



## POHLEDY DO MINULOSTI ELEKTROTECHNIKY

Leon O. Chua

### 1 Úvod

Profesor L. O. Chua (*University of California at Berkeley, USA*), jeden z nejvýznamnějších současných teoretiků v oblasti nelineárních obvodů, neuronových sítí a chaotických systémů, se v červnu dožívá 80 let. To je dobrým důvodem k ohlédnutí se do minulosti a připomenutí jeho hlavních přínosů, kterými obohatil moderní teorii obvodů a systémů.

### 2 Začátky

Leon Ong Chua se narodil 28. června 1936 na Filipínách v rodině čínských imigrantů, pocházejících z jihočínské provincie Fujian<sup>1</sup>. Tato oblast je známá jako rodiště řady slavných učenců a vědců. K nejvýznamnějším přímým předkům L. Chuy patří Chua Wu Neng, astronom na císařském dvoře v éře dynastie Ming v 17. století, který byl zároveň filozofem a básníkem. V roce 1644, kdy Čína čelila mandžuské invazi, císař jmenoval Chua Wu Nenga do vysoké velitelské funkce v čínském vojsku [1].

Rodiče L. Chuy emigrovali na Filipíny koncem 30. let s vidinou lepších životních perspektiv. Rané dětství však prožil L. Chua, spolu se svojí sestrou-dvojčetem, v těžkých podmínkách 2. světové války, umocněných v letech 1942–1945 japonskou okupací Filipín. Otec L. Chuy byl obchodník s rybami, kterému se však obchody příliš nedařily. Po válce se rodině začalo blýskat na lepší časy díky podnikavému duchu Chuovy matky, která zbohatla na tehdy se rozvíjejícím průmyslu s plastickými hmotami a získaný majetek posléze investovala do trhu se zlatem a diamanty a do výnosné spolupráce s firmou Johnson & Johnson. Mladý Chua vynikal v matematice, astronomii a filozofii a neztotožňoval se s plány své rodiny na jeho budoucí životní dráhu v podnikání. V roce 1959 získal bakalářský titul (v originále BSEE, *Bachelor of Science in Electrical Engineering*) po studiích na *Mapúa Institute of Technology* v Manile. V roce 1960 se oženil se svojí, jak již dnes víme, celoživotní partnerkou Dianou, která pocházela ze stejné komunity čínských imigrantů, a odchází spolu do Bostonu, kde Leon získal stipendium ke studiu na MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Začátky v Americe byly tvrdé, bez příbuzných a známých, bez potřebného finančního zajištění. Jeho stipendium bylo tak nízké, že například první dvě zimy se museli obejít bez topení. Tyto krušné podmínky mu však neubírají chuť do studia. V roce 1961 získává titul MSEE (*Master of Science in Electrical Engineering*). V letech 1961 a 1962 pracuje pro IBM v městě Poughkeepsie v státě New York. Doktorské studium (Ph.D) pak absoluuje v roce 1964 na *University of Illinois, Urbana-Champaign*, a stačí mu k tomu necelé dva roky. Jeho teze

nesou název *Nonlinear Network Analysis — The Parametric Approach*. Školitelem byl známý Mac Van Valkenburg [3]. V roce 1964 se stává odborným asistentem (*Assistant Professor*) na *Purdue University* ve West Lafayette v Indianě a od roku 1967 zde působí jako docent (*Associate Professor*). Tvrdě na sobě pracuje a uplatňuje pracovní scénář podle schématu: návrat z práce pozdě večer a další práce do třetí do rána. Významný ohlas se dostavuje v roce 1971, kdy je ustanoven profesorem, a následně je mu nabídnuto místo na *University of California at Berkeley*. Tato slavná univerzita se stává jeho působištěm až do současnosti. Zároveň je to instituce, na jejíž půdě L. Chua dobudoval své velkolepé dílo, za něž je právem považován za otce ucelené teorie nelineárních obvodů a CNN (*Cellular Neural Networks*).

### 3 Přehled díla

Charakteristickým rysem L. Chuy je důsledné publikování stěžejních výsledků bezprostředně po jejich vzniku v prestižních časopisech (převážně IEEE). Jeho dílo je tak archivováno v uznávaných databázích a analýza příslušných článků poskytuje komplexní obraz o vývoji těch oblastí teorie obvodů od 60. let minulého století do současnosti, které vybudoval či rozvinul.

V aktuálních záznamech na *Web of Science* lze dohledat značný počet prací L. Chuy, vydaných v rozmezí let 1965–2016. Jeho nejcitovanější prací je článek *Cellular neural networks: theory* z r. 1988 v *IEEE Transactions on Circuits and Systems* [4] (přes 2700 citací). Na druhém místě je jeho slavný článek z r. 1971 *Memristor – The missing circuit element* [5] (přes 1600 citací). V následujícím textu se pokusíme o stručný přehled vybraných výsledků, kterými se navzdý zapsal do historie teorie obvodů a systémů.

#### Šedesátá léta

V rozmezí let 1965–1970 publikoval L. Chua celkem 13 článků, které se týkaly jednak analýzy, jednak syntézy nelineárních obvodů. Jeho vůbec první článek vyšel v prestižním *Proceedings of the IEEE* a zabýval se formulací podmínek, které musí být splněny, aby nelineární RLC obvod mohl být modelován stavovou rovnicí v explicitním tvaru. Je zřejmé, že Chua byl motivován tehdejšími problémy počítačového modelování složitých nelineárních obvodů, kdy vstupní branou do počítačové simulace byl stavový popis obvodu. Svědčí o tom několik jeho dalších prací, mimo jiné jeho článek *On the dynamic equations of a class of nonlinear RLC networks*, jehož druhým autorem je R. A. Rohrer ze *Stony Brook, New York*, který o rok později míří do *UC Berkeley*, kde pak stojí u zrodu standardu SPICE. V článku L. Chua děkuje za odborné diskuse řadě kolegů a tehdejších světových autorit, jako je například profesor C. A. Desoer. Modelování nelineárních systémů dotahuje do naprostých detailů. Vytváří například sofistikovaný matematický model hysterenzních jevů v nelineárních vázaných induktorech. Začíná se zabývat stabilitou nelineárních systémů. Přípravuje

<sup>1</sup> Zajímavé detaily, přibližující osobnost L. Chuy, lze dohledat v bestsellerech [1], [2] Amy Chua, nejstarší dcery L. Chuy, profesorky práv na *Yale University, Connecticut, USA*.

si půdu pro počítačovou analýzu nelineárních rezistivních obvodů s několika stejnosměrnými stavů. Buduje originální teorii *Electronic Relays*. Zabývá se rovněž výukovými aspekty počítačové analýzy obvodů.

Na základě svých výsledků z oblasti analýzy pak v druhé polovině 60. let začíná budovat moderní teorii syntézy nelineárních obvodů. Do teorie obvodů zavádí základní stavební kameny syntézy, transformační dvojbrany typu rotátor, mutátor, reflektor a skalor. Z dobových dokumentů je zřejmé, že k těmto důležitým mezníkům moderní teorie obvodů dospěl s pomocí profesora Desoera. Svoji specifickou metodu syntézy s využitím řízených zdrojů použil k syntéze již tehdy známých „exotických“ transformačních dvojbranů, jakými byly například konjunktory a traditory.

V roce 1969, tedy v jeho 33 letech, vychází v nakladatelství McGraw-Hill Chuova kniha *Introduction to Nonlinear Network Theory* [6]. S tímto dílem, monumentálním co do rozsahu a zejména idejí, se zrodila moderní teorie nelineárních obvodů.

Již v tomto počátečním období se začínají zřetelně rýsovat charakteristické znaky Chuova stylu: Matematická přesnost, hloubka, s jakou proniká pod povrch problémů, systematickosti a nekompromisní boření mýtů. Rychle si získává respekt absolutních špiček v oboru a spolupracuje s nimi. Je překvapující, že i když jsou jeho práce teoreticky velmi náročné, často jsou zakončeny do detailů dotaženou aplikační částí. Typickým příkladem jsou mutátory, obvodově navržené a realizované na tranzistorové úrovni.

S odstupem času, kdy máme možnost hodnotit jeho dílo jako celek, se ukazuje, že Chua již z prvních přístupů k budování moderní teorie obvodů systematicky od základů až po střechu tak, jako kdyby měl již v té době přesnou představu o konečné podobě stavby. Zákonitosti této evoluce jsou neúprosné a směřují k memristorům, k Chuově pseudo-periodické tabulce fundamentálních prvků elektrotechniky, k Chuovým obvodům, k neuronovým sítím, k chaosu, k zobecněnému termodynamickému zákonu a posléze k zobecnění Wolframovy koncepce „nového druhu vědy“.

### Sedmdesátá léta

V průběhu 70. let Chua vybudoval podstatnou část moderní teorie nelineárních obvodů. Velké úsilí věnuje obvodům s po částech lineárními charakteristikami ( $PWL = Piece-Wise-Linear$ ), a to jak jejich analýze (odvodil metody počítačové analýzy, založené na  $PWL$  modelech včetně algoritmů, které jsou alternativou Newtonovy-Raphsonovy iterační metody a překonávajících konvergenční problémy s ní spojované; podstatně zobecnil původní diakoptickou metodu analýzy složitých obvodů G. Krona, atd.), tak zejména syntéze (zavedl kanonické reprezentace  $PWL$  obvodů a studoval jejich obecné vlastnosti). Jako kdyby si připravoval cestu k objevům, které učinil později (Chuovy obvody, vázané oscilátory, memristory): Dynamické  $PWL$  systémy jsou totiž zajímavé jak z hlediska jejich poměrně snadné konstrukce a analýzy, tak i proto, že mohou vykazovat různé druhy bifurkací a chaotického chování a dalších projevů hodných studia. Věnoval se syntéze nelineárních systémů s předepsanými singularitami. Zkoumal vliv parazitních reaktančních prvků na vlastnosti, zejména pasivitu nelineárních obvodů, a položil tak mimo jiné fundovaný teoretický základ Greenovy teorie tzv. potenciální DC stability rezistivních systémů, „objevené“ o 20 let později.

V tomto období Chua píše „abecedu“ modelování nelineárních systémů. Jasně definuje pojem „konstituční relace“ nelineárního dvoj pólu a koncept „správného modelování“ (model objektu musí záviset jen na objektu samém a nikoliv na jeho okolí). Buduje teorii nelineárních třípólů a  $N$ -pólů a formuluje mnoho obvodových teorémů. Jako zajímavost je možno uvést Chuovo rozšíření všeobecně známé poučky o transfiguraci hvězda-trojúhelník na nelineární obvody. Píše zásadní práce na téma stability autonomních reciprocitních nelineárních obvodů a zabývá se problematikou periodických řešení neautonomních obvodů. Chua si uvědomuje, že další rozvoj analýzy a syntézy nelineárních obvodů nebude možný bez zobecnění dosud známých nástrojů pro topologickou analýzu na bázi grafů. Proto buduje příslušný *Graph-theoretic concept*. Spolu s J. Vandewallem rozvíjí tzv. *Colored Branch Theorem*. To, jak opět „myslí dopředu“, dokládá jeho předposlední věta v abstraktu článku [7]: „*Many graph-theoretic corollaries are derived, which may facilitate later use*“. Zobecňuje svůj model hystereze. Buduje ucelenou teorii kmitočtové analýzy nelineárních systémů s využitím Volterrových řad. Zavádí přenosové funkce nelineárních obvodů.

Čtyři práce L. Chuy ze 70. let jsou zvláště specifické v kontextu dalšího vývoje oboru: Zavedení memristoru [5] a memristivních systémů [8] do teorie obvodů v letech 1971 a 1976 (velkolepá renaissance těchto vizí počíná rokem 2008), aplikace Hopfova bifurkačního teorému k studiu nelineárních oscilací v roce 1979 [9] (zárodek komplexní teorie chaosu), a formulace konceptu tzv. prvků vyšších řádů v roce 1980 [10] (Chuova tabulka fundamentálních prvků, tj. „stavebních kamenů“ elektrotechniky, dnes vysoce aktuální v souvislosti s vývojem nekonvenčních pamětí pro počítačový průmysl).

S odstupem času je možno odvodit z prací L. Chuy ze 70. let poznání, které je povznášející i skličující zároveň: Chua měl detailně promyšleno mnoho věcí, které však již neměl čas dále rozvíjet. Zřejmě se domníval, že z toho, co publikoval, detaily snadno odvodí někdo jiný. Bohužel se však nenašlo mnoho těch, kteří by toho byli schopni. Proto je celá řada současných „objevů“ pouze znovuobjevováním toho, co již bylo dříve popsáno náročným matematickým jazykem v klasických pracích L. Chuy.

### Osmdesátá léta

Začátkem 80. let Chua vnáší řád do odporových nelineárních  $n$ -branů. Zkoumá je z „geometrického pohledu“, kdy výsledky nezávisí na pohledu „topologickém“, tj. na volbě stromu, smyček, řezů apod. Zavádí pojmy slabě regulární, regulární, zcela regulární a univerzálně regulární  $n$ -brany a definuje jejich transverzalitu a strukturální stabilitu. Z tohoto geometrického pohledu analyzuje reciprocitu a antireciprocitu. V článku [11] formuluje řadu zásadních teorémů, týkajících se kvalitativních aspektů nelineárních RLC obvodů (*impasse point, local solvability, finite-forward-escape-time solution, invariant submanifold* atd.). Analýzou těchto příznaků lze rozhodnout, zda příslušné systémy jsou či nejsou fyzikálně realizovatelné. Později definuje *strong structural stability*. Chua od základů přehodnocuje soudobé definice pasivity. Pasivitou se intenzivně zabývá poté, co v r. 1971 zavedl do teorie obvodů memristor [5] a předpověděl, že memristor bude v budoucnu vyroben jako pasivní součástka. Odhaluje zajímavé souvislosti mezi pasivitou, stabilitou a bezztrátovostí. Rozpracovává svoji teorii nelineárních prvků vyšších

řádů do detailů, které jsou klíčem k řešení řady problémů dnešní teorie obvodů (například kolik je fundamentálních pasivních prvků elektrotechniky).

Dílo L. Chua, které vytvořil v 80. letech, je natolik rozsáhlé, že jen výčet jeho článků z tohoto období by zaplnil několik stran. V roce 1985 zavádí koncept *Fading Memory*, který je znovuobjeven v roce 2016 v souvislosti s anomálním chováním tzv. HP memristoru. Zkoumá podmínky jednoznačnosti řešení nelineárních modelů, definuje *Integral Manifold*, a od roku 1983 rozpracovává teorii chaosu. V roce 1985 popisuje slavný *Double Scroll* a přichází éra *Chua-Family Circuits*, jimiž vytváří most mezi matematiky typu Cartwright a Levinson a teoretiky z oblasti obvodů a zpracování signálů.

V druhé polovině 80. let Chua pokládá další důležitý stavební kámen současných technických věd: Vychází z empirických výsledků Hopfielda z roku 1984 a předkládá rigorózní analýzu neuronových sítí a jejich využití pro nelineární programování. V roce 1988 publikuje zásadní články [4] a [11], v nichž popisuje teorii a aplikace CNN do detailů. Jeho dílo ze závěru dekády lze charakterizovat jako v strhujícím tempu míchaný koktejl různých odborných témat, v němž převažuje problematika chaosu, fraktálů, Chuových obvodů a CNN.

#### Devadesátá léta

V průběhu 90. let publikoval Chua přes 250 článků, z nichž většina se týkala Chuových obvodů, chaosu a CNN. Zatímco pro ranou tvorbu L. Chua byly charakteristické články, které vytvořil jako jediný autor, v průběhu 80. letch již pracoval v různorodých týmech, a tento trend v 90. letech ještě zesílil. Jednou z příčin byl aplikační potenciál chaotických systémů (zejména pro telekomunikace) a neuronových sítí, který přitahoval pozornost aplikačně orientovaných autorů. Kromě toho však L. Chua paralelně pracoval na řadě dalších témat klasické teorie obvodů. Uvedme alespoň tyto: Systémy s po částech lineárními charakteristikami a jejich kanonické formy. Potenciálové funkce nelineárních systémů. Globální optimalizace. Teoretické otázky AD a DA převodu a digitální filtrace. Hledání univerzální teorie stability. Zavedení konceptu komplexity. Vztah pasivity a komplexity.

Ke konci 90. let Chua pracuje na jedné ze svých velkých myšlenek, kterou nazývá *The edge of chaos*.

#### Nové tisíciletí

Na začátku nového tisíciletí věnuje L. Chua značné úsilí studiu fundamentálních problémů, v nichž vidí klíč k dalším pokrokům v oblasti chaotických systémů, CNN a celulárních automatů (CA). Rozvíjí své původní koncepce lokální aktivity a komplexity ve vztahu k chaosu a rozpracovává svoji myšlenku *The edge of chaos*. Studuje Wolframovu<sup>2</sup> koncepci nového druhu vědy (*Wolfram's new kind of science*) [12]. Ta je založena na obecných pravidlech, která fungují jako jednoduchý počítačový program (celulární automat, což je deterministický dynamický systém pracující diskretně v čase na základě pravidel). Tato pravidla však Wolfram stanovuje na základě empirického poznání. Chua se pokouší doplnit Wolframovu koncepci o rigorózní matematický aparát, který postupně publikuje v rozsáhlém čtrnáctidílném seriálu článků

v časopise *Int. J. of Bifurcation and Chaos*. Toto dosud nedokončené dílo, které představuje nádherné prolínání vědy, umění a tvořivosti, je možno pokládat za vyvrcholení Chuovy tvorby. Je neuvěřitelné, že první výsledky zveřejňuje ve stejném roce (2002), kdy vychází Wolframova kniha [12]. V prvním dílu [13] zavádí fundamentální koncept *linear separability* a zkoumá celulární automaty z pohledu nelineární dynamiky (objasňuje význam Wolframovy myšlenky *Threshold of Complexity* v kontextu nelineární dynamiky, ukazuje, že CA je speciálním případem CNN, atd.). Chua tak otevírá novou cestu pro studium celulárních automatů. V dalších dílech rozvíjí tuto ideu a překračuje současné hranice technických věd. Například sedmý díl jeho díla se nazývá: *A nonlinear dynamics perspective of Wolfram's new kind of science. Part VII: Isles of Eden*. Vzniká tak fascinující propojení dvou světů: Chuovy koncepce nelineární dynamiky a Wolframovy koncepce nového druhu vědy.

V roce 2008 prožívá L. Chua velkou osobní satisfakci. V laboratořích Hewlett Packard vyrobili nanosoučástku, která se chová obdobně jako memristor, zavedený do teorie obvodů L. Chua v roce 1971. V průběhu uplynulých 37 letch však měl Chua články jen minimální odezvu. Z originálního textu z roku 1971 je především zřejmé, že již tehdy autor viděl podstatně dále než jeho současníci i následovníci z další generace, pokud jde o praktický význam objevu. Článek obsahuje úvahu, že daný fundamentální prvek bude v budoucnu objeven ve formě *solid-state device*. Takováto předpověď na 37 let dopředu je znakem skutečného vizionáře, kterým již tehdy ve svých 35 letech L. Chua zajisté byl. Zpočátku Chua sledoval s nadšením zájem průmyslových kruhů o memristor jakožto revoluční součástku pro počítačové paměti a pro účinnou implementaci systémů, založených na jeho dalším „dítěti“ – CNN. Brzo si však začal uvědomovat, že nedostatečné teoretické znalosti aplikačních inženýrů brzdí jejich snahu o rychlé zavádění memristivních systémů do praxe. Z osobních kontaktů s prof. Chuou vyplývá, že brzký nástup memristorů vytušil již těsně po roku 2000. Dokladem je jeho publikace [14] z roku 2003. Jde o tutoriál, jehož prostřednictvím se pokusil odborné veřejnosti přístupným způsobem (z jeho pohledu) přetlumočit podstatné myšlenky z jeho předešlých prací o zásadách správného modelování nelineárních dvojpolů, o memristorech a dalších prvcích vyšších řádů. Náhorně zde ukazuje význam pseudoperiodické tabulky fundamentálních prvků pro nastupující éru nanoelektroniky. Rozšiřuje princip paměťového efektu rovněž na kapacitory a induktory (v podstatě tak již učinil v roce 1980 v článku [10], který je však pro běžného elektrotechnika málo čitelný). Trpělivě vysvětluje podstatu memristoru, memkapacitoru a meminduktoru na řadě vyzvaných přednášek, intenzívně cestuje. Píše několik dalších rozsáhlých tutoriálů. Zavádí novou klasifikaci memristivních systémů (ideální memristor, ideální generický memristor, generický memristor, rozšířený – *extended* – memristor), nové charakteristiky těchto memristorů (PSM = *Parameter vs State Map*, POP = *Power-Off Plot*, DC *V-I Plot*, *Shoelace DC V-I Plot*, *Quasi DC V-I Plot*) a s nimi spojené nové obvodové teoremy. Z jeho nedávných výsledků lze usuzovat, že memristivní systémy zakomponovává do svého uceleného systému *Nonlinear dynamics perspective of Wolfram's new kind of science*.

<sup>2</sup> Stephen Wolfram, britský fyzik, matematik a obchodník, tvůrce počítačového programu Mathematica.

#### 4 Leon Chua a teorie obvodů v ČR (ČSSR)

Jméno Chua bylo známé celé řadě studentů elektrotechnických fakult z VUT Brno a ČVUT Praha již v dobách před rokem 1989, zejména studentům významných profesorů, kteří s L. Chuou udržovali těsné odborné i osobní kontakty navzdory tomu, že tehdejší politický režim spolupráci s USA rozhodně nepodporoval a Chuova učebnice [6] tudíž nebyla na seznamu doporučené studijní literatury. Informace o memristoru však rychle pronikla přes železnou oponu hned po jeho publikování v roce 1971. Na obou největších elektrotechnických fakultách se teorie nelineárních obvodů vyučovala podle [6] již od konce 60. let. Kniha autorů Kouřil a Vrba *Teorie nelineárních a parametrických obvodů* (SNTL/ALFA, 1982), založená na Chuově konceptu, vyšla v roce 1988 v anglickém překladu v nakladatelství Ellis Horwood [15] a dodnes je vysoce ceněna zejména v zahraničí.

Přestože v 70. a 80. letech práce L. Chuy v oblasti memristorů a dalších nekonvenčních obvodových prvků, jakož i jejich vzájemných transformací pomocí mutátorů nezaznamenaly příliš velký ohlas, u nás byly v té době předmětem výzkumu a experimentálních prací (např. prof. Pospíšil a prof. Brzobohatý z VUT Brno). Skupina kolem prof. Pospíšila rozvíjela Chuův koncept kanonických PWL obvodů a zabývala se rovněž chaotickými systémy. To vše bylo umocňováno osobními kontakty, které byly navazovány s L. Chuou někdy od druhé poloviny 60. let, kdy bylo možno vyjždět na zahraniční konference. Z paměti prof. Josefa Čajky [16] vyplývá, že L. Chua udržoval s některými českými akademiky (Čajka, Kvasil, Mann, Pospíšil, Brzobohatý a další) těsné osobní kontakty a byl například jejich osobním hostem během jeho několika návštěv naší republiky, jakož i on hostil je u něj v Kalifornii. Jakožto bývalý student prof. Čajky si pamatují jeho slavné historky, kterými nás bavil začátkem 80. let a v nichž figuroval i jeho přítel Chua. Před několika lety jsme měli vzácnou možnost převyprávět je prof. Chuovi přímo v Brně, kam zavítal na neformální návštěvu v rámci naší odborné spolupráce v oblasti memristivních systémů.

#### 5 Odkaz L. Chuy

V souvislosti s významnými badatelskými počiny na poli vědy sám L. Chua nabádá k důslednému rozlišování mezi termíny *invention* (vynález, idea, nápad) a *discovery* (objev, odhalení). Vynález letadla je něco jiného než odhalení přírodního principu, který umožňuje létat (nejen letadlům). Celoživotní dílo L. Chuy je o odhalování složitých přírodních principů, které zde byly před člověkem a fungují nezávisle na něm. Na ostatních pak nechával, aby jím odhalené principy využívali k vynalézání chytrých a užitečných systémů. Pro dnešní konzumní dobu je příznačné, že často ignorujeme kauzalitu *discovery* → *invention* a upřednostňujeme fungující vynálezy před hlubokou znalostí a pochopením přírodních principů, bez nichž by ale fungovat nemohly.

K dokreslení podstaty Chuova odkazu lze použít „Chuův memristor“. Nejde o vynález, i když slovo „memristor“ figuruje na celé řadě amerických patentů, nýbrž o fundamentální přírodní princip. L. Chua objevil tento princip, který je trvale platný, podobně jako je trvale platný druhý termodynamický zákon, kdy teplo proudí vždy z horkého do chladného místa. Nejpraktičtější význam takového principu spočívá v tom, že podle něj takto „fungují věci kolem nás“.



Profesor Chua na návštěvě pracoviště autora článku dne 13. června 2012. V popředí se nacházejí marcipánové memristory, memkapacity a meminduktory, zhotovené při příležitosti 76. narozenin hosta.

Memristor jako trvale platný princip znamená, alespoň v doméně elektrotechnické, stavově závislý Ohmův zákon. Podle něj je „memristance všude okolo nás“. I kus vodiče se chová jako memristivní systém, jehož odpor závisí na stavové veličině – teplotě. Memristivní projevy jsou typické jak pro termistor či žárovku, tak i pro nervovou synapsi. L. Chua odhalil jednak identifikační znaky memristorů, jednak i podmínky, které musí memristivní systém splňovat, aby byl užitečný pro počítačový průmysl (např. znak *nevolatility*). Další význam objevu L. Chuy spočívá v tom, že jej zasadil do stávajícího řádu v teorii obvodů, který později rozvinul do teorie prvků vyšších řádů - *Higher-Order Elements* (HOE). V 80. letech minulého století tak ukázal, že memristor je jen špičkou ledovce. Dalším generacím výzkumníků tak předal nástroj univerzálního modelování „čehokoliv v elektrotechnice“. Ještě důležitější je však jiný aspekt HOE: každý z těchto prvků, z nichž většina dosud čeká na jejich „objevení“, představuje, podobně jako memristor, trvale platný přírodní princip. Díky L. Chuovi a pokrocích v technologiích jsou nyní zkoumány dva z nich (memkapacitance a meminduktance), opět z pohledu jejich možného využití pro počítačový průmysl.

Význam Chuova objevu principu, skrývajících se za memristorem, resp. za celou množinou dalších HOE, však ve skutečnosti přesahuje rámec elektrotechniky. Ukazuje se, že Chuova periodická tabulka fundamentálních prvků

elektrotechniky, postavená na konstitučních proměnných typu napětí-proud a jejich derivacích či integrálech, je jen průmětem obecnější soustavy, postavené na proměnných typu *effort* a *flow*, do roviny EE (*Electrical Engineering*). Memristor jako princip se proto uplatňuje i v jiných doménách, například v mechanice, v chemii nebo v termodynamice. Svou periodickou tabulkou tak L. Chua paralelně vybudoval krásný řád i v dalších vědních disciplínách. Ukázal nejen to, že „elektrické“ HOE budou v blízké budoucnosti využity k studiu jevů v nanoelektronice. Dosud nezmapované jsou HOE například v mechanice, o čemž svědčí poměrně nedávný objev inerteru, jehož linearizovaná verze je známa jako *J-Damper*, používaný ve vozzech *Formula One*. Ve skutečnosti jde o mechanický prvek o souřadnicích (0,1) z Chuovy tabulky, ovšem v mechanické soustavě *effort* = síla a *flow* = rychlost. Chuova tabulka je však platná například i pro sociální vědy. Lze si představit, jak užitečné by mohlo být, kdyby principy s ní spojené pochopili dnešní ekonomové, sociologové či právníci.

Výše zmíněný přesah díla L. Chuy do různých vědních disciplín je pro něj charakteristický. Zřejmě nejvíce je patrný z Chuova spojování jím vybudované nelineární dynamiky a Wolframovy koncepce nového druhu vědy. Zde je vhodné zmínit Chuův prozatím nejvýznamnější objev, princip lokální aktivity a jeho nádherný matematický model, zvaný *The edge of chaos*. Jak sám Chua píše v osobní korespondenci s autorem tohoto článku, v tomto principu je zakódován původ všech nelineárních jevů, dosud publikovaných v literatuře pod označením *complexity*. Lokální aktivita je v podstatě to, co měl na mysli Schrödinger, když vytvořil termín *negentropy* – zápornou entropii. Princip lokální aktivity je chybějící doplněk druhého termodynamického zákona, který hovoří o tom, že entropie nemůže klesat v čase. Řada současných vědců nazývá tento Chuův princip lokální aktivity čtvrtým termodynamickým zákonem. Jde o univerzální princip, platný pro všechny vědní oblasti, přírodní i společenské. Lze předpokládat, že jeho praktický význam poroste, jakmile se výzkumníci naučí využívat jej k řešení současných problémů lidstva, například k objasňování příčin extrémních jevů jako jsou hurikány, zemětřesení, tsunami, krachy na burzách či sociální bouře.

Závěrem dovolte citaci z návrhu na udělení zlaté Edisonovy medaile IEEE prof. Chuovi v roce 2016 za jeho objevné práce v oblasti memristorů:

*In 1879, T. A. Edison succeeded in producing the first practical incandescent electric light bulb. However, today we know that Edison's bulb is a kind of Chua's memristor. The IEEE Edison Medal would be also a worthy evaluation of the merit of L. O. Chua on the occasion of his oncoming eightieth birthday in 2016.*

*V roce 1879 se T. A. Edisonovi podařilo vyrobit první prakticky fungující elektrickou žárovku. Dnes však víme, že Edisonova žárovka je speciální typ Chuova memristoru. IEEE Edisonova medaile by tak mohla být významným oceněním zásluh L. O. Chuy při příležitosti jeho nadcházejících osmdesátých narozenin v roce 2016.*

## Literatura

- [1] Chua, A. *Day of Empire*. Doubleday, New York, 2007.
- [2] Chua, A. *Battle Hymn of the Tiger Mother*. The Penguin Press, New York, 2011.
- [3] Trick, T. N. Mac Elwyn Van Valkenburg. In Memoriam. *Proceedings of the IEEE*, 1997, vol. 85, no. 11, p. 1675-1677.
- [4] Chua, L. O., Yang, L. Cellular neural networks: theory. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1988, vol. 35, no. 10, p. 1257-1272.
- [5] Chua, L. O. Memristor – The missing circuit element. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1971, vol. 18, no. 5, p. 507-519.
- [6] Chua, L. O. *Introduction to nonlinear network theory*. McGraw-Hill, 1969.
- [7] Vandewalle, J., Chua, L. O. The colored branch theorem and its applications in circuit theory. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1980, vol. 27, no. 9, p. 816-825.
- [8] Chua, L. O., Kang, S. M. Memristive devices and systems. *Proceedings of the IEEE*, 1976, vol. 64, no. 2, p. 209-223.
- [9] Mees, A. I., Chua, L. O. The Hopf bifurcation theorem and its applications to nonlinear oscillations in circuits and systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1979, vol. 26, no. 4, p. 235-254.
- [10] Chua, L. O. Device modeling via basic nonlinear circuit elements. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1980, vol. 27, no. 11, p. 1014-1044.
- [11] Chua, L. O., Yang, L. Cellular neural networks: applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1988, vol. 35, no. 10, p. 1273-1290.
- [12] Wolfram, S. *A new kind of science*. Wolfram Media, Inc., 2002.
- [13] Chua, L. O., Yoon, S., Dogaru, R. A nonlinear dynamics perspective of Wolfram's new kind of science. I. Threshold of complexity. *International Journal of Bifurcation & Chaos in Applied Sciences & Engineering*, 2002, vol. 12, no. 12, p. 2655-2766.
- [14] Chua, L. O. Nonlinear circuit foundations for nanodevices. I. The four-element torus. *Proceedings of the IEEE*, 2003, vol. 91, no. 11, p. 1830-1859.
- [15] Kouřil, F., Vrba, K. *Nonlinear and Parametric Circuits: Principles, Theory and Applications*. Ellis Horwood Ltd, 1988.
- [16] Čajka, J. *Paměti*. Díl 2 a 4. Brno, 2000.