

# Simulácia nelineárneho rezistora metódou STA pomocou aplikácie vytvorenej v MATLAB GUI

<sup>1</sup>Jozef DZIAK

<sup>1</sup> Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky,  
Technická univerzita v Košiciach, Slovenská republika

<sup>1</sup>jozef.dziak@tuke.sk

**Abstrakt** — Tento článok sa venuje vytváraniu všeobecných simulačných modelov nelineárneho rezistora a simulácii tohto prvku v aplikácii vytvorenej pomocou toolboxu nástroja MATLAB určeného na vytváranie používateľských prostredí. Modelu sú určené na simulovanie netradičných reálnych nelineárnych prvkov, napr. prvkov s netradičnými voltampérovými charakteristikami. Vytvorená aplikácia sa používa na simuláciu lineárnych a nelineárnych obvodov napájaných jednosmernými alebo harmonickými zdrojmi. Na zostavenie systému rovníc obvodu sa v nej využíva metóda STA a na jeho vyriešenie Newtonova iteračná metóda.

**Kľúčové slová** — MATLAB GUI, Metóda STA, Modely reálnych prvkov, Simulovanie obvodov

## Simulation of nonlinear resistor by Sparse Tableau Analysis using application created by MATLAB GUI

**Abstract** — This article is deal with creating general simulation models of nonlinear resistors and simulating this element in an application created by MATLAB toolbox called GUI designed for creating user environments. The models are designed to simulate unconventional real nonlinear elements, eg. elements with unconventional volt-ampere characteristic. The created application is used to simulate linear and nonlinear circuits powered by DC or harmonic sources. Application uses the STA method to build a circuit equation system and the Newton iteration method to solve it.

