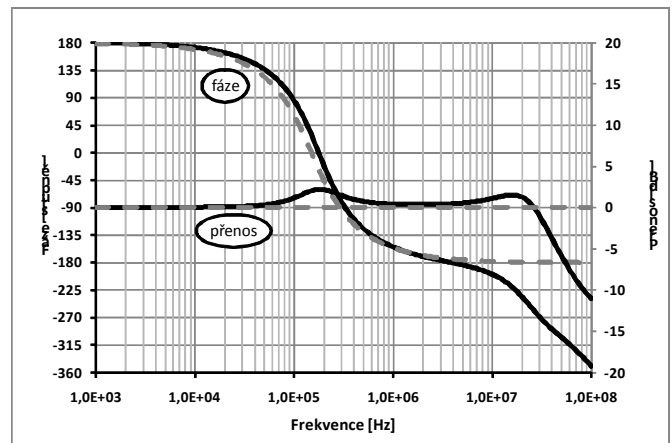
5. VÝSLEDKY SIMULACE

Numerické parametry filtru byly navrženy následujícím způsobem: $f_0 = 150$ kHz, $Q = 0,707$ (Butterworthova aproximace), $G_1 = g_{m1} = g_{m2} = 1$ mS. Dopočítané hodnoty kondenzátorů jsou rovny $C_1 = QG_1/\omega = 750$ pF, $C_2 = (g_{m1}g_{m2})/(C_1\omega^2) = 1,5$ nF. Pro účely simulace byly využity behaviorální modely UCC-N1B třetí úrovně [19] a makromodel od výrobce OPA861 [18]. Tyto modely umožňují velmi věrně ověřit očekávané vlastnosti navrženého filtru.

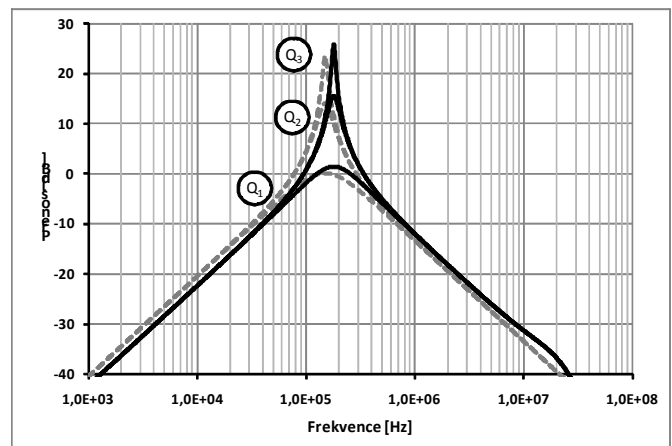
První graf (Obr. 4) obsahuje modulové charakteristiky filtrů typu HP, PZ, DP a PP pro zvolený mezní kmitočet a činitel jakosti. Teoretické průběhy jsou značeny čárkovaně, výsledky simulace v Pspice plnou čarou. Průběhy poměrně dobře vzájemně korespondují, odlišnosti na vyšších kmitočtech jsou dány především menší šířkou pásma obvodu UCC. Na Obr. 5 je vykreslena fázová a modulová charakteristika filtru typu FČ. Průběhy jsou opět v poměrně dobré shodě, pouze na vyšších kmitočtech se projevuje opět menší šířka pásma univerzálního prvku UCC. Graf na Obr. 6 obsahuje modulové charakteristiky filtru typu PP pro tři různé činitele jakosti ($Q_1 = 0,7$; $Q_2 = 3,5$; $Q_3 = 10,6$). Přeladění bylo docíleno změnou hodnoty $R_1 = 1/G_1$, odpovídající hodnoty odporu, kterým byla změna realizovaná, jsou {1, 5, 15} kΩ. Z tohoto grafu je dobře patrný mírný posun mezního kmitočtu, který je zapříčiněn mírně vyššími skutečnými hodnotami transkonduktance g_{m1} a g_{m2} . Změna přenosu je zapříčiněna porušením rovnosti $G_1 = g_{m1}$, při změně činitele jakosti filtru. Poslední graf (Obr. 7) zobrazuje přeladění mezního kmitočtu u filtru typu DP, které bylo docíleno současnou změnou g_{m1} a g_{m2} . Třem mezním kmitočetům ($f_1 = 150$ kHz; $f_2 = 473$ kHz; $f_3 = 1,5$ MHz) odpovídají transkonduktance {1; 3,16; 10} mS.



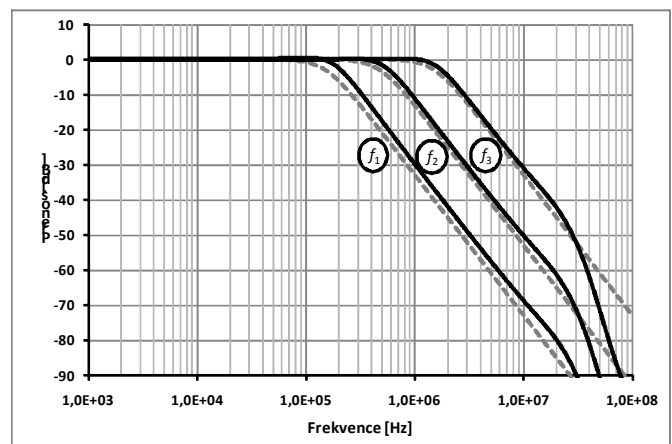
Obr. 4: Modulové charakteristiky DP, HP, PP a PZ – čárkovaně teoretické průběhy, plná čára simulace



Obr. 5: Přenos a fáze fázovacího článku – čárkovaně teoretické průběhy, plná čára simulace



Obr. 6: Tři různé činitele jakosti u funkce typu PP ($Q_1 = 0,7$; $Q_2 = 3,5$; $Q_3 = 10,6$) – čárkovaně teoretické průběhy, plná čára simulace



Obr. 7: Tři různé mezní kmitočty u funkce typu DP ($f_1 = 150$ kHz; $f_2 = 473$ kHz; $f_3 = 1,5$ MHz) – čárkovaně teoretické průběhy, plná čára simulace

6. ZÁVĚR

V článku byl představen filtr s celkem čtyřmi jednoduchými aktivními prvky a třemi pasivními součástkami. Filtr je především univerzální, jeho struktura je jednoduchá, jak bylo ukázáno, je možné řídit činitel jakosti u filtru typu PP. Filtr je typu SIMO s nízkoimpedančním vstupem a vysokoimpedančními výstupy. Navržená struktura není typu OTA-C, jelikož je v obvodu přítomen i jeden rezistor. Jeho vhodné umístění umožňuje vytvoření filtrační struktury pouze s jednou uzavřenou smyčkou a s možností ladění činitele jakosti. Simulacemi s kvalitními modely byly ověřeny vlastnosti u všech filtračních funkcí včetně fázovacího článku a také změna činitele jakosti a přeladění mezního kmitočtu. Výsledky simulací prokazují poměrně dobré vlastnosti navržené struktury.

PODĚKOVÁNÍ

Vznik tohoto článku byl podpořen projekty Grantové agentury České republiky č. 102/09/1681, č. 102/08/H027, výzkumným projektem Ministerstva školství, č. MSM 0021630513 a projektem Ministerstva školství č. OC09016, který je součástí COST Action IC0803.

LITERATURA

- [1] C. Toumazou, F. J. Lidgley, D. G. Haigh, *Analogue IC design: the current-mode approach*, Institution of Electrical Engineers, London, 1996.
- [2] R. Senani, S. S. Gupta, „New universal filter using only current followers as active elements“, *Int J Electronics and Communications (AEU)*, vol. 60, no. 3, pp. 251-256, 2006.
- [3] S. S. Gupta, R. Senani, „New voltage-mode/current-mode Universal biquad filter using unity gain cells“, *International Journal of Electronics (UK)*, Vol. 93, No. 11, pp. 769-775, 2006.
- [4] J. Jerábek, K. Vrba, „Novel Universal Filter Using Only Two Current Active Elements“, In *Proc of Third Int Conf on Systems (ICONS'08)*, IEEE Computer Society, Cancun, pp. 285-289, 2008.
- [5] W. Tangsrirat, D. Prasertsom, „Electronically tunable low-component-count current-mode biquadratic filter using dual-output current followers“, *Electrical Engineering – Original Paper*, Springer Berlin/Heidelberg, 2006.
- [6] M. T. Abuelma'atti, A. Bentrchia, „A novel mixed-mode OTA-C universal filter“, *Int J of Electronics*, Vol. 92, No. 7, pp. 375-383, 2005.
- [7] T. Tsukutani, Y. Sumi, Y. Fukui, „Electronically tunable current-mode OTA-C biquad using two-integrator look structure“, *Frequenz*, Vol. 60, No. 3-4, pp. 53-56, 2006.
- [8] W. Tangsrirat, „Current-tunable current-mode multifunction filter based on dual-output current-controlled conveyors“, *Int J of Electronics and Communications (AEU)*, Vol. 61, No. 8, pp. 528-533, September 2007.
- [9] N. Herencsar, K. Vrba, „Current conveyors-based circuits using novel transformation method“, *IEICE Electronics Express*, Vol. 4, No. 21, pp. 650-656, November 2007.
- [10] M. Siripruchyanun, W. Jaikla, „CMOS current-controlled current differencing transconductance amplifier and applications to analog signal processing“, *Int J of Electronics and Communications (AEU)*, Vol. 62, No. 4, pp. 277-287, 2008.
- [11] M. Siripruchyanun, W. Jaikla, „Realization of Current Controlled Current Differencing Transconductance Amplifier (CCCDTA) and Its Applications“, *ECTI Trans on Electrical Eng., Electronics, and Comm.*, Vol. 5, No. 1, pp. 41-50, 2007.
- [12] N. A. Shah, M. Quadri, S. Z. Iqbal, „CDTA based universal transadmittance filter“, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, Vol. 52, No. 1-2, pp. 65-69, 2007.
- [13] N. Herencsar, J. Koton, K. Vrba, I. Lattenberg, „Novel SIMO type current-mode universal filter using CFTAs and CMIs“, in *Proc. 31th International Conference on Telecommunications and Signal Processing – TSP 2008*, Paradfurdo, Hungary, pp. 107-110, 2008.
- [14] N. Herencsar, J. Koton, K. Vrba, J. Misurec, „A Novel Current-Mode SIMO Type Universal Filter Using CFTAs“, *Contemporary Engineering Sciences*, Vol. 2, No. 2, pp. 59-66, 2009.
- [15] J. Jerábek, K. Vrba, „SIMO type low-input and high-output impedance current-mode universal filter employing three universal current conveyors“, *Int J Electronics and Communications (AEU)*, vol. 64, in press, 2010.
- [16] J. Jeřábek, J.; K. Vrba. Říditelný univerzální filtr s vícevýstupovými proudovými sledovači. *Elektrorevue*, 2008, roč. 2008, č. 35, s. 1-9.
- [17] Maxim – MAX435-MAX436 – Wideband Operational Transconductance Amplifiers (datasheet). Dostupné online, citováno 30.12.2009. <<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX435-MAX436.pdf>>.
- [18] Texas Instruments – OPA861 – Wide Bandwidth Operational Transconductance Amplifier (OTA) (datasheet). Dostupné online, citováno 30.12.2009. <<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/opa861.html>>.
- [19] R. Sponar, K. Vrba, „Measurements and behavioral modeling of modern conveyors“, *Int J Computer Science and Network Security*, Vol. 2006, No. 6, pp. 57-65, 2006.