LIMITNÉ CYKLY A TRAJEKTÓRIE VO VIACHODNOTOVEJ PAMÄŤOVEJ BUNKE

(LIMIT CYCLES AND TRAJECTORIES IN MULTIPLEVALUED MEMORY CELL)

Milan GUZAN
Katedra teoretickej elektrotechniky a elektrického merania, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Park Komenského 3,
043 89 Košice, tel. 055/602 2706, E-mail: guzan@tuke.sk

SUMMARY

Topic of this article is multiplevalued logic circuit analysis. The circuit consists of two resonant tunneling diodes (RTD) connected in series. One of RTD correspond to active element, another represent a load. The load is characterized by negative resistance region, therefore occurred a natural question – how is behaviour of such complex [12]. Analysis of such structures is of great practical importance, because they are able to operate in gigahertz region according to foreign resources.

The paper shows a graphical interpretation of cross-sections of the boundary surfaces. It represents a boundary between the attraction regions, which includes stable states: stable singularities, or stable limit cycles respectively. Except stable states, analyzed structure consist of only one absolutely unstable limit cycle which lies on four attraction regions boundary. Mentioned unstable limit cycle was obtained by negative integration step. Analysis of character of saddle-points N1, N2 by capacity change (C1=C2) when induction L is constant and resistance R equals to zero was carried out. This analysis make possible to detect three different types of unstable singularities: saddle-type singularity, unstable node and "center" respectively. In case "center"-type singularities, trajectory, which create closed curve is placed exactly on tangential plane of boundary surface passing through "center" N1 or N2. Because also the most precise numerical calculation is charged by error, it is possible to find the closed trajectory only by negative integration step.

Keywords: *state space, boundary surface, singularities, piecewise-linear approximation, eigenvalue*

1. ÚVOD

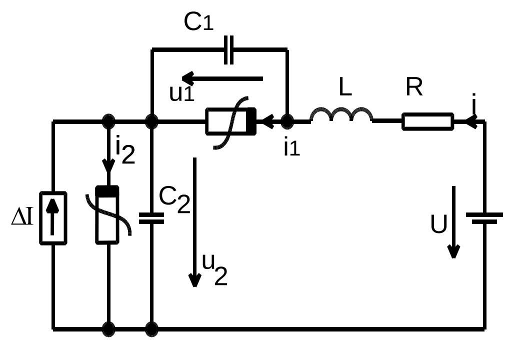
Práca [19] o viachodnotovej pamäti vytvorenej z páru RTD bola prvou prácou, ktorá stimulovala náš výskum obvodov s negatívnou záťažou. Prvá informácia o ich unikátnych vlastnostiach sa objavila v internej správe [12]. Výsledky vyplývajúce z aktivít v [1], [5], [13] boli stimulované prácami [11] a [7]. V [7] mali vlastné čísla zodpovedajúce Jacobiho matici v prípade sedla tú vlastnosť, že bolo iba jediné vlastné číslo kladné a ostatné mali vždy záporné reálne časti. Práca [1] túto skutočnosť potvrdila. Podobné poznatky boli uvedené aj v [14], [15], [11], [16], [17]. To sa vzťahovalo tiež k sústave štvrtého rádu, ktorá dostala publicitu v [18]. Preto autori [18] usúdili, že ide o všeobecnú vlastnosť sedlového bodu aj v prípade vyšších rádov. K tomuto záveru dospeli aj na základe geometrickej interpretácie hraničnej plochy (HP).

Pri skúmaní vlastností pamäťovej bunky si autor práce [5] všimol, že pri istej zmene C_1, C_2 *a* L dochádza ku zmene vlastných čísel Jacobiho matice. Miesto klasického sedla uvedeného v [1], mali všetky vlastné čísla sediel kladnú reálnu časť. Sedlo sa stalo nestabilným uzlom pri zvolených $L=0{,}1nH$, $C_1=C_2=0{,}5pF$ (obr.1) a navyše, v obvode bol prítomný jeden stabilný limitný cyklus (*SLC*).

Na úvod je tiež potrebné poznamenať, že symboly v texte písané kurzívou sú totožné so symbolmi použitými v obrázkoch. Táto možnosť bola zvolená kvôli lepšej odlíšiteľnosti symbolov v texte.