**Keywords** — Circuit simulation, MATLAB GUI, Real elements models, Sparse Tableau Analysis

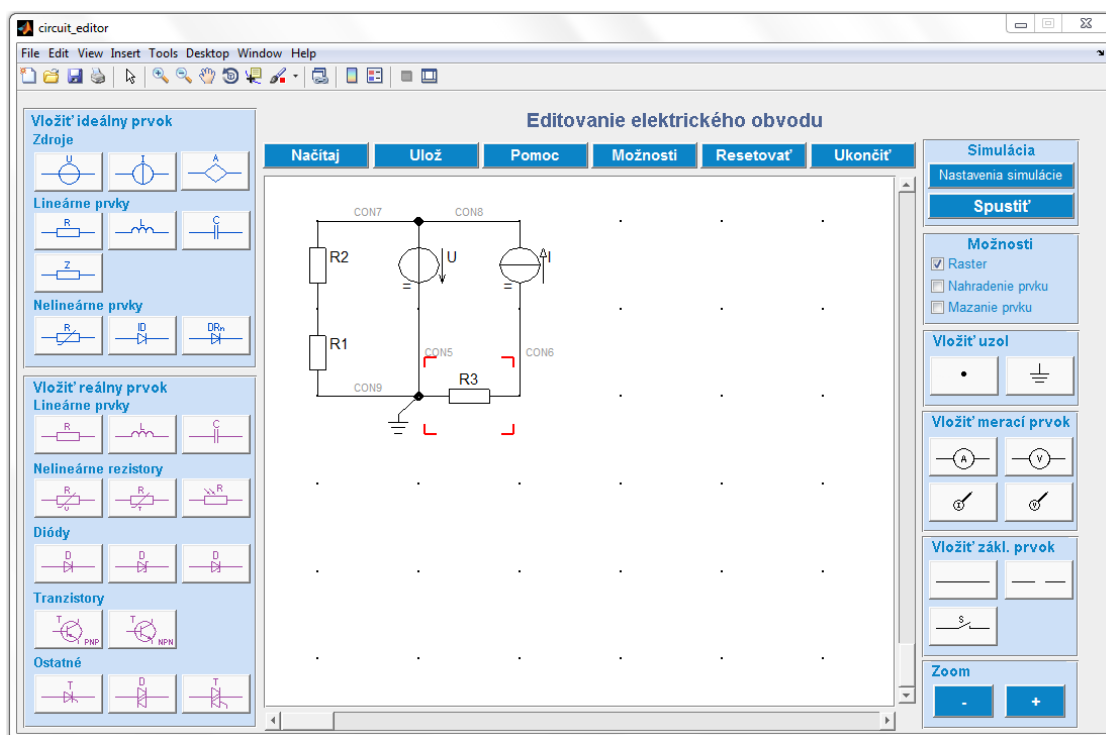
### I. ÚVOD

Simulácia elektrického obvodu sa používa prevažne v dvoch prípadoch, a to ak je potrebné overiť fungovanie alebo vytvoriť matematický model existujúceho obvodu, alebo sa ešte pred zostaveným obvodom overujú vlastnosti a jeho fungovanie. V prvom prípade je potrebné vytvoriť model existujúceho obvodu alebo zariadenia a napr. zistiť jeho správanie v jeho hraničných pracovných podmienkach, alebo určiť vplyv zmeny v obvode, popr. zistiť akú zmenu je potrebné vykonať pre používateľom požadovanú zmenu funkcie obvodu, atď. V druhom prípade je simulácia priamo jedným z krokov výroby elektrického obvodu. Je vopred určená funkcia elektrického obvodu, jeho vlastnosti a správanie a je potrebné tento obvod zostaviť. Opäť sa simulácia javí vhodnejšia ako experimentálne zisťovanie, popr. experimentálne overovanie správnej činnosti. Simuláciu je možné použiť nie len na zostavenie a overenie vlastností, ale priamo na overenie všetkých funkcií alebo fungovania obvodu v súčinnosti s inými obvodmi alebo zariadeniami.

## II. APLIKÁCIA NA SIMULOVANIE OBVODOV VYTVORENÁ V MATLAB GUI

Pre potreby simulovania elektrických obvodov je možné využiť programovateľné prostriedky MATLABu, ktoré nie sú založené na grafickom základe. Ide o programové nástroje slúžiace na algoritmizáciu a návrh algoritmu (použitie m-filu, command window a pod.). Ak sa tieto nástroje doplnia o grafické prostredie, je možné vytvoriť plnohodnotnú aplikáciu na simuláciu obvodov. Podobný spôsob bol použitý a je popísaný v [1].

Samotná aplikácia bola vytvorená pomocou grafického editora s názvom GUI Layout Editor, ktorý je súčasťou toolboxu GUI. Programová časť aplikácie bola vytvorená štandardne pomocou súborov typu m-file. Po spustení vytvorenej aplikácie sa zobrazí grafické prostredie určené pre vytvorenie a editáciu elektrického obvodu (Obr. 1). Prostredie ponúka základnú sadu nástrojov pre vytváranie obvodu a to vkládanie prvkov, mazanie prvkov, ukladanie rozpracovaných alebo hotových projektov, načítanie starších uložených projektov a rôzne ďalšie. Rovnako aj prostredie na nastavenie typu a parametrov simulácie a vytváranie systému rovníc, jeho riešenie a následného zobrazenia výsledkov simulácie. Viac informácií o tejto aplikácii je uvedených v [2].



Obr. 1 Prostredie aplikácie pre editovanie elektrického obvodu

## III. SIMULÁCIA NELINEÁRNYCH OBVODOV POMOCOU METÓDY STA

Systém rovníc popisujúci nelineárny obvod vo všeobecnosti pozostáva z  $k$  nelineárnych rovníc s  $k$  neznámymi a môžeme ho vyjadriť v tvare (1). Vektor neznámých  $\mathbf{x}$  (2) pozostáva z vektora vetvových prúdov  $\mathbf{i}$ , vektora vetvových napätí  $\mathbf{u}$ , a vektora uzlových napätí  $\mathbf{v}$ .

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Nelineárny ideálny prvok je prvok, ktorého parameter nie je konštanta, ale závisí od napätia  $u_x$  na tomto prvku alebo prúdu  $i_x$ , ktorý ním preteká. Nelineárny prvok je možné popísať aj jednou z nelineárnych rovníc  $i_x = f(u_x)$  alebo  $u_x = f(i_x)$  [3]. Ak počet rovníc popisujúcich nelineárny obvod je  $k = 2m + n$  a  $p$  je počet nelineárnych prvkov obvodu, potom pre získanie popisu nelineárneho obvodu metódou STA musíme k lineárnemu STA systému rovníc priradiť popisy nelineárnych prvkov v obvode. Priradenie popisov nelineárnych prvkov k lineárnemu STA systému je možné vyjadriť ako (3), kde  $\mathbf{H}$  je matica koeficientov  $h_{j,l}$  pre  $j = 1, 2, \dots, k$  a  $l = 1, 2, \dots, p$ , a  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  je stĺpcový vektor, obsahujúci popis nelineárnych prvkov obvodu  $g_j(\mathbf{x})$  pre  $j = 1, 2, \dots, p$ .

$$\mathbf{H} \cdot \mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad (3)$$

Týmto postupom získame úplný systém rovníc metódy STA pre popis nelineárnych obvodov(4) (ďalej len nelineárny STA systém), kde **A** je uzlová incidenčná matica, **E** jednotková matica, **Z** impedančná matica, **Y** admitančná matica a **s** vektor napätí a prúdov nezávislých zdrojov. Detailnejší popis vytvárania systému rovníc pomocou STA je uvedený v [4] a [5].

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} & -\mathbf{A}^T \\ \mathbf{Z} & \mathbf{Y} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{s} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Po vyriešení zostaveného nelineárneho STA systému získame hodnoty prúdov tečúcich ideálnymi prvkami, napätí v uzloch obvodu a hodnoty napätí na ideálnych prvkoch.

#### IV. VŠEOBECNÉ MODELY NELINEÁRNEHO REZISTORA

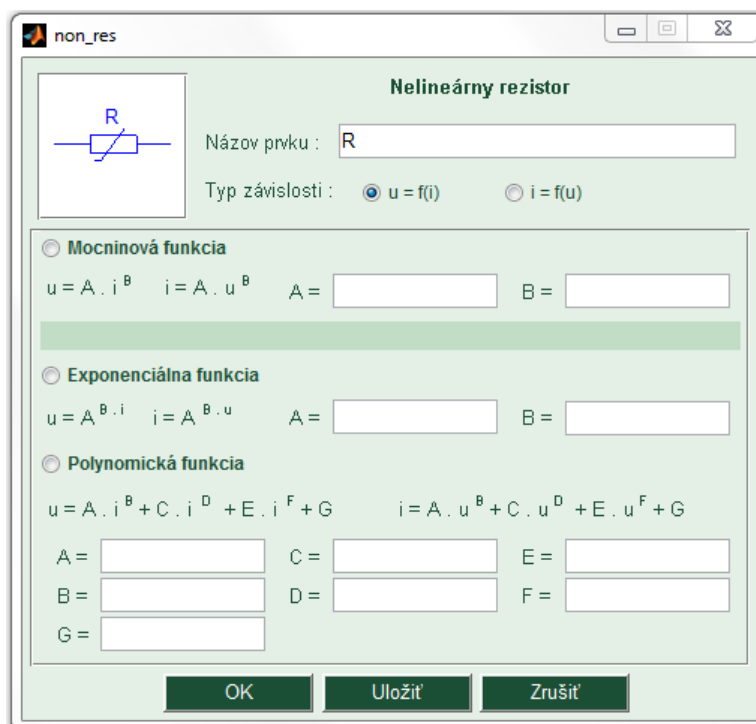
Nelineárny rezistor sa používa v modeloch prvkov, u ktorých zmenou napätia na nich alebo prúdu tečúceho cez ne dochádza k zmene elektrického odporu tohto prvku. Nie je to prvok, ktorý je popísaný iba jedným parametrom ako lineárne prvky. Je vhodné popísať ho funkciou, ktorá vyjadruje závislosť odporu rezistora od napätia na ňom alebo prúdu, ktorý ním tečie. Túto závislosť je možné vyjadriť pomocou matematickej funkcie popisujúcej vzťah medzi napätím a prúdom tohto prvku.

Uvažujme elektrický obvod s  $n$  nezávislými uzlami (vrátané vnútorných uzlov) a  $m$  ideálnymi prvkami obvodu (pri simulácii totožný s počtom vetiev). V tomto obvode sa bude nachádzať  $p$  nelineárnych prvkov, ktoré sú popísané závislosťou prúdu nimi tečúceho od napätia na nich alebo naopak. Nech je nelineárny rezistor  $r$ -tým v poradí nelineárnych ideálnych prvkov a nachádza sa vo vetve s poradovým číslom  $b$ , ktorá je medzi uzlami s poradovými číslami  $c$  a  $d$  a je nech je orientovaná z uzla  $c$  do uzla  $d$ . Potom prvky matic a vektorov nelineárneho STA systému odpovedajúce modelu nelineárneho rezistora sú uvedené v Tabuľke I. Prvky sa líšia podľa toho či bola použitá závislosť napätia prvku od prúdu ním tečúceho alebo naopak prúdu od napätia.

Tabuľka I

Prvky matic nelineárneho STA systému pre všeobecný model nelineárneho rezistora.

	Matica A	Matica Z	Matica Y	Matica H	Vektor g(x)	Vektor s
<b>Rozmer</b>	$n \times m$	$m \times m$	$m \times m$	$2m+n \times p$	$p \times 1$	$2m+n \times 1$
<b>Závislosť <math>i_j = f(u_j)</math></b>	$a_{b,c} = 1 ; a_{b,d} = -1$	$Z_{b,b} = 1$	$Y_{b,b} = 0$	$H_{b,r} = -1$	$g(x)_r = f(x)$	$s_{b+m+n} = 0$
<b>Závislosť <math>u_j = f(i_j)</math></b>	$a_{b,c} = 1 ; a_{b,d} = -1$	$Z_{b,b} = 0$	$Y_{b,b} = 1$	$H_{b+m,r} = -1$	$g(x)_r = f(x)$	$s_{b+m+n} = 0$



Obr. 2 Prostredie pre editáciu parametrov v aplikácii vytvorenej pomocou MATLAB GUI

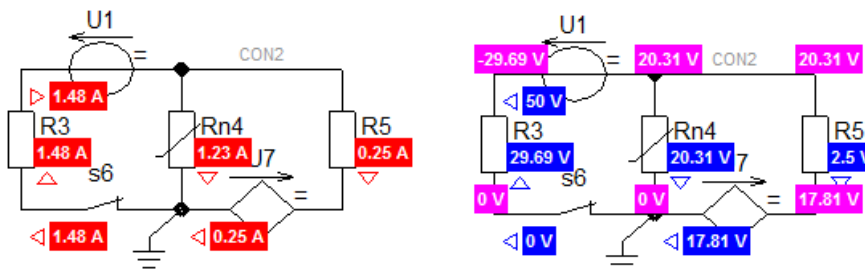


Pred spustením simulácie bola nastavená presnosť riešenia nelineárneho systému rovníc na hodnotu  $10^{-5}$  a typ simulácie na simuláciu pracovného bodu v jednosmernom obvode. Uzol 5 bol aplikáciou zvolený za nezávislý. Postupné riešenie systému nelineárnych rovníc pomocou Newtonovej iteračnej metódy je uvedené v Tabuľke II. Po štvrtom priblížení bola dosiahnutá požadovaná presnosť a teda v poslednom stĺpci sú výsledky simulácie tohto obvodu.

Tabuľka II  
Postup riešenia zostaveného systému nelineárnych rovníc pomocou Newtonovej iteračnej metódy.

Vektor	Neznáma	0. priblíženie	1. priblíženie	2. priblíženie	3. priblíženie	4. priblíženie
<b>i</b>	$I_1$	0	1,1905	1,4861	1,4843	1,4843
	$I_2$	0	1,1905	0,2445	0,2503	0,2503
	$I_3$	0	-1,1905	-1,4861	-1,4843	-1,4843
	$I_4$	0	0	1,2415	1,234	1,234
	$I_5$	0	1,1905	0,2445	0,2503	0,2503
	$I_6$	0	-1,1905	-1,4861	-1,4843	-1,4843
	$I_7$	0	-1,1905	-0,2445	-0,2503	-0,2503
<b>u</b>	$U_1$	0	-50	-50	-50	-50
	$U_2$	0	0	0	0	0
	$U_3$	0	-23,8095	-29,7216	-29,6857	-29,6857
	$U_4$	0	26,1905	20,2784	20,3143	20,3143
	$U_5$	0	11,9048	2,4454	2,5029	2,5029
	$U_6$	0	0	0	0	0
	$U_7$	0	-14,2857	-17,833	-17,8114	-17,8114
<b>v</b>	$V_1$	0	-23,8095	-29,7216	-29,6857	-29,6857
	$V_2$	0	26,1905	20,2784	20,3143	20,3143
	$V_3$	0	26,1905	20,2784	20,3143	20,3143
	$V_4$	0	0	0	0	0
	$V_5$	0	14,2857	17,833	17,8114	17,8114

Aplikáciou boli v prostredí pre zobrazenie výsledkov vygenerované numerické výsledky simulácie obvodu. Prúdy jednotlivých prvkov sú zobrazené na Obr. 4 vľavo a napätia na prvkov (modrou) a v uzloch (ružovou) obvodu zobrazené na Obr. 4 vpravo.



Obr. 4 Prostredie pre editáciu parametrov v aplikácii vytvorenej pomocou MATLAB GUI

#### LITERATÚRA

- [1] LEE Jingxiu – ZHANG Weijuan : Development of visual circuit calculation software based on MATLAB GUI. Shanghai: 2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer (Volume: 3), 2010. ISSN 2155-1812 Dostupné na <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5529583>
- [2] DZIAK Jozef, BUČKO Radoslav: Simulácia elektrických obvodov pomocou nástroja MATLAB GUI a metódy STA / - 2018. In: JIEE Časopis priemyselnej elektrotechniky. Roč. 2, č. 1 (2018), s. 40-48. - ISSN 2454-0900
- [3] KOUŘIL, František – VRBA, Kamil : Teorie nelineárních a parametrických obvodů. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury n.p., / Alfa, 1981. 320 s. ISBN 04-520-81
- [4] HACHTEL, Gary. D. – BRAYTON, Robert K., GUSTAFSON, Fred G. : The Sparse Tableau Approach to Network Analysis and Design. IEEE Transactions on circuit theory (Volume: 18 , Issue: 1), 1971. ISSN 0098-4094
- [5] NAJM, F. N. : Circuit simulation. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc. , 2010. 303 s. ISBN 978-0-470-53871-5