

# ANALOGOVĚ-ČÍSLICOVÁ EMULACE OBVODOVÝCH PRVKŮ

Zdeněk Kolka<sup>1</sup>, Dalibor Biolek<sup>2,3</sup>, Viera Biolková<sup>1</sup>, Jan Vorálek<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ústav radioelektroniky; Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, {kolka, biolkova}@feec.vutbr.cz

<sup>2</sup>Katedra elektrotechniky; Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany, Brno, dalibor.biolek@unob.cz

<sup>3</sup>Ústav mikroelektroniky; Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně

## Abstrakt

Článek pojednává o emulaci analogových dvojpólových obvodových prvků s využitím smyčky s číslicovým zpracováním signálu. Emulátor je možné využít k provádění obvodových experimentů za situace, kdy fyzická součástka není dostupná či dokonce vůbec neexistuje. Mikrokontrolér měří svorkové napětí nebo proud a dopočítává hodnotu proudové nebo napěťové odezvy. V návaznosti na náš předchozí výzkum článek analyzuje emulátor se zdrojem proudu řízeným napětím pro emulaci rezistivních a induktivních prvků. Je navržena nová konfigurace pro rezistivní prvky, která rozšiřuje oblast stability. Je též navržena číslicová kompenzace parazitního vlivu rekonstrukčního filtru a aperturového zesílení DA převodníku pro rezistivní a induktivní systémy.

Klíčová slova: systém se spojitým časem, systém s diskretním časem, emulátor, emulace, mem-prvky.

## Abstract

The paper deals with the emulation of two-terminal analog circuit elements using digital signal processing inside the loop. Such device can be used for performing circuit experiments when a physical part is not available or even discovered. A microcontroller measures terminal voltage or current and computes current or voltage response. Based on our previous work, the paper analyzes the emulator with voltage-controlled current source for emulating resistive and inductive devices. A new configuration for resistive systems is proposed, which extends the region of stable operation. A digital compensation of parasitic effects of the smoothing filter and zero-order-hold effect of D/A converter is presented both for the resistive and inductive systems.

Keywords: continuous-time system, discrete-time system, emulator, emulation, mem-devices.

## 1 Úvod

Zájem vědecké komunity o memristory [1], který prudce vzrostl po roce 2008, vyvolal mimo jiné potřebu provádět nejenom simulace, ale i reálné obvodové experimenty. Avšak ani v současné době není technologie výroby memristorů dostatečně vyspělá, takže tyto prvky jsou dostupné jen částečně, a to ve formě experimentálních vzorků. Kromě memristorů byly předpovězeny memkapacity, meminduktory [2] a další zobecnělé prvky [3] z Chuovy periodické tabulky [4], které slibují nové aplikace v oblasti neuromorfních systémů a netradičních metod analogového zpracování signálu. Tyto prvky nejsou zatím dostupné vůbec.

Nedostatek reálných prvků vyvolal zájem o tzv. emulátory [5], což jsou analogové nebo analogově-číslicové dvojpóly, které s dostatečnou přesností generují charakteristiky reálných prvků, a kromě provádění samotných experimentů mohou sloužit i jako učební pomůcka.

Již byla publikována řada obvodových řešení emulátorů, k nimž patří jednoúčelové analogové emulátory memristorů [6], memkapacitorů [7] i meminduktorů [8]. Emulátory založené na mutátorech [9] jsou univerzálnější, neboť transformují nelineární ampérvoltovou charakteristiku rezistoru do formálně stejné charakteristiky náboj-tok memristoru. Stejný princip je možné využít i pro memkapacity a meminduktory [10]. Společná nevýhoda všech analogových emulátorů spočívá v omezených možnostech jak z hlediska složitosti implementované dynamiky, tak i z hlediska opakovatelné nastavitelnosti parametrů.

Aplikace číslicových obvodů byla poprvé navržena u emulátoru plovoucího memristoru [11], který využívá číslicově řízený potenciometr ve funkci reostatu, jehož odpor je

nastavován mikroprocesorem na základě naprogramovaného algoritmu. Tento princip je však možné použít pouze k emulaci memristivních systémů. V práci [12] jsme navrhli univerzální emulátor obecného systému založený na kombinaci mikrokontroléru s AD a DA převodníky s řízeným zdrojem napětí nebo proudu. Tento emulátor je označený jako hybridní, protože kombinuje analogové rozhraní s mikrokontrolérem pro číslicové zpracování signálu. Emulátor může být konfigurován jako napětím řízený zdroj proudu nebo proudem řízený zdroj napětí s číslicovým řídicím algoritmem.

Ačkoli je možné hybridní emulátor naprogramovat tak, aby realizoval libovolný systém, existují jistá fundamentální omezení, která byla identifikována v pracích [13] a [14]. Analýza stability ukázala, že induktivní či meminduktivní prvky je možné emulovat pouze pomocí řízeného zdroje proudu, memkapacitní prvky naopak jenom řízeným zdrojem napětí a rezistivní prvky pomocí obou typů zdrojů při uplatnění jistých omezení.

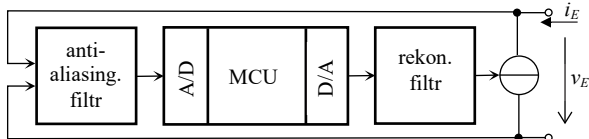
Tento článek se zabývá problematikou charakteristik emulovaných prvků. V návaznosti na výsledky [13] a [14] je navrženo nové řešení pro uvolnění omezujících podmínek při emulaci rezistivních prvků. Dále je navržena jednoduchá číslicová kompenzace omezující vliv DA převodníku a rekonstrukčního filtru na charakteristiky rezistivních a induktivních systémů. Získané výsledky mohou být přímo aplikovány i na duální emulaci kapacitních systémů využívající řízeného zdroje napětí. Pro počítačovou analýzu uvedeného analogově-číslicového systému byl vytvořen specializovaný modul pro simulátor Ngspice.

Kapitoly 2 a 3 obsahují analýzu rezistivního a induktivního systému. Kapitola 4 pak obsahuje výsledky simulací a experimentů.

## 2 Emulace rezistivních prvků

### 2.1 Oblast stability

Uvažujme základní uspořádání na **obr. 1** pro emulaci rezistivních prvků v konfiguraci se zdrojem proudu.



**Obr. 1.** Emulátor jako zdroj proudu řízený napětím s číslicovým zpracováním signálu.

Napětí  $v_E$  mezi svorkami emulátoru je periodicky vzorkováno AD převodníkem a mikrokontrolér (MCU) vypočítává požadovanou hodnotu proudu  $i_E$ . Vlastnosti emulovaného prvku budou zkoumány na jednoduchém rezistoru. Předpokládá se, že při emulaci komplexního systému (např. memristoru), se odpor mění pomalu ve srovnání s procesem vzorkování.

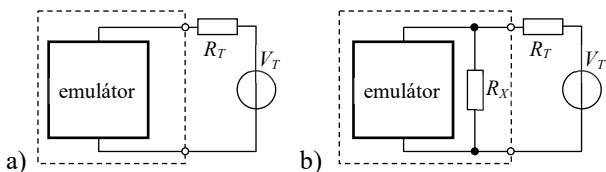
V případě rezistoru bude realizována konstituční rovnice ve tvaru

$$i_E = v_E / R_E, \quad (1)$$

kde  $R_E$  je emulovaný odpor. Hodnota požadovaného proudu  $i_E$  je na proudovém zdroji nastavena napětím z výstupu DA převodníku. S uvažováním jednotkových přenosů analogových obvodů na vstupu AD převodníku a výstupu DA převodníku bude diskretní přenosová vodivost řízeného zdroje proudu realizovaná v MCU v nejjednodušším případě

$$G_E(z) = \frac{1}{R_E}. \quad (2)$$

Uvažujme emulátor zapojený do lineárního aplikačního obvodu, jehož Théveninův ekvivalent ( $R_T$ ,  $V_T$ ) je čistě rezistivní, jak je ukázáno na **obr. 2a**.



**Obr. 2.** a) Emulátor v aplikačním obvodu; b) emulátor s kompenzačním rezistorem.

Nastavení nové hodnoty na DA převodníku vyvolá změnu napětí  $v_E$ , kterou v dalším taktu navzorkuje AD převodník. To vytváří smyčku kombinující bloky se spojitým a diskretním časem, která musí být stabilní.

V [13] a [14] byla analyticky odvozena podmínka stability obvodu na **obr. 2a** za předpokladu použití rekonstrukčního filtru prvního řádu a vynechání antialiasingového filtru. Pokud je výpočetní čas MCU zanedbatelný vůči vzorkovací periodě, pak je smyčka stabilní za podmínky

$$-1 < \frac{R_T}{R_E} < \frac{1+\alpha}{1-\alpha}, \quad (3)$$

kde

$$\alpha = e^{-\omega_0 T_s}. \quad (4)$$

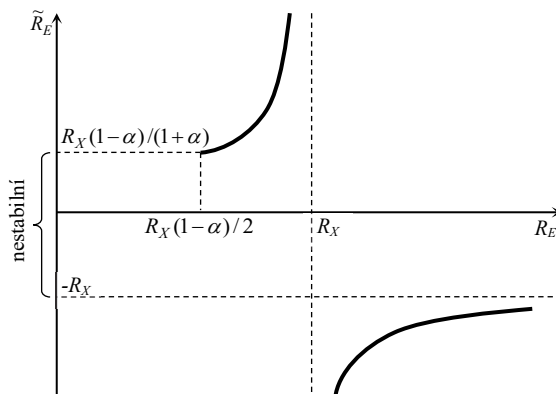
$T_s$  je vzorkovací perioda a  $\omega_0$  je mezní kmitočet rekonstrukčního filtru. Pokud předpokládáme kladné hodnoty  $R_T$ , pak je proces emulace stabilní za splnění podmínky  $R_E < -R_T$  nebo  $R_E > R_T(1-\alpha)/(1+\alpha)$ . Realistická volba  $\omega_0 = 1/T_s$ , tj. ( $\tau = T_s$ ), vede na  $\alpha = 0,368$  a druhá podmínka bude číselně  $R_E > 0,462 R_T$ . Pro konfiguraci emulátoru se zdrojem napětí platí výsledek (3) symetricky [13].

Podmínka (3) značně omezuje aplikační potenciál emulátoru. Avšak je možné využít stabilní oblast pro záporné emulované odpory v zapojení podle **obr. 2b**. Přídavný kompenzační rezistor  $R_X$  je zapojený paralelně k výstupu zdroje proudu.

Označme nyní symbolem  $R_E$  požadovanou hodnotu emulovaného odporu mezi vnějšími svorkami. Pak interně emulovaný odpor  $\tilde{R}_E$  bude

$$\tilde{R}_E = \frac{1}{1/R_E - 1/R_X}. \quad (5)$$

Oblast stability pro libovolnou kladnou hodnotu  $R_T$  je naznačena na **obr. 3**. Vodorovná osa reprezentuje požadovaný emulovaný odpor a svislá osa odpor  $\tilde{R}_E$  nastavený v MCU.



**Obr. 3.** Oblast stabilní emulace pro  $R_T \in (0; \infty)$ .

### 2.1 Číslicová kompenzace

Kombinace bloků se spojitým a diskretním časem ovlivňuje charakteristiky emulovaného prvku. V nejjednodušším případě bude přenosová funkce rekonstrukčního filtru  $1/(1+p\tau)$ . Navíc je vliv rekonstrukce signálu v DA převodníku pomocí schodovité funkce ekvivalentní další dolní propusti s přenosovou funkcí [15]

$$G_{ZOH}(p) = \frac{1 - e^{-pT_s}}{pT_s}. \quad (6)$$

Uvažujme přenosovou admitanci zdroje proudu řízeného napětím v emulátoru v oblasti komplexní frekvence ve tvaru

$$Y_E(p) = \frac{1}{R_E} G_P(p), \quad (7)$$

kde  $G_P(p)$  představuje všechny parazitní vlivy.

Pokud zvolíme mezní frekvenci rekonstrukčního filtru  $\omega_0 < 1/T_s$ , což zajistí dostatečnou filtraci schodovitého signálu na výstupu DA převodníku, bude dynamika emulovaného

systemu určena dominantně rekonstrukční dolní propustí, tj.  $G_p \approx 1/(1+p\tau)$ , a komplexní emulovaná impedance bude

$$Z_E(p) = 1/Y_E(p) \approx R_E(1+p\tau). \quad (8)$$

Je vhodné využít rekonstrukční filtr nízkého řádu, protože pak dostáváme jednodušší ekvivalentní model pro emulovanou impedanci. V případě filtru prvního řádu představuje impedance (8) sériovou kombinaci rezistoru  $R_E$  a parazitního induktoru.

Parazitní funkci  $G_p(p)$  v (7) je možné do jisté míry kompenzovat v diskretní oblasti za cenu jistého zvýšení výpočetní náročnosti. V případě funkce (8) je nutné násobit (2) diskretní aproximací výrazu  $(1+p\tau)$ . Použijeme-li techniku „sladěných nul“ [15], pak diskretní přenosová funkce s kompenzací bude

$$\tilde{G}_E(z) = \frac{1}{R_E} \frac{1+d z^{-1}}{1+d}, \quad (9)$$

kde nulový bod  $d$  s teoretickou hodnotou  $-e^{-T_s/\tau}$  slouží jako optimalizační parametr. V kapitole 4 je ukázán příklad využití.

### 3 Emulace induktivních prvků

Uvažujme emulaci induktoru  $L_E$  v konfiguraci s řízeným zdrojem proudu na obr. 1. Konstituční rovnici induktoru

$$i = i(0) + \frac{1}{L_E} \int_0^t v(\tau) d\tau \quad (10)$$

je možné diskretizovat za použití bilineární transformace

$$G_E(z) = \frac{T_s}{2L_E} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}. \quad (11)$$

Uvažujme emulovaný induktor zapojený do rezistivního obvodu podle obr. 2a. Metodou podle [13] nebo [14] je možné dojít k podmínce stability

$$\frac{T_s}{L_E/R_T} < 1, \quad (12)$$

ze které vyplývá, že časová konstanta, kterou vytváří emulovaný induktor s vnějším obvodem, musí být větší než vzorkovací perioda. Podmínka (12) nepředstavuje praktické omezení, neboť je žádoucí, aby emulovaný systém měl pomalejší dynamiku než vzorkovací proces.

Zopakujeme-li postup z kapitoly 2.2, dostáváme přibližný výraz pro impedanci emulovaného induktoru

$$Z_E \approx pL_E(1+p\tau) = pL_E + p^2\tau L_E, \quad (13)$$

ktej představuje sériovou kombinaci induktoru o indukčnosti  $L_E$  a dvojného induktoru.

Pro kompenzaci členu  $1/(1+p\tau)$  by skutečně emulovaná impedance měla mít tvar

$$\tilde{Y}_E(p) = \frac{1}{pL_E}(1+p\tau) = \frac{1}{pL_E} + \frac{\tau}{L_E}, \quad (14)$$

ktej vede na korigovanou diskretní přenosovou funkci

$$\tilde{G}_E(z) = \frac{T_s}{2L_E} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} + h \frac{\tau}{L_E} \quad (15)$$

s parametrem  $h$  ponechaným pro optimalizaci, neboť uvedený postup zanedbává aperturové zkreslení (6). V kapitole 4 je uveden příklad použití (15).

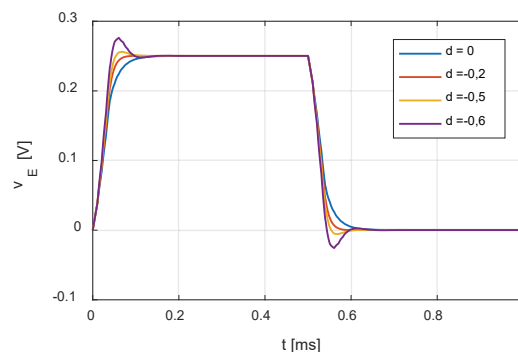
## 4 Simulace a experimenty

### 4.1 Rezistivní systém

Prezentované simulace byly prováděny za použití Ngspice [16], což je volně dostupný simulátor pro smíšené systémy založený na Spice3f5 a Xspice. Dovoluje simulovat analogové obvody spolu s bloky s diskretním časem, které mohou být navíc vytvořeny jako uživatelské moduly napsané v jazyku C. Vyvinutý modul reprezentuje MCU s AD a DA převodníky s analogovým vstupem i výstupem, jehož činnost je vyvolávána v násobcích vzorkovací periody. Výstup je aktualizován po uplynutí definovaného zpoždění  $T_c$ , které reprezentuje výpočetní čas MCU a zpoždění v převodnicích. Zdrojový kód modulu zahrnuje algoritmus skutečně použitý v MCU emulátoru [12] včetně volitelného kvantování.

Emulovaný rezistor byl testovaný v zapojení podle obr. 2b s následující sadou parametrů:  $R_T = 6 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_X = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $T_s = 10 \text{ }\mu\text{s}$ ,  $T_c = 1 \text{ }\mu\text{s}$ . Mezní frekvence rekonstrukčního filtru byla  $\omega_0 = 1/T_s$ .

Obr. 4 ukazuje odezvu děliče, tj. napětí  $v_E$ , na obdélníkové budící napětí s kmitočtem 1 kHz, výškou pulsu 1 V a délkou hran 40  $\mu\text{s}$ . Parametr  $d$  v (9) byl krokovan od 0 do -0,6. Odezva je stabilní a jasně ukazuje vliv číslicové (před)kompenzace.



Obr. 4. Odezva děliče s emulovaným rezistorem na obdélníkové napětí.

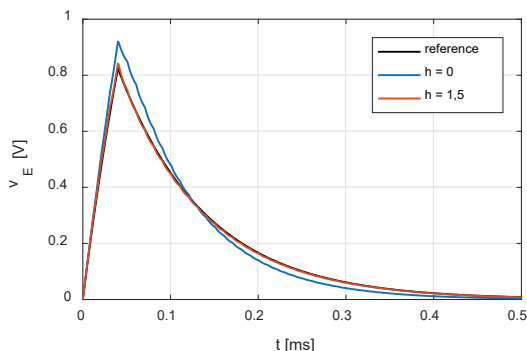
### 4.2 Induktivní systém

Emulovaný induktor byl testovaný v zapojení podle obr. 2a s následujícími parametry:  $R_T = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $L_E = 0,1 \text{ H}$ ,  $T_s = 10 \text{ }\mu\text{s}$ ,  $T_c = 1 \text{ }\mu\text{s}$ ,  $\omega_0 = 1/T_s$ .

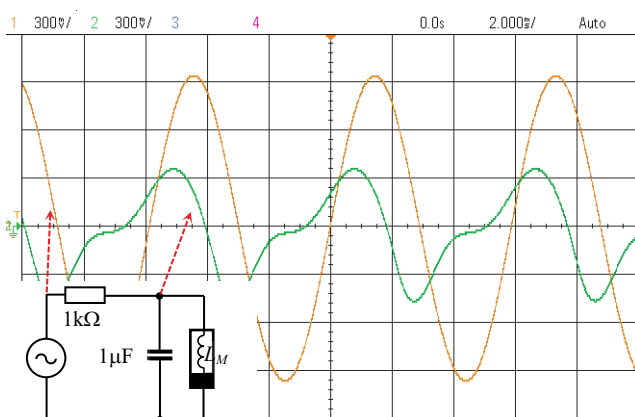
Obr. 5 ukazuje odezvu děliče R-L na první náběžnou hranu budícího obdélníkového napětí s velikostí pulsu 1V a délkou hrany 40  $\mu\text{s}$ . Referenční průběh byl získán za použití spojitého induktoru. Bez kompenzace ( $h=0$ ) se přechodový děj odchyľuje od referenčního průběhu. Kompenzační parametr  $h$  byl nastaven nad teoretickou optimální hodnotu 1 z důvodu částečné kompenzace aperturového zkreslení DA převodníku.

Vyvinuté algoritmy byly experimentálně ověřeny na hybridním emulátoru [12], ktej je založen na MCU s jádrem ARM

Cortex-M4 na kmitočtu 72 MHz s 16-bitovým AD převodníkem a 12-bitovým DA převodníkem. Emulátor pracoval v konfiguraci jako zdroj proudu podle **obr. 1**.



**Obr. 5.** Přechodný děj na emulovaném induktoru.



**Obr. 6.** Odezva rezonančního obvodu na harmonický signál 170 Hz.

Emulátor byl testován v paralelním kmitavém obvodu s kapacitorem  $1 \mu\text{F}$  a meminduktorem s prahem podle [12] s parametry:  $I_t = 0,5 \text{ mA}$ ,  $L_{high} = 400 \text{ mH}$ ,  $L_{low} = 100 \text{ mH}$ ,  $\beta = 10^6 \text{ H s}^{-1} \text{ A}^{-1}$ . Vzorkovací perioda byla nastavena na  $10 \mu\text{s}$  a časová konstanta rekonstrukčního filtru byla použita též  $10 \mu\text{s}$ . Kompenzační parametr byl nastaven na  $h = 1,5$ .

Obvod byl buzen harmonickým signálem s amplitudou  $1 \text{ V}$  a kmitočtem  $170 \text{ Hz}$  přes rezistor  $1 \text{ k}\Omega$ . **Obr. 6** ukazuje budící napětí a stabilní odezvu obvodu.

## 5 Závěry

Analogově-číslicová emulace komplexních elektronických prvků či bloků je výhodná z hlediska univerzálnosti a opakovatelnosti nastavení. Dostupnost výkonných mikrokontrolérů s nízkým příkonem dovoluje dosáhnout hranice vzorkovací rychlosti  $1 \text{ Msa/s}$  s příkonem v desítkách miliwattů. Na druhou stranu kombinace bloků se spojitým a diskretním časem vyžaduje pečlivý návrh diskretní přenosové funkce a provedení analýzy stability.

## Poděkování

Tento článek vznikl jako součást výzkumu v rámci projektu č. TA04011279 TA ČR, akce COST IC1401 za podpory grantu MŠMT s číslem LD15033 a též v rámci podpory DZRO (dlouhodobého záměru rozvoje organizace) K215 a K217 na FVT UO v Brně.

## Literatura

- [1] Chua, L. O. Memristor – The missing circuit element. *IEEE Trans. on Circuit Theory*, Sept. 1971, vol. CT-18, no. 5, pp. 507–519.
- [2] Di Ventra, M., Pershin, Y. V., Chua, L. O. Circuit elements with memory: memristors, memcapacitors, and meminductors. *Proc. of the IEEE*, 2009, vol. 97, no. 10, pp. 1717–1724.
- [3] Chua, L. O. Device modeling via basic nonlinear circuit elements. *IEEE Trans. Circ. Syst.*, 1980, vol. CAS-27, no. 11, pp. 1014–1044.
- [4] Chua, L. O. Nonlinear circuit foundations for nanodevices, Part I: The four-element torus. *Proc. of the IEEE*, 2003, vol. 91, no. 11, pp. 1830–1859.
- [5] Biolek, D. Memristor emulators. In *Memristive networks*, Springer book, New York, 2014, pp. 487–504.
- [6] Kim, H., Sah, M. Pd., Yang, C., Cho, S., Chua, L. O. Memristor emulator for memristor circuit applications. *IEEE Trans. on Circ. and Syst. I: Regular Papers*, 2012, vol. 59, no. 10, pp. 2422–2431.
- [7] Yu, D. S., Chen, H., Iu, H. H. C. Design of a practical memcapacitor emulator without grounded restriction. *IEEE Trans. on Circ. and Syst. II: Express Briefs*, 2013, vol. 60, no. 6, pp. 207–211.
- [8] Liang, Y., Chen, H., Yu, D. S. A Practical Implementation of a Floating Memristor-Less meminductor Emulator. *IEEE Trans. on Circ. and Syst. I: Regular Papers*, 2014, vol. 61, no. 5, pp. 299–303.
- [9] Biolek, D., Bajer, J., Biolková, V., Kolka, Z. Mutators for transforming nonlinear resistor into memristor. In *IEEE Int. 20th European Conf. on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, 2011, pp. 488–491.
- [10] Yu, D., Liang, Y., Iu, H. H. C., Chua, L. O. A universal mutator for transformations among memristor, memcapacitor, and meminductor. *IEEE Trans. on Circ. and Syst. II: Express Briefs*, 2014, vol. 61, no. 10, pp. 758–762.
- [11] Pershin Y. V., Di Ventra, M. Practical approach to programmable analog circuits with memristors. *IEEE Trans. on Circ. and Syst. I: Regular Papers*, vol. 57, no. 8, pp.1857–1864, 2010.
- [12] Biolek, D., Kolka, Z., Vávra, J., Doan, S. Universal Emulator of Memristive and Other Two-Terminal Devices. *International Journal of Unconventional Computing*, 2016, vol. 12, no. 4, pp. 281–302.
- [13] Kolka, Z., Biolková, V., Biolek, D. Stability of digitally emulated mem-elements. In *2015 Int. Conf. on Computing, Communication and Security (ICCCS)*, 2015, pp. 1–5.
- [14] Biolek, D., Kolka, Z., Biolková, V. Stability Testing of Hybrid DT + CT Systems. In *Proc. of the International Conference on New Trends in Signal Processing*, Slovakia: IEEE, 2016, pp. 15–18.
- [15] Yang, W. Y. *Signals and Systems with MATLAB*. Springer, 2009.
- [16] <http://ngspice.sourceforge.net>.