2. MODEL PAMÄŤOVEJ BUNKY

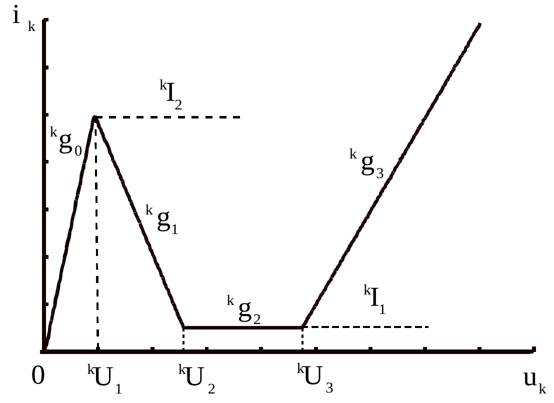
Obvod viachodnotovej logiky ilustrovaný na obr.1, bol prvý raz definovaný a popísaný v informácii [12], kde bol uvedený aj algoritmus výpočtu HP.



Obr. 1 Model pamäťovej bunky
Fig. 1 Model of the memory cell

Kapacity C_1, C_2 zahŕňajú kapacitu ekvivalentného obvodu RTD, prípadne parazitnú kapacitu na čipe.

Indukčnosťou L naznačujeme indukčnosť prívodov k vlastnému systému diódy. Odpor R uvažujeme nulový a $U = 0{,}44V$. Symboly nelineárnych prvkov tu zodpovedajú RTD. Obidve charakteristiky sú po častiach lineárnymi (PWL) charakteristikami definovanými obr.2.



Obr. 2 PWL aproximácia charakteristík nelineárnych elementov z obr.1
Fig. 2 PWL approximation of the characteristics of the non-linear elements of the Fig.1

Súradnice vrcholov sú označené veľkými písmenami tak, že ${}^kU_1, {}^kU_2, {}^kU_3$, sú napäťovými súradnicami vrcholov a ${}^jI_k = i_j({}^jU_k)$, pre $j=1,2$ a $k=1,2,3$ sú prúdovými súradnicami vrcholov.

Symbol ΔI na obr.1 predstavuje pravouhlý, prúdový ovládací impulz. Závislosť $i_2(u_2)$ predstavuje V-A charakteristiku prvku a závislosť $i_1(u_1)$ predstavuje V-A charakteristiku záťaže - obr.3

Pre obvod na obr.1 môžeme v zmysle [12] písať:

$$
\begin{aligned}
L\left(\frac{di}{dt}\right) &= U - Ri - (u_1 + u_2) &&\equiv \varphi_1(i, u_1, u_2)\\
C_1\left(\frac{du_1}{dt}\right) &= i - f_1(u_1) &&\equiv \varphi_2(i, u_1, u_2)\\
C_2\left(\frac{du_2}{dt}\right) &= i - f_2(u_2) + \Delta I &&\equiv \varphi_3(i, u_1, u_2)
\end{aligned}
\tag{1}
$$

Parametre prvku a záťaže uvádza tab.1

Charakteristiky nelineárnych prvkov $f_k(u_k)$ sú definované podľa [10] výrazom :

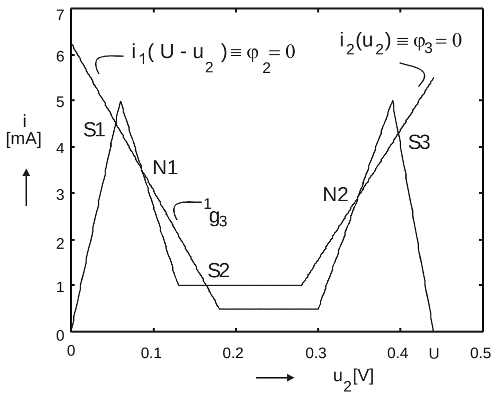
$$
\begin{aligned}
f_k(u_k) = {} & \frac{1}{2}({}^kg_0 + {}^kg_3)u_k + \frac{1}{2}\Big[({}^kg_1 - {}^kg_0)|u_k - {}^kU_1| + \\
& ({}^kg_2 - {}^kg_1)|u_k - {}^kU_2| + ({}^kg_3 - {}^kg_2)|u_k - {}^kU_3|\Big] - \\
& \frac{1}{2}\Big[({}^kg_1 - {}^kg_0){}^kU_1 + ({}^kg_2 - {}^kg_1){}^kU_2 + ({}^kg_3 - {}^kg_2){}^kU_3\Big]
\end{aligned}
\tag{2}
$$

kde ${}^kg_i$ sú vodivosti k-tého elementu a ${}^kU_i$ sú zlomové body charakteristík znázornených na obr.2. Parametre prvku a záťaže sú uvedené v tab.1, pričom ak vo vzťahu (2) k=1 resp. k=2, ide o záťaž resp. o prvok.
Počet a súradnice rovnovážnych stavov sú vyjadrené sústavou algebraických rovníc

$$\boldsymbol{\varphi}(i, u_1, u_2) = \mathbf{0} \tag{3}$$

	g_0	g_1	g_2	g_3	U_1	U_2	U_3
prvok	0,0833	0,0571	0	0,03	0,06	0,13	0,28
záťaž	0,1	-0,05	0	0,03	0,05	0,14	0,26

Tab. 1 Parametre prvku a záťaže. Vodivosť je v [S] a napätie vo [V].
Tab. 1 Parameters of element and load. Conductance is in [S] and voltage in [V].



Obr. 3 Parametrizované V-A charakteristiky prvku $i_2(u_2)$ a záťaže $i_1(u_1{=}U{-}u_2)$, vzhľadom k napätiu u_2, v projekcii do roviny i,u_2, pričom $\Delta I{=}0$. Parametre prvku a záťaže uvádza tab.1
Fig. 3 Parametrized I-V characteristics of element $i_2(u_2)$ and of load $i_1(u_1{=}U{-}u_2)$, with respect to voltage u_2, in projection to the plane i,u_2, when $\Delta I{=}0$. Parameters of element and load are shown in tab 1

Z obr.3 je zrejmé, že obvod na obr.1 môže zaujať až tri stabilné *S1, S2, S3* a dva nestabilné *N1, N2* rovnovážne stavy.

3. LINEARIZÁCIA A ELEMENT HRANIČNEJ PLOCHY

Kvôli jednoduchosti zapíšeme sústavu (1) vo vektorovom tvare ako:

$$\frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \boldsymbol{k}\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{v}) \tag{4}$$

kde

$$\boldsymbol{v} = [i, u_1, u_2]^T \tag{5}$$

je vektor stavových premenných,

$$\boldsymbol{\varphi} = [\varphi_1(\boldsymbol{v}), \varphi_2(\boldsymbol{v}), \varphi_3(\boldsymbol{v})]^T \tag{6}$$

je vektor funkcií zodpovedajúci pravým stranám systému (1) a

$$\boldsymbol{k} = diag\left[1/L, 1/C_1, 1/C_2\right] \tag{7}$$

Po linearizácii sústavy (1) v okolí pokojového bodu P môžeme písať:

$$d\Delta \boldsymbol{v}/dt = \boldsymbol{A}_P \Delta \boldsymbol{v} \tag{8}$$

kde na ľavej strane (8) je:

$$\Delta v = [\ \Delta i, \Delta u_1, \Delta u_2\ ]^T \tag{9}$$

a na pravej strane (8) pre:

$$\Delta \boldsymbol{v}\ = [\boldsymbol{v} - \boldsymbol{v}_P] \tag{10}$$

pričom $\boldsymbol{v}_P$ je súradnica uvažovanej singularity.

$\boldsymbol{A}_P$ vo vzťahu (8) - je Jacobiho matica vyjadrená:

$$\boldsymbol{A}_P = \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial v_k}\right)_{\mathrm{P}} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \tag{11}$$

kde index i je riadok a index k je stĺpec Jacobiho matice.

Charakteristické (vlastné) čísla $\boldsymbol{\lambda}$ Jacobiho matice $\boldsymbol{A}$ v pokojovom bode P sú dané rovnicou

$$\det|\boldsymbol{A}_P - \boldsymbol{\lambda I}| = 0 \tag{12}$$

kde $\boldsymbol{I}$ je jednotková matica.

Koeficienty α_{ik} tangenciálnej roviny k HP sú podľa [8] dané

$$\begin{aligned} &\alpha_{11}(a_{11} - \lambda_1) + \alpha_{12}a_{21} + \alpha_{13}a_{31} = 0 \\ &\alpha_{11}a_{12} + \alpha_{12}(a_{22} - \lambda_1) + \alpha_{13}a_{32} = 0 \\ &\alpha_{11}a_{13} + \alpha_{12}a_{23} + \alpha_{13}(a_{33} - \lambda_1) = 0 \end{aligned} \tag{13}$$

kde λ_1 je dominantné vlastné číslo.

Keďže sústava (13) má v dôsledku (12) aj nenulové riešenie môžme napríklad položiť

$$\alpha_{13} = 1 \tag{14}$$

Riešením (13) potom dostávame

$$\alpha_{11} = [a_{31}(a_{22} - \lambda_1) - a_{32}a_{21}]/[a_{12}a_{21} - (a_{11} - \lambda_1)(a_{22} - \lambda_1)] \tag{15}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{12} = \{&[-a_{31}(a_{22} - \lambda_1)(a_{11} - \lambda_1) - a_{32}a_{21}(a_{11} - \lambda_1)]/ \\ /&[a_{12}a_{21}{}^2 - (a_{11} - \lambda_1)(a_{22} - \lambda_1)a_{21}]\} - a_{31}/a_{21} \end{aligned} \tag{16}$$

Vzťahmi (14), (15) a (16) sú definované všetky koeficienty (vlastné vektory) tangenciálnej roviny k HP.

4. OSCILÁCIE PAMÄŤOVEJ BUNKY

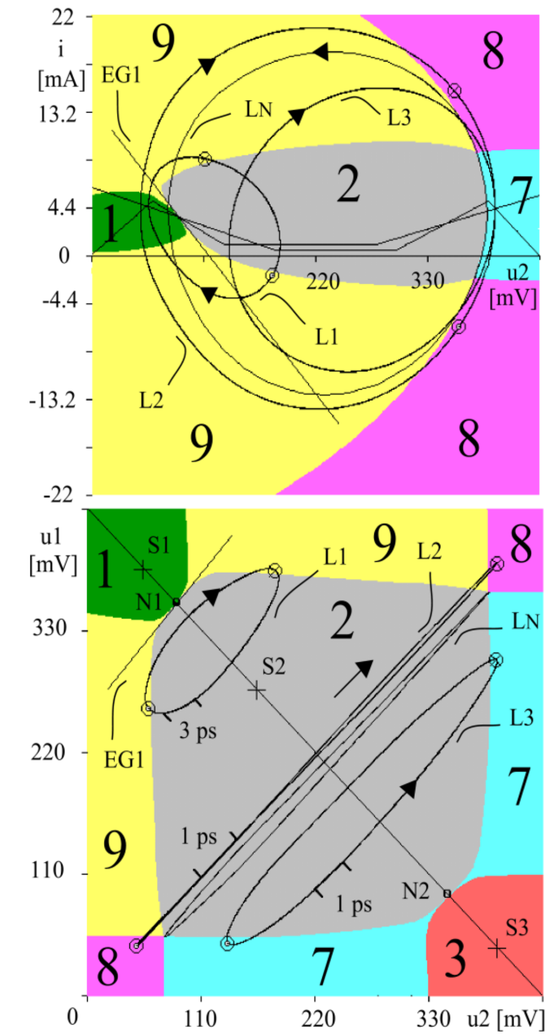
Na základe [12] bol skúmaný vplyv sklonu posledného segmentu záťaže ${}^1g_3$ (obr.3) na obvod znázornený na obr.1. Výsledky sú uvedené v tab.2 [3].

${}^1g_3$	Počet singularít	Počet *SLC*
0,039	3	1
0,036	5	1
0,033	5	2
0,032	5	3
0,027	5	2
0,025	5	1
0,023	5	0
0,009	3	0

Tab. 2 Vplyv sklonu segmentu záťaže ${}^1g_3$ na počet singularít a *SLC*

Tab. 2 Effect of slope segment load ${}^1g_3$ on number of singular points and number of stable limit cycles

Rozhodli sme sa analyzovať túto štruktúru pri ${}^1g_3 = 0{,}032S$, kedy sa obvod vyznačoval tromi stabilnými singularitami *S1, S2, S3* a až tromi *SLC*, ako je zrejmé aj z obr.4 [4]. Navyše obvod sa vyznačoval aj nestabilným limitným cyklom (*NLC*) - L_N**,** ktorý je v zmysle [9] totálne nestabilný, čo treba chápať tak, že nie je pre žiadne začiatočné podmienky atraktorom t.j. nemá sedlový charakter ako je to v prípade kladnej záťaže. Sedlový charakter *NLC* v prípade kladnej záťaže bol prvý raz opísaný v práci [11] a neskôr v [14]. Bolo teda výsostne zaujímavé zistiť, čo sa deje s nestabilnými singularitami *N1* a *N2*, ktoré majú veľký vplyv na dynamické vlastnosti obvodu. Navyše HP, ktorá vždy oddeľuje stabilné atraktory navzájom od seba, v prípade uvedenom na obr.4, sa rozštiepila na 2 paraboloidy. Časové značkovanie v *ps* udáva dĺžku času na trajektóriách. Rozštiepenie HP je charakteristické aj pre rez v stavovej rovine singularitou *N2* [2].



Obr. 4 Mongeova projekcia rezu singularitou *N1* (*i=3,5mA; u1=353mV*) v odtieňoch sivej farby. Parametre sú uvedené v tab.1 a v (18). Šípky naznačujú smer pohybu zastupujúceho bodu v stavovom priestore. Krížik v krúžku, resp. bodka v krúžku označujú vstup, resp. výstup trajektórie do resp. z roviny. Veľkými číslami *9, 8, 7* a *1, 2 , 3* sú naznačené regióny príťažlivosti pre *SLC L1, L2, L3* a stabilné singularity *S1, S2, S3.*

Fig. 4 The Monge´s projection of the cross-section in singularity *N1 (i=3,5mA; u1=353mV)* in gray scale. Parameters are introduced in Tab.1 and in (18). Arrows indicate the direct of representative point motion in the state space. The dagger in circlet or dot in circlet indicates input or output of representative point to or out from plain. Big numbers *9,8,7* and *1,2,3* indicates attraction regions forstable limit cycles *L1, L2, L3* and stable singularities *S1, S2, S3.*

5. CHARAKTERISTICKÉ ČÍSLA SINGULARÍT N1, N2 A ELEMENT HP

Z (11) vyplýva, že Jacobiho matica systému (1) bude mať tvar:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\dfrac{R}{L} & -\dfrac{1}{L} & -\dfrac{1}{L} \\ \dfrac{1}{C_1} & -\left(\dfrac{{}^1g_i}{C_1}\right) & 0 \\ \dfrac{1}{C_2} & 0 & -\left(\dfrac{{}^2g_i}{C_2}\right) \end{bmatrix} \tag{17}$$

Pre parametre obvodu uvedené v tab.1 a

$$L=1.10^{-10}\mathrm{H},\ C_1=C_2=5.10^{-13}\mathrm{F} \tag{18}$$

sa nestabilné singularity *N1* a *N2* vyznačovali len kladnými reálnymi časťami charakteristických čísel uvedených v tab.3, pričom $\lambda_{2,3}$ sú komplexne združené čísla.

a)	N1
λ_1	3.127788580741590e+10
Re ($\lambda_{2,3}$)	9.461057096292058e+9
Im ($\lambda_{2,3}$)	1.789129527777968e+11

b)	N2
λ_1	2.582865131689538e+10
Re ($\lambda_{2,3}$)	8.985674341552322e+9
Im ($\lambda_{2,3}$)	1.839431487112181e+11

Tab. 3 Charakteristické čísla a) singularity *N1*, b) singularity *N2*

Tab. 3 Eigenvalues of a) *N1*, b) *N2* singularities

Pre rez singularitou *N1* bol nájdený v zmysle [6] aj element HP. *EG1* na obr.4 je stopou dotykovej roviny k HP v bode (*N1*), kde sa dotýkajú spolu oblasti príťažlivosti *S1* a *S2*. Vychádzajúc zo vzťahov (14), (15) a (16) vlastné vektory dotykovej roviny pre parametre obvodu uvedené v tab.1 a (18) sú:

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= 8{,}29221 \\ \alpha_{12} &= -0{,}8703 \\ \alpha_{13} &= 1 \end{aligned} \tag{19}$$

a dotyková rovina k HP je daná rovnicou:

$$\alpha_{11}\Delta i + \alpha_{12}\Delta u_1 + \alpha_{13}\Delta u_2 = 0 \tag{20}$$

kde vo vzťahu (20) platí, že:

$$\begin{aligned} \Delta u_2 &= u_2 - {}^{N1}u_2 \\ \Delta u_1 &= u_1 - {}^{N1}u_1 \\ \Delta i &= i - {}^{N1}i \end{aligned} \tag{21}$$

pričom $^{N1}u_2 = 86mV, {}^{N1}u_1 = 353mV, {}^{N1}i = 3{,}5mA$ – sú súradnice singularity *N1*. Element HP pre *N2* a jeho grafické znázornenie je uvedené v informácii [6] na základe ktorej sa postupovalo v práci [2].

Pri skúmaní vplyvu kapacít (*C1=C2* a *L=0,1nH*) na charakteristické čísla *N1, N2* [3] bolo zistené, že v reálnych častiach komplexne združených charakteristických čísel nastáva zmena zo zápornej na kladnú reálnu časť. Pri podrobnejšom skúmaní vplyvu kapacít na charakteristické čísla programom MATLAB, bol nájdený prípad, keď sú reálne časti voči imaginárnej nepatrne malé – prípad singularity *N1*, alebo nulové – prípad singularity *N2*. Tieto možnosti uvádza tabuľka 4.

a)	N1
λ_1	1,37368651488616e+11
Re ($\lambda_{2,3}$)	1,52588e-5
Im ($\lambda_{2,3}$)	2,33941331127715e+11
C_1=C_2 [F]	1,8272e-13

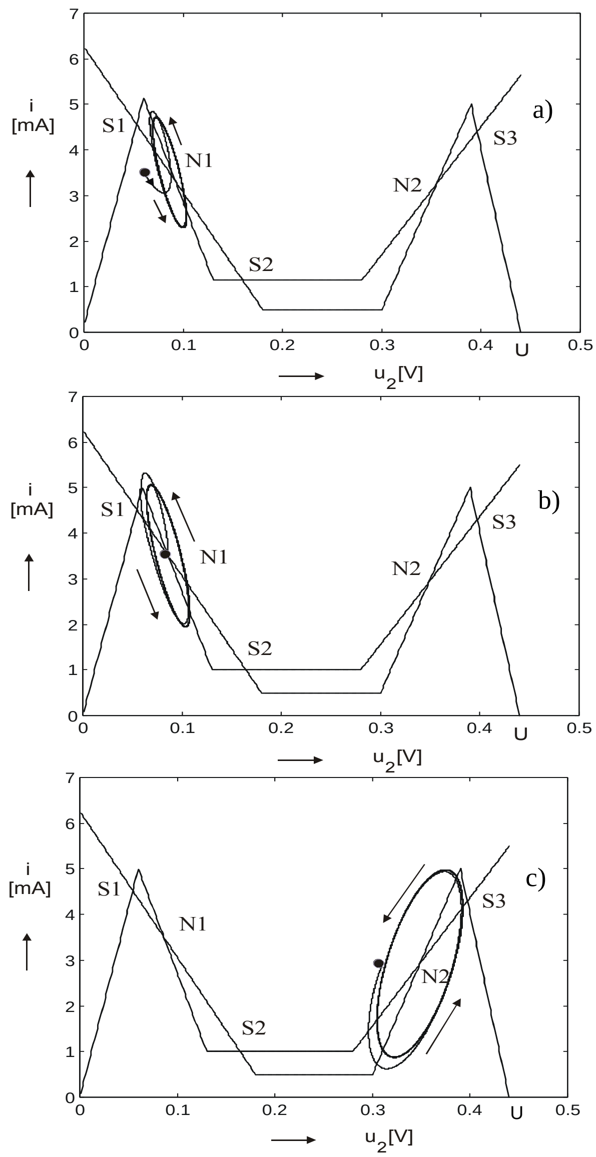
b)	N2
λ_1	1,55871886120996e+11
Re ($\lambda_{2,3}$)	0
Im ($\lambda_{2,3}$)	2,66785264256104e+11
C_1=C_2 [F]	1,405e-13

Tab. 4 Charakteristické čísla singularít a) *N1*, b) *N2*, pri absencii ich reálnych častí
Tab. 4 Eigenvalues of a) *N1*, b) *N2* singularities in absence of its real parts

Keďže v prípadoch uvedených v tab.4, je pre singularity *N1* resp. *N2* Re($\lambda_{2,3}$) =0 a Im($\lambda_{2,3}$) ≠0, je v ich okolí každá trajektória uzavretá. Pretože i ten najpresnejší numerický výpočet je zaťažený chybou, je možné túto uzavretú trajektóriu nájsť iba pri zápornom integračnom kroku, kedy sa z fyzikálneho hľadiska dá simulácia interpretovať tak, ako keby bolo λ_1<0 a *dt*>0.

V zmysle práve uvedenej poznámky je zrejmé, že každý jeden bod uzavretých trajektórií leží presne na rovine, ktorá je vyjadrená elementom HP, vzťahom (20). Ak sa začiatočné podmienky nachádzajú nad resp. pod touto rovinou, je zastupujúci bod pri zápornom integračnom kroku pritiahnutý na rovinu elementu HP (obr.5). V prípade kladného integračného kroku je tomu práve naopak a preto nie je možné pri kladnom integračnom kroku uzavretosť trajektórie potvrdiť.

Na obr.5 sú znázornené hrubým bodom začiatočné podmienky v projekcii do roviny i,u_2. Šípky ilustrujú smer pohybu zastupujúceho bodu po uzavretej trajektórii. Charakteristické vektory elementu HP pre *N1, N2* sú uvedené v tab.5.



Obr. 5 Uzavreté trajektórie pri zápornom integračnom kroku v okolí *N1* a *N2*. Začiatočné podmienky sú uvedené v tab.6 Ostatné parametre sú uvedené v tab.1
Fig. 5 Closed trajectories for negative integration step in *N1* and *N2* surround. Initial conditions are shown in Tab.6. Other parameters are introduced in Tab.1

6. ZÁVER

Pri kladnej záťaži platí empirický postulát, že medzi charakteristickými číslami Jacobiho matice, vzťahujúcej sa k sedlu môže byť len jedno jediné charakteristické číslo kladné a všetky ostatné musia byť záporné, resp. musia mať záporné reálne časti. To bez ohľadu na to, aký je stupeň charakteristického polynómu. Postačujúcou podmienkou pre uvedenú vlastnosť polynómu je, aby sa vzťahoval k sedlu, ktoré zodpovedá kladnej záťaži. Charakteristické čísla vzťahujúce sa k sedlu so zápornou záťažou vôbec nemusia mať horeuvedené vlastnosti.

Morfológia regiónov príťažlivosti pre prípad zápornej záťaže, umožňuje zobraziť výpočet pomocou PC. Na základe takéhoto zobrazenia možno potom robiť ďalšie závery tak z matematického ako aj z fyzikálneho hľadiska.

	N1	N2
α_{11}	17,51313	-35,58718
α_{12}	-0,56042	-1,77935
α_{13}	1	1
C1=C2[F]	1,8272E-13	1,405E-13

Tab. 5 Charakteristické vektory elementu HP zo vzťahu (20) pre *N1, N2*
Tab. 5 Eigenvectors of boundary surface element from formula (20) for *N1, N2*

	i [mA]	u1 [mV]	u2 [mV]
a)	3,5	353	60
b)	3,5	380	86
c)	2,9	91	310

Tab. 6 Začiatočné podmienky uzavretých trajektórií pre obr.6.
Tab. 6 Initial conditions for closed trajectories of Fig.6

LITERATÚRA

[1] Galajda, P.: Analýza viachodnotovej pamäