

# Memristor: znovu objevená součástka

Známe to všichni: ráno přijdeme do práce, zapneme počítač a trpělivě čekáme, někdy i minuty, na ukončení „spouštěcího rituálu“. Před vypnutím počítače zase zavřeme všechny spuštěné aplikace, a to i tehdy, víme-li, že s nimi na druhý den budeme zase pracovat. Během práce si občas posteskneme na to, jak je náš počítač pomalý, a pokud nevlastníme záložní zdroj, obáváme se případných výpadků proudu.

V roce 2008 došlo k události, která zřejmě změnila koncepci osobních počítačů takovým způsobem, že se výše popsané problémy stanou zapomenutou minulostí. Tou událostí je výroba funkčních vzorků nové elektronické součástky jménem memristor v laboratořích firmy Hewlett Packard (HP). Studie předpovídají, že počítač založený na technice memristorů by bylo možno „beztrestně“ kdykoliv vypnout a po jeho dalším zapnutí, lhostejno zda za vteřinu nebo třeba za rok, bychom mohli prakticky okamžitě pokračovat v práci tam, kde jsme přestali. Vize, šířící se po Internetu, však jdou ještě dále. Počítač by už neobsahoval pevný disk ani paměti RAM v dnešní podobě a byl by podstatně rychlejší. Tzv. „sleep mode“, do něhož dnešní počítače upadají po určité době nečinnosti, přičemž však neustále spotřebovávají určitou energii, by již neexistoval. Nahradil by jej stav absolutní nečinnosti, „zmrazení stavu“ až do okamžiku, který si určuje uživatel stisknutím tlačítka. Avšak technika memristorů v sobě údajně skrývá další, ještě daleko slibnější potenciál přechodu od digitálních počítačů k hybridním, kdy ty časově nejnáročnější operace by mohly být realizovány analogovým způsobem, podobně jako jsme tomu svědky například v mechanismech fungování živých organismů.

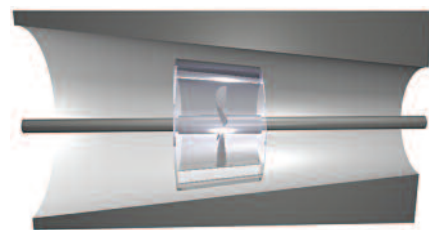
Počínaje již základní školou, celé generace žáků a studentů byly v průběhu minulého století seznamovány se základní trojicí takzvaných pasivních elektrických součástek, tj. součástek, které ke své čin-

nosti nevyžadují přídavné napájecí zdroje: rezistor (R), kapacitor (C) a induktor (L), „lidově“ označované jako odpor, kondenzátor a cívka. Princip kapacitoru byl odhalen v roce 1745 (vzpomeňme na Leydenskou láhev), rezistoru v roce 1827 (Georg Simon Ohm) a induktoru v roce 1831 (Michael Faraday). Vzhledem k tomu, že v průběhu dalších téměř 150 let se tyto tři součástky, samozřejmě spolu s aktivními polovodičovými prvky – tranzistory, staly základními stavebními kameny nejrůznějších elektrických zařízení, mělo se za to, že žádné další pasivní prvky neexistují. Koho by napadlo, že trojice R+L+C není kompletní?

V roce 1971 publikoval tehdy pětatřicetiletý Leon Chua z University of California, Berkeley, dnes slavný článek nazvaný „Memristor – The Missing Circuit Element“<sup>[1]</sup>. V článku předpověděl, že lidé v budoucnu pravděpodobně objeví další pasivní součástku, memristor (zkratka z anglického „memory resistor“), což je zjednodušeně řečeno rezistor s paměťovým efektem. Chování této součástky by se dalo přirovnat k vodovodnímu potrubí, které mění svůj průřez podle toho, jaké množství vody jím protéká. Při průtoku jedním směrem se průřez zvětšuje a odpor, který potrubí klade protékající vodě, se snižuje. Při změně směru toku se průřez zmenšuje a odpor roste. Přestane-li voda téci, průřez se přestane měnit a potrubí si pamatuje svoji geometrii tak dlouho, dokud další proudění vody nezačne opět působit.

Dokonalejší hydromechanický model memristoru, který je již snadno výrobitelný, ukazuje obr. 1<sup>[2]</sup>. Trubička, jejíž světlost se v podélném řezu postupně zmenšuje, a kterou protéká tekutina, odpovídá memristoru, kterým protéká elektrický proud. Proud tekutiny točí vrtulkou, která je vedena tyčí s vyřezaným závitem. Vrtulka pohybuje zátkou podle směru průtoku na jednu nebo druhou stranu. Pohybem zátky se mění aktivní průřez a tím

také odpor, který trubička klade protékající tekutině. Přestane-li tekutina proudit, pohyb se zastaví a trubička si pamatuje svůj stav (a tím také odpor) tak dlouho,



Obr. 1. Hydromechanický model memristoru<sup>[2]</sup>

dokud tekutina opět nezačne proudit a pohybovat zátkou.

Memristor je ideově navržen jako elektrická součástka s obdobným chováním, která by měnila svůj elektrický odpor podle elektrického proudu, který jí protéká, a odpor v konkrétním okamžiku by tedy závisel na celé historii tohoto průtoku.

Z výše uvedeného vyplývá, že pokud by se memristor podařilo vyrobit jako jednoduchou „dvouúvodovou“ pasivní elektrickou součástku, nevyžadující žádné napájecí zdroje, mohla by se využít ve funkci velmi zajímavého paměťového prvku s teoreticky nekonečnou dobou trvání paměťového efektu (tzv. nevolatilní paměť) s nulovou energetickou spotřebou ve stavu „pamatování“. Podle toho, jaké stavy odporu by byly použity při zápisu, memristor by mohl být využitelný buď jako klasická jednobitová (dvouúrovňová) nebo víceúrovňová digitální paměť, nebo dokonce jako revoluční analogová nevolatilní paměť se spojitou množinou paměťových stavů. Pokud by se memristor podařilo vyrobit v nanometrických rozměrech tak, že by paměť vykazovala komerčně zajímavou hustotu záznamu, mohlo by to znamenat potenciální revoluci v počítačovém průmyslu.

Po dobu dlouhých 37 let, měřených od zrodu ideového principu memristoru byl memristor pouze hypotetickou součást-

kou, o niž se zajímalo jen velmi málo úzce zaměřených teoretiků. Situace se ale dramaticky změnila 1. května 2008, kdy tým výzkumníků firmy Hewlett Packard (HP) z kalifornských laboratoří v Palo Altu, vedený chemikem Stanleyem Williamsem, publikoval v prestižním časopise Nature článek „The missing memristor found“<sup>[3]</sup>. Bezprostředně po tomto objevu prohlásil profesor Leon Chua, který je již řadu let uznávanou světovou kapacitou v oboru teorie elektrických obvodů, že „...přišel čas k přepisování všech učebnic základů elektrotechniky“.

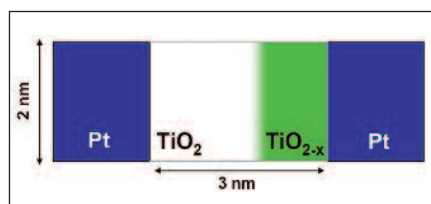
V článku<sup>[3]</sup> je uveden popis součástky, vyvinuté firmou HP. Je tvořena tenkou vrstvou kysličníku titaničitého tloušťky několika nanometrů, která je uzavřena mezi dvě platínové elektrody, viz obr. 2. Kysličník je sám o sobě dobrým elektrickým izolantem. U jedné z elektrod je však záměrně ochuzen o atomy kyslíku, čímž vzniká vrstvička s poměrně dobrou vodivostí. Vlivem proudu, protékajícího touto součástkou, 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.

Podrobné teoretické rozbory ukazují, proč mohla být takováto součástka vyrobena až v éře nanotechnologií. Zjednodušeně řečeno, memristor pracuje tím lépe, čím menší jsou jeho rozměry. Memristivní účinek je nepřímo úměrný druhé mocnině rozměru. Kdyby byl memristor HP vyroben s tloušťkou kysličníkové vrstvy 1 mikrometr namísto 10 nanometrů, představovalo by to zeslabení jeho současného účinku 10 000krát.

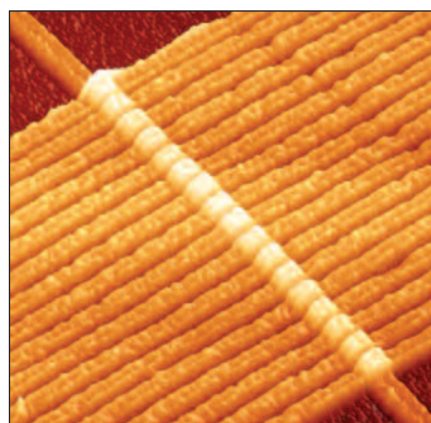
Je zajímavé, že cílem výzkumu v laboratořích HP původně nebyl vývoj memristoru, nýbrž vývoj nových pamětí pro počítačový průmysl, které by pracovaly na unikátním principu tzv. „crossbar structure“. Na skutečnost, že to, co bylo nakonec vyvinuto, je vlastně memristor, upozornil kolega Greg Snider z vedlejšího oddělení, který shodou okolností četl starou zapomenutou práci Leona Chuy.

Od objevu v květnu 2008 se do výzkumu, spojeného s memristorem, investuje ve firmě HP čím dále více prostředků, zejména v souvislosti s očekávanou revo-

lucí na trhu s paměťovými médii, kdy matice memristorů, pracujících jako dvoustavové spínače ve funkci paměti RRAM (Resistive Random-Access Memory) by měly podle prognóz vytlačit současné flash paměti. Obr. 3, převzatý z<sup>[4]</sup>, je pořízen ze speciálního skenovacího mikroskopu, schopného rozlišovat detaily na atomární úrovni. Zobrazuje 17 memristorů, umístěných na úhlopříčně vedeném vodiči. Horní elektroda každého memristoru je zakryta příčně vedeným vodičem,



**Obr. 2. Schématické znázornění memristoru HP. Převzato z<sup>[4]</sup>**



**Obr. 3. Pole 17 memristorů, nezávisle adresovatelných systémem ortogonálních nanovodičů. Memristory se nacházejí v místech křížení vodičů. Každý z vodičů má šířku kolem 50 nm<sup>[4]</sup>**

který je mimo tento spoj vtlačen do roviny diagonálního vodiče. Každý memristor je tak snadno adresovatelný konkrétní dvojicí vodičů. Vodiče mají tloušťku kolem 50 nanometrů, což představuje pouhých cca 150 atomů. Takovýmto způsobem je možno vytvářet celé „koberce“ s úctyhodnou paměťovou hustotou řádově 100 gigabitů na čtvereční centimetr (u současných pamětí flash je to cca 32 gigabitů na čtvereční centimetr). K této hustotě se dnes již blíží pevné disky s technologií PMR (Perpendicular Magnetic Recording)<sup>[5]</sup>. Na rozdíl od nich však podle dostupných

informací mohou být procesy zápisu a čtení dat v memristorech zhruba tisíckrát rychlejší<sup>[4]</sup>. Přidáme-li k tomu přirozenou vlastnost memristoru pamatovat si „poslední“ stav bez nároků na jakékoli vnější napájení, jsou uvedené skutečnosti samy o sobě dostatečné k ideovému projektování počítačů s parametry, které se zcela vymykají těm, na které jsme zvyklí dnes. V počítači, založeném na memristorech, by neexistovaly pevné disky ani paměti RAM v dnešní podobě. Pomalost pevných disků, nedostatečná kapacita flash pamětí a neoptimální způsob komunikace mezi těmito paměťovými médii jsou hlavními příčinami „pomalosti“ a známých dlouhých „bootovacích časů“ dnešních počítačů. Paměti RRAM nahradí současně pevný disk i RAM. Počítač pak budeme moci bez obav vypnout v libovolném okamžiku a po opětovném zapnutí okamžitě pokračovat v práci. Významné jsou i další aspekty, spojené s energetickými úsporami. Paměti založené na memristorových polích budou údajně nejenže o tři řády rychlejší než pevné disky, ale budou rovněž i energeticky podstatně méně náročné, protože na rozdíl od pevných disků nebudou obsahovat pohyblivé části. Lépe na tom budou i ve srovnání se současnými dynamickými paměťmi RAM, neboť k udržování paměťového efektu v memristoru není vyžadován žádný příkon. Implementace memristorů do notebooků bude znamenat nejen zvýšení jejich výkonu, ale i prodloužení „výdrže“ baterií. V článku<sup>[6]</sup> je poukázáno rovněž na významné ekologické aspekty: hospodářství Spojených států se musí každoročně vyrovnávat se ztrátou cca 2,8 miliard dolarů jako důsledkem pouhého napájení nečinných počítačů během nočních hodin, což lze přepočítat na 20 milionů tun emisí oxidu uhličitého vyprodukovaných ročně. Přitom počet „aktivních“ osobních počítačů rok od roku roste a podle odhadů by měl v roce 2015 dosáhnout astronomického čísla dvou miliard. Počítače, založené na memristorech, dávají naději na zásadní řešení tohoto naléhavého problému.

Memristor by se mohl stát východiskem revolučních inovací i v dalších oblastech. Vezměme například jen oblast počítačové grafiky. Lze si představit grafické karty, které míchají výsledné barvy zcela analo-

gově, tj. spojitě, podobně jako je tomu u sublimačních tiskáren, které tím dosahují fotorealistické kvality již při rozlišení 300 DPI. Pak by se mohl zcela zrušit pojem "barevná hloubka" neboli počet bitů na pixel. Pro tzv. "pravé barvy" neboli TRUE COLOR je totiž zapotřebí uchovávat ve videopaměti 24 bitů informace pro barvu každého pixelu, aby se s určitou rezervou vyhovělo schopnosti lidského oka odhalit rozdíly mezi řádově 10 milióny různých barevných odstínů. Těchto 24 paměťových buněk by nahradil jediný memristor a výsledek by byl přitom mnohem lepší – REAL TRUE COLOR (spojitě, tj. skutečné pravé barvy). Nasazení memristorových pamětí do fotoaparátů a kamer by způsobilo revoluci nejen ve výsledné kvalitě, ale i v ceně a ve spotřebě energie. Počítačová grafika by už nikdy nebyla taková jako dnes, byla by zřejmě analogová (digitální fotoaparáty už asi nebudou digitální). Změnil by se způsob uchovávání grafické informace. Grafické formáty dnešního typu by zřejmě vymizely.

Objev memristoru bývá často přirovnáván svým významem k objevu tranzistoru jako revoluční polovodičové součástky. Od objevení teoretického principu k celosvětovému využívání vede dlouhá cesta. Jsou-li s odstupem času potřebné špičkové technologie, musí se iniciativy chopit velká firma, která je má k dispozici. Pak je třeba nalézt klíčovou aplikaci (anglicky „Killer Application“), která uvede součástku na trh. Tranzistor byl vynalezen již v roce 1925, avšak teprve od prosince 1947, po jeho „znovuobjevení“ v Bellových laboratořích v New Jersey, se začíná psát jeho historie. Odezva na oficiální oznámení objvu byla minimální. Například konkurenční firma Philips tvrdila, že tranzistor nemá oproti elektronkám šanci na uplatnění. Rychlému rozšíření tranzistoru do praxe tehdy napomohla jednoduchá aplikace – elektronický naslouchací přístroj pro nedoslýchavé, vyráběný celosvětově ve velkých sériích. Poté nastoupila výroba kabelkového tranzistorového přijímače, po kterém tehdy byla obrovská poptávka.

Firma HP, která „znovuobjevila“ memristor po 37 letech, se soustřeďuje na dvě stěžejní aplikace, které by měly napomoci urychlenému zavedení memristoru na trh.

Kromě již zmíněných pamětí RRAM to jsou analogové, nikoliv digitální paměti, s průlomovými aplikacemi v oblasti umělé inteligence a systémů, napodobujících procesy v lidském mozku. Dnešní počítače jsou digitální a růst jejich výkonnosti závisí na množství tranzistorů, které jsou schopni inženýři umístit na čip. Podle Moorova zákona se toto množství zdvojnásobuje každý druhý rok. Tato jednoduchá poučka platila poměrně přesně po dobu několika posledních dekad, kdy technologie výroby integrovaných obvodů zaznamenávaly významné inovace. Na konci 90. let bylo možno vyrobit tranzistor o rozměru cca 350 nanometrů, ale dnes je to již pouhých 45 nanometrů, což představuje asi jen 220 atomů křemíku. Přibližujeme se k fundamentální hranici možného zmenšování tranzistoru. Aby výkonnost čipu nadále rostla tempem, určeným Moorovým zákonem, je třeba nahradit tranzistor ve funkci dvoustavového prvku něčím principiálně odlišným. Nabízí se právě memristor.

Existují poměrně jednoduché úlohy, které digitální počítače prostě nemohou řešit tak efektivně jako systémy, pracující na analogovém nebo smíšeném principu, který je využíván živými organismy. Řada výzkumníků se v minulosti pokoušela sestavit digitální zařízení, která by byla schopna alespoň vzdáleně napodobit soustavu neuronů a synapsí v mozku. Podle často citovaného příkladu by však k simulaci procesů v mozku „pouhé“ myši bylo zapotřebí takového astronomického množství výpočetních úkonů v reálném čase, že soudobý digitální počítač o odpovídajícím výpočetním výkonu by musel mít rozměry menšího města a bylo by potřebné jej napájet samostatnou elektrárnou. Není tedy divu, že v současné době vznikají studie o tom, jak využít memristorů k vývoji analogových počítačů. Na rozdíl od digitálních počítačů, u nichž se předpokládá využití memristoru v dvoustavovém režimu (memristor jako spínač), by se zde využilo toho, že odpor memristoru lze měnit spojitě mezi zadanou minimální a maximální hodnotou. Memristory lze vyrobit v nanometrických rozměrech a mohou se chovat podobně jako synapse v mozku. Mohly by tak umožnit budování analogových počítačů o „rozumných“ geometrických roz-

měrech, pracujících podobně jako lidský mozek.

Zatímco výroba výše popisovaných systémů je zřejmě záležitostí dlouhého vývoje, ve velmi blízké budoucnosti lze očekávat vývoj hybridních digitálně-analogových počítačů, u nichž by došlo ke kombinování digitálních a analogových výpočetních jader na bázi memristorů. Podle odhadu S. Williamse na konferenci [7] v listopadu 2008 lze předpokládat, že čipy, obsahující memristory, se objeví na trhu ne dříve než za 3 roky, ale současně ne později než za 5 let.

Od května 2008 je možno sledovat prudký růst zájmu o memristor, a to jak z řad laické veřejnosti, tak i celých institucí, zabývajících se seriózním výzkumem. Úměrně tomu vychází množství článků v nejrůznějších časopisech a konferenčních sbornících, zaměřených na základní i aplikovaný výzkum. Memristor přitom není v současné době dostupný jako součástka, s níž by bylo možné experimentovat. O to významnější roli proto dnes hrají počítačové modely, které umožňují simulovat chování reálné součástky v budoucích aplikacích. Výsledkem výzkumu, uskutečňovaném na VUT v Brně, UO Brno a SŠIEŘ v Rožnově p. R., je unikátní matematický model HP memristoru [8] v jazyku SPICE, což je celosvětově rozšířený standard počítačové simulace elektrických systémů. Model byl vyvinut na základě údajů, uvedených v článku [3]. V srpnu 2009 o něj projevil zájem americká firma Spectrum Software, producent programu Micro-Cap pro profesionální simulaci složitých analogově-digitálních systémů, využívaný takovými subjekty jako jsou například AT&T Bell Labs, Fairchild, HP, NASA apod. V současnosti jsou tyto makromodely již součástí instalačního balíku Micro-Capu v. 10 [9]. Jde o vůbec první implementaci modelu memristoru do celosvětově rozšířeného komerčního simulačního programu.

Použitím polovodičového memristoru v technických zařízeních dojde zřejmě ke změnám, které snesou srovnání se změnami, vyvolanými kdysi objevem tranzistoru. Ještě významnější je však skutečnost, že memristor nás nutí měnit i náš pohled na základní principy, podle nichž se řídí procesy v živé i neživé přírodě. Zdá



se totiž, že memristor je pouze jedním z více „zvláštních“ prvků, jejichž existenci v minulosti tušilo jen několik málo lidí. Například na konferenci <sup>[7]</sup> v listopadu 2008 prof. Chua navrhuje zahájení výzkumu principiálně bezeztrátových prvků typu memkapacitor a meminduktor, které by představovaly energeticky výhodnější alternativy memristoru jako paměti. SPICE modely těchto prozatím hypotetických prvků jsme představili za přítomnosti profesora Chuy na Evropské konferenci ECCTD v srpnu 2009 <sup>[10]</sup>.

Pro zájemce o tuto zajímavou problematiku, zejména z řad pedagogů i studentů, jsme vydali publikaci, usnadňující úvod do studia <sup>[11]</sup>. Závěrem uveďme citaci z této práce:

*Memristor nebyl původním cílem výzkumu, proto byl objev v laboratořích Hewlett Packard nečekaným, ale o to příjemnějším překvapením. Podle <sup>[12]</sup> nemuselo k objevu vůbec dojít, kdyby si spolupracovník Greg Snider nepovšiml, že hysterizní křivky, zjišťované dennodenně na měřených vzorcích, se nápadně podobají grafům ze zapomenuté práce <sup>[1]</sup> z r. 1971 o memristoru.*

*Příběh o memristoru nám dává vynikající poučení o ceně vzdělanosti. Přestože teorie memristivních systémů je velmi dobře propracována už přes 30 let a umožňuje pochopit obecné principy paměťového chování dynamických systémů, do dnešní doby o ní vědělo jen velmi málo lidí. Naštěstí mezi ně patřil i pracovník Hewlett Packard G. Snider, který stál u zrodu memristoru.*

*Je zcela zřejmé, že mnohé ze zásadních teoretických prací, které vznikly bezprostředně po objevu HP memristoru, mohly*

*být napsány kdykoliv během předešlých 37 let. Memristor nám zde nastavuje zrcadlo: poznání fundamentálních principů světa, ve kterém žijeme, je často vyhodnoceno jako bezcenné, pokud nevede k bezprostřednímu zisku. Mediálně přitažlivější jsou témata typu „instant turn-on computers“, jejichž existence je však pouhým důsledkem předchozího bádání v oblasti základního výzkumu.*

A ještě připojme citaci z <sup>[13]</sup>, která by mohla sloužit jako výzva hloubavým studentům a zároveň jejich učitelům:

*However, as experience shows, the most valuable applications of memristors will most likely come from some young student who learns about these devices and has an inspiration for something totally new.*

#### Literatura:

- <sup>[1]</sup> Chua, L. O. Memristor – The Missing Circuit Element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. CT-18, No. 5, September 1971, p. 507–519.
- <sup>[2]</sup> Biolek, Z., Biolek, D. Úvod do studia memristoru. *Perspektivy elektroniky 2009, Rožnov. p. R.*, 26. 3. 2009, p. 115–130.
- <sup>[3]</sup> Strukov, D. B., Snider, G. S., Stewart, D. R., Williams, R. S. The missing memristor found. *Nature (London)*, vol. 453, May 2008, p. 80–83.
- <sup>[4]</sup> <http://www.spectrum.ieee.org/semiconductors/design/the-mysterious-memristor>
- <sup>[5]</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Perpendicular\\_recording](http://en.wikipedia.org/wiki/Perpendicular_recording)
- <sup>[6]</sup> Swartz, J. Leaving PC's on Overnight Cost Companies \$ 2.8B a Year. *USA TODAY*. March 25, 2009,

[http://www.usatoday.com/tech/science/environment/2009-03-25-pc-power-company-costs\\_N.htm](http://www.usatoday.com/tech/science/environment/2009-03-25-pc-power-company-costs_N.htm).

<sup>[7]</sup> <http://webcast.berkeley.edu/events.php> – kompletní videozáznam symposia Memristor and Memristive Systems, Berkeley, November 2008.

<sup>[8]</sup> Biolek, Z., Biolek, D., Biolková, V. SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift. *Radioengineering*, vol. 18, no. 2, Part II, p. 210–214, June 2009.

<sup>[9]</sup> <http://www.spectrum-soft.com/news/summer2009/memristor.shtm>

<sup>[10]</sup> Biolek, D., Biolek, Z., Biolková, V. SPICE Modeling of Memristive, Memcapacitive and Meminductive Systems. *Proc. of ECCTD '09, European Conference on Circuit Theory and Design, August 23–27, 2009, Antalya, Turkey*, p. 249–252.

<sup>[11]</sup> Biolek, D., Biolek, Z., Biolková, V. Memristor a jeho místo v teorii obvodů. *Slaboproudý obzor*, ročník 65 (2009), č. 2, s. P1–P16.

<sup>[12]</sup> Williams, R. S. How we found the missing memristor. *IEEE Spectrum*, 2009, December 1, p. 1–11, [www.spectrum.ieee.org/print/7024](http://www.spectrum.ieee.org/print/7024).

<sup>[13]</sup> HP memristor FAQ. [http://www.hpl.hp.com/news/2008/apr-jun/memristor\\_faq.html](http://www.hpl.hp.com/news/2008/apr-jun/memristor_faq.html).

<sup>[14]</sup> Williams, S. Finding the missing memristor. Hewlett-Packard Development Company, L.P., IEEE CPMT Chapter, Santa Clara Valley, February 11, 2009.

Prof. Ing. Dalibor Biolek, CSc.,  
UMEL FEKT VUT Brno/K217 UO Brno  
Ing. Zdeněk Biolek, Ph.D.,  
SŠIEŘ Rožnov p. R.

# DPS

Plošné spoje od A do Z

Odborný časopis pro vývoj a výrobu v oboru elektroniky



Navštivte webové stránky časopisu: [www.dps-az.cz](http://www.dps-az.cz)