

MODELOVÁNÍ A INTERAKTIVNÍ ANALÝZA HP MEMRISTORU V MICRO-CAPU V. 10

Dalibor Biolek¹ - Zdeněk Biolek² – Viera Biolková³

ABSTRACT: In May 2008, a research team from Hewlett-Packard (HP) announced the design of a nano-component called memristor, the fourth fundamental passive circuit element, whose existence was predicted in 1971 by Leon Chua. Since the memristor is not currently available as off-the-shelf circuit, its models can serve as an important tool for computer experiments with this promising device. The SPICE model of HP memristor, designed by authors of this article, and the way of its implementation in the worldwide simulation program Micro-Cap, are described. This model is included in the installation package of Micro-Cap v. 10, which enables an interactive regime of the simulation of such interesting electrical component.

Key words: memristor, SPICE, modeling, simulation.

1. ÚVOD

Klasické články prof. Leona Chua z let 1971 [1] a 1974 [2], v nichž memristor je definován jako čtvrtá fundamentální součástka elektrotechniky a memristivní systém jako zobecnění memristoru, byly až do roku 2008 na okraji odborného zájmu technické komunity. Tato situace se změnila v květnu 2008, kdy byl v laboratořích HP ohlášen objev memristoru jako pasivní elektronické součástky v pevné fázi manometrických rozměrů [3]. Podle následně uskutečněných studií se pravděpodobně jedná o významný objev, neboť tato součástka, která nyní doplňuje známé pasivní součástky elektrotechniky typu rezistor, kapacitor a induktor, zřejmě v blízké budoucnosti revolučním způsobem ovlivní počítačový průmysl a akceleruje vývoj systémů, napodobujících chování živých organismů.

S přihlédnutím k tomu, že memristor je označován jako čtvrtá, nově objevená pasivní součástka, doplňující známou trojici typu R, L a C (rezistor, induktor a kapacitor), je logické požadovat, aby se knihovny modelů součástek ve všeobecně používaných simulačních programech rodiny SPICE rozrostly právě o model memristoru. V článku je popsán matematický model memristoru, vytvořený na základě fyzikálního modelu, uvedeného v [3], a způsob jeho implementace do simulačního programu Micro-Cap [4].

2. MODEL MEMRISTORU PRO POČÍTAČOVOU SIMULACI

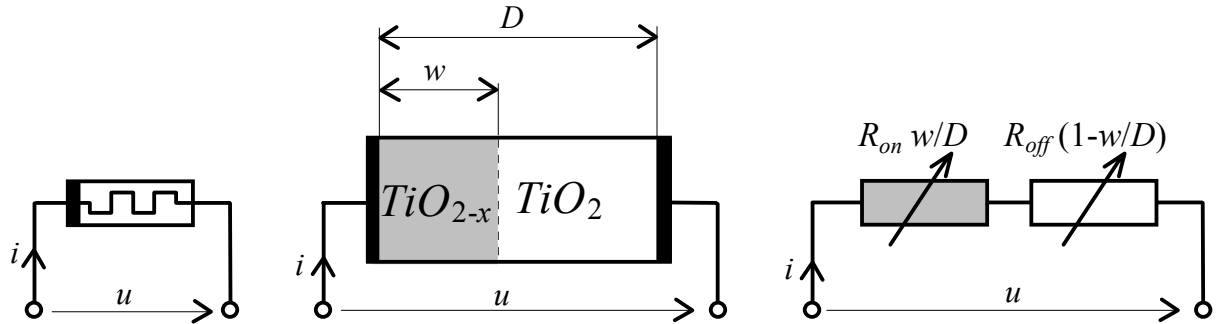
V článku [3] je uveden popis součástky, vyvinuté firmou HP. Její schématická značka je na obr. 1 a). Součástka je tvořena tenkou vrstvou kysličníku titaničitého (TiO_2) tloušťky několika nanometrů, která je uzavřena mezi dvě platinové elektrody (viz obr. 1 b). Kysličník

¹ Dalibor Biolek, prof. Ing. CSc., UMEL FEKT VUT v Brně, Údolní 53, 602 00 Brno, Czech Republic
tel.: +420 973442487, fax: +420 973443773, e-mail: biolek@feec.vutbr.cz

² Zdeněk Biolek, Ing. Ph.D., SŠIEŘ Rožnov p.R., Školní 1610, 756 61 Rožnov p.R., Czech Republic
tel.: +420 571752325, fax: +420 571752300, e-mail: zdenek.biolek@roznovskastredni.cz

³ Viera Biolková, Ing. UREL FEKT VUT v Brně, Purkyňova 118, 612 00 Brno, Czech Republic
tel.: +420 41149152, fax: +420 41149244, e-mail: biolkova@feec.vutbr.cz

je sám o sobě dobrým elektrickým izolantem. U jedné z elektrod je však záměrně ochuzen o atomy kyslíku (TiO_{2-x}), čímž vzniká vrstvička s poměrně dobrou vodivostí o šířce w . Vlivem proudu, protékajícího touto součástí, se vodivá vrstva rozšiřuje nebo zužuje v závislosti na směru proudu a tím se mění celkový elektrický odpor. Rozpojíme-li elektrický okruh, proud přestane protékat, rozhraní mezi oběma vrstvami se zastaví a hodnota odporu se zafixuje.



Obrázek 1 a) schématická značka, b) zjednodušený fyzikální, c) zjednodušený elektrický model HP memristoru.

Z výše uvedeného je zřejmé, že memristor je asymetrická součástka v tom smyslu, že její chování se změní, pokud v aplikačním obvodu zaměníme její vývody. To je respektováno silnou čarou v schématické značce na obr. 1 a), která má následující význam [5]: Připojíme-li k memristoru zdroj napětí s potenciálním spádem od zvýrazněné elektrody směrem k druhé elektrodě (viz obr. 1 a), pak odpor memristoru se začne snižovat.

Na obr. 1 c) je jednoduchý elektrický model memristoru. Při nulové šířce vodivé vrstvy, neboli $w = 0$, je výsledný odpor memristoru vysoký (R_{off}), neboť je tvořen izolantem TiO_2 . Naopak, rozšíří-li se vodivá vrstva přes celou délku D , tj. $w = D$, pak odpor memristoru je minimální možný (R_{on}). Poměr R_{off}/R_{on} bývá uváděn kolem 10^2-10^3 . Náhradní model HP memristoru je tedy tvořen sériovým uspořádáním rezistorů podle obr. 1 c). Zavedeme-li normovanou šířku dopované vrstvy

$$x = \frac{w}{D} \in (0,1), \quad (1)$$

pak odpor HP memristoru R_M závisí na této veličině podle vztahu

$$R_M(x) = R_{ON}x + R_{OFF}(1-x) = R_{off} - (R_{off} - R_{on})x. \quad (2)$$

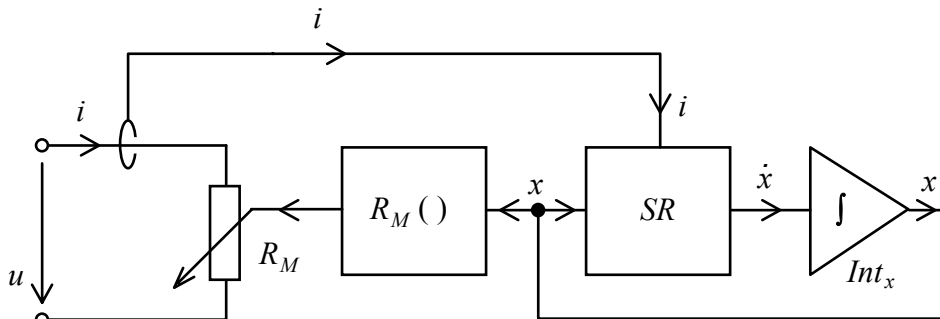
Podle [3] závisí rychlost pohybu rozhraní mezi dopovanou a nedopovanou vrstvou na proudu, procházejícího memristorem, takto (viz též [6]):

$$\frac{dx}{dt} = ki(t)f(x), \quad k = \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2}, \quad (3)$$

kde $\mu_v \approx 10^{-14} \text{ m}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$ je pohyblivost dopantů. V blízkosti hraničních hodnot ($x = 0$ a $x = 1$) se rychlost rozhraní zmenšuje postupně k nule. Tento jev, nazývaný nelineární drift dopantů (nonlinear dopant drift), je obvykle modelován pomocí tzv. okénkových funkcí $f(x)$ (viz pravá strana rovnice 3). Příkladem mohou být Joglekarova (index J) [7] a Biolkova (B) [6] okénková funkce podle (4),

$$window_j(x) = 1 - (2x - 1)^{2p}, \quad window_B(x) = 1 - (x - stp(-i))^{2p} \quad (4)$$

kde p je celočíselný parametr, při jehož růstu zároveň roste strmost přechodu k nulovým krajním hodnotám funkce, a $stp(\)$ je jednotkový skok, neboli $stp(i) = 1$ pro $i \geq 0$ a $stp(i) = 0$ pro $i < 0$. Podrobnosti jsou popsány v [6].



Obrázek 2 Model HP memristoru jako dynamického memristivního systému.

Definujeme-li proměnnou x z (1) jako stavovou veličinu HP memristoru, pak rovnice (3) je diferenciální stavová rovnice memristivního systému a rovnice (2) je příslušná branová rovnice, popisující vztah mezi napětím a proudem. Grafické znázornění daného modelu je na obr. 2. Blok stavové rovnice (SR) pro výpočet derivace stavové veličiny ze stavové veličiny a z proudu memristorem představuje rovnici (3) včetně vzorce pro použitou okénkovou funkci pro modelování nelineárního driftu dopantů. Blok časové integrace Int_x transformuje derivaci stavové veličiny v stavovou veličinu. Zahrnuje rovněž možnost modelování počátečního stavu. Ze stavové veličiny se v bloku $R_M(\)$ počítá elektrický odpor memristoru podle rovnice (2).

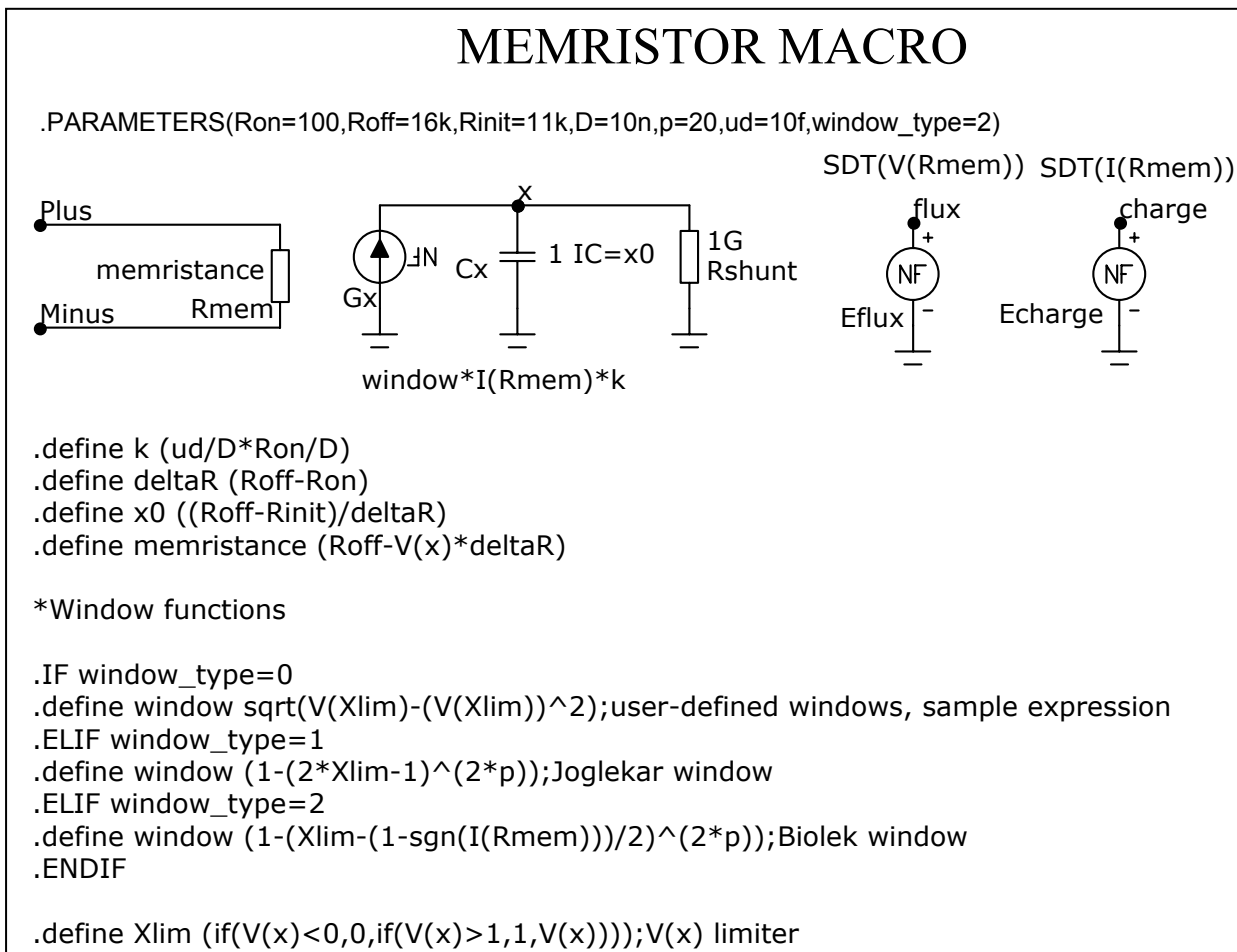
Model na obr. 2 může být východiskem pro tvorbu obvodového modelu memristoru v prostředí libovolného vhodného programovacího prostředí. SPICE model je uveden např. v [6], kde rezistor R_M je modelován pomocí řízeného zdroje napětí. Program Micro-Cap umožňuje přímé modelování rezistoru, jehož odpor je určován vzorcem. Proto příslušná implementace vzorce (2) v Micro-Capu je velmi jednoduchá.

3. IMPLEMENTACE MODELU V MICRO-CAPU

Model z obr. 2 byl implementován do Micro-Capu jako makroobvod podle obr. 3.

Integrace stavové rovnice (3) je zabezpečena řízeným zdrojem proudu Gx , který nabíjí kapacitor Cx o jednotkové kapacitě. Proud zdrojem je roven pdavé straně stavové rovnice. Proto napětí na kapacitoru, $V(x)$, odpovídá okamžité poloze rozhraní mezi dotovanou a nedotovanou vrstvou x . Rezistor R_{shunt} je připojen paralelně k Cx k zabezpečení stejnosměrné cesty mezi uzlem x a zemí. Pomocné řízené zdroje E_{flux} a E_{charge} zabezpečují výpočty toku, tj. časového integrálu napětí, a náboje, tj. časového integrálu proudu, k snadné vizualizaci těchto veličin memristoru. Časové integrály jsou počítány pomocí zabudované funkce SDT. Odpor memristoru s označením „memristance“ je počítán pomocí vzorce (2). Při volání makra je možno zvolit jednu z okénkových funkcí (1 – uživatelská funkce, 2 – Joglekarova funkce, 3 – Biolkova funkce). Dalšími parametry makra jsou R_{on} , R_{off} , R_{init} (počáteční odpor memristoru), D , μ_D a p . Proměnná „ $Xlim$ “ je zavedena z důvodu eliminace důsledků vlivu numerických chyb simulačního programu na chování modelu. V průběhu integrace stavové rovnice může vlivem numerických nepřesností veličina x vybočit, byť jen

nepatrně, z intervalu (0,1). Proto tato veličina je před procesem „okénkování“ upravena tak, aby nemohl z daného intervalu vybočit.

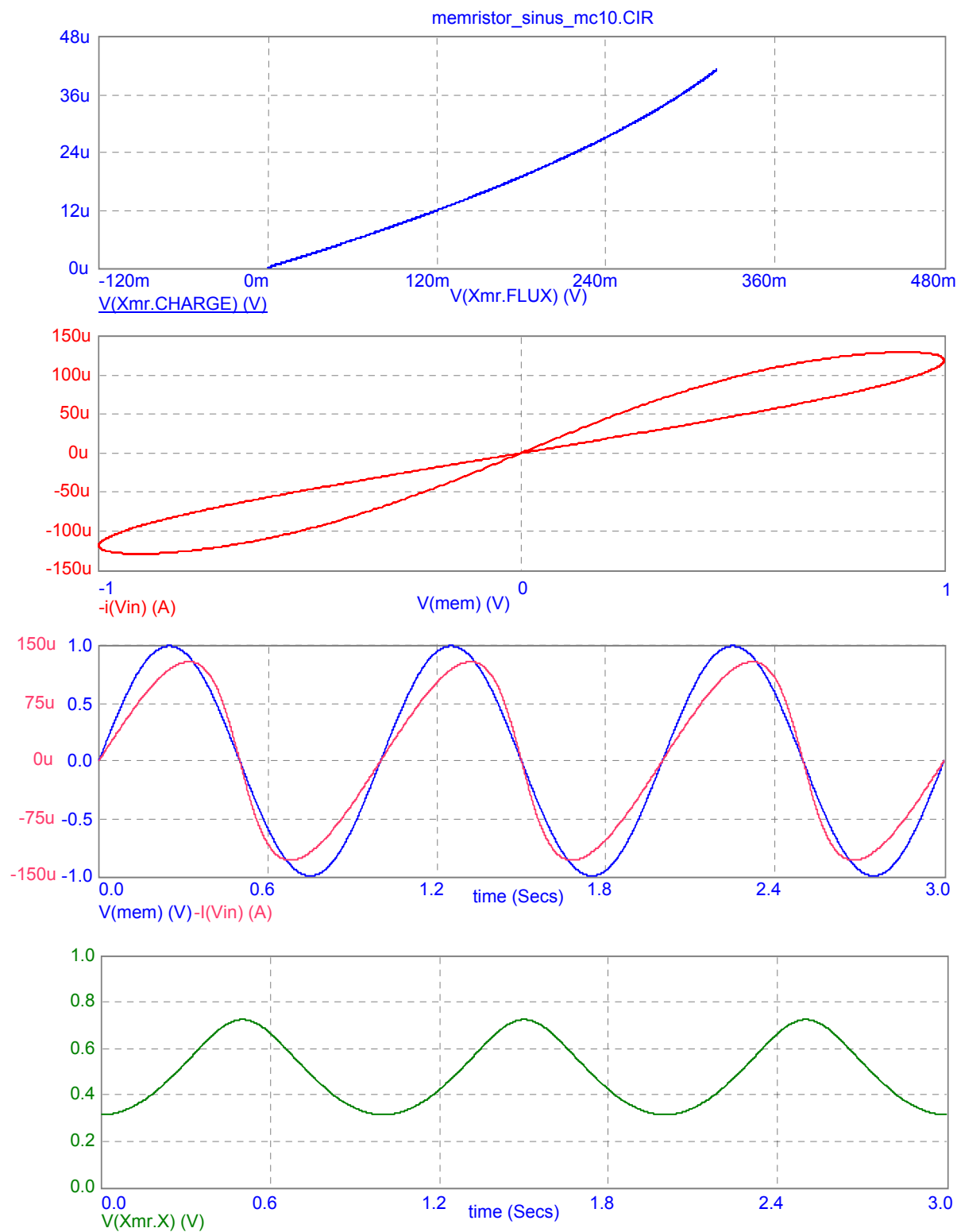


Obrázek 3 Makromodel HP memristoru v Micro-Capu.

Obrázek 4 znázorňuje výsledky analýzy „Transient“ jednoduchého testovacího obvodu, kdy paralelně k memristoru je zapojen napěťový zdroj sinusového průběhu o amplitudě 1 V a kmitočtu 1 Hz. Parametry memristoru odpovídají implicitním hodnotám, uvedeným na obr. 3. Z obrázku jsou jasně patrné základní „poznávací znaky“ (tzv. Fingerprints) memristoru:

1. obrázek shora: Jednoznačná konstituční relace memristoru, t.j. závislost elektrického náboje, prošlého memristorem, na toku, t.j. časovém integrálu napětí na memristoru.
2. obrázek shora: Hysterezi smyčka ampérvoltové charakteristiky memristoru, přičemž hysterezní efekt je postupně potlačován při růstu frekvence signálu.
3. obrázek shora: na rozdíl od napětí, proud memristorem není harmonický. Křivky napětí a proudu vykazují totožné okamžiky průchodů nulovými úrovněmi.

Na čtvrtém obrázku je zřejmý časový průběh pohybu rozhraní mezi dotovanou a nedotovanou vrstvou v memristoru.



Obrázek 4 Ukázka simulace chování HP memristoru při jeho buzení zdrojem napětí sinusového průběhu o amplitudě 1 V a kmitočtu 1 Hz.

4. ZÁVĚR

Model HP memristoru a zejména jeho implementace v programu Micro-Cap mohou být užitečným nástrojem pro softwarové experimenty s touto zajímavou součástí. Evaluační

verze tohoto programu, volně stažitelná z www stránky [4], umožňuje od verze č. 9 simulace v tzv. interaktivním módu [8]. Ukázkové vstupní soubory pro demonstraci základních vlastností memristoru jsou vytvořeny tak, že této unikátní vlastnosti využívají například k efektní demonstraci faktu, že hysterezní efekt v ampérvoltové charakteristice memristoru slábne při růstu frekvence, k vysvětlování rozdílů mezi různými metodami modelování nelineárního driftu dopantů, apod. [9].

Instalační soubory programu Micro-Cap verze 10, která bude uvolněna v květnu 2010, obsahují, kromě modelu memristoru, i modely dalších „mem-součástek“, konkrétně memkapacitoru a meminduktoru [10, 11], které jsme vyvinuli na základě metodologie popsané v [12].

Poděkování

Výzkum, jehož výsledky jsou prezentovány v tomto článku, je podporován Grantovou agenturou ČR prostřednictvím grantu č. P102/10/1614, Výzkumnými záměry VUT Brno č. MSM0021630503 a MSM0021630513 a Výzkumným záměrem UO Brno č. MO FVT0000403.

LITERATURA

- [1] CHUA, L.O. Memristor – the missing circuit element. *IEEE Trans. on Circuit Theory*, vol. CT-18, no. 5, pp. 507 – 519, 1971.
- [2] CHUA, L.O., KANG, S.M. Memristive devices and systems. *Proc. of the IEEE*, vol. 64, no. 2, pp. 209-223, 1976.
- [3] STRUKOV, D.B., SNIDER, G.S., STEWART, D.R., WILLIAMS, R.S. The missing memristor found. *Nature*, 2008, vol. 453, pp. 80 – 83, 1 May 2008.
- [4] WWW stránka Micro-Capu: www.spectrum-soft.com
- [5] Di VENTRA, M., PERSHIN, Y.V., CHUA, L.O. Circuit elements with memory: memristors, memcapacitors and meminductors. *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 10, pp. 1717–1724, 2009.
- [6] BIOLEK, Z., BIOLEK, D., BIOLKOVÁ, V. SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift. *Radioengineering*, vol. 18, no. 2, pp. 210–214, 2009.
- [7] JOGLEKAR, Y.N., WOLF, S.J. The elusive memristor: properties of basic electrical circuits. *Eur.J.Phys.*, vol. 30, pp. 661-675, 2009.
- [8] BIOLKOVÁ, V., BIOLEK, D. Interaktivní analýza obvodů pro potřeby výuky. *Sborník konference STO10, Seminář teorie obvodů, Brno, 2008*, s. 26-29. ISBN 978-80-7232-554-3.
- [9] Spectrum Newsletters, Summer 2009: Memristor Macros. <http://www.spectrum-soft.com/news/summer2009/memristor.shtm>.
- [10] BIOLEK, Z., BIOLEK, D., BIOLKOVÁ, V. Memristor a jeho místo v teorii obvodů. *Slaboproudý obzor*, roč. 65, č. 2, 2009, s. P1-P16.
- [11] BIOLEK, D., BIOLEK, Z., BIOLKOVÁ, V. SPICE modelling of memcapacitor. *Electronics Letters*, vol. 46, Issue 7, pp. 520-522, 2010.
- [12] BIOLEK, D., BIOLEK, Z., BIOLKOVÁ, V. SPICE Modeling of Memristive, Memcapacitive and Meminductive Systems. In *Proceedings of the European Conference on Circuits Theory and Design 2009 (ECCTD '09)*, Antalya, Turkey, pp. 249-252, 2009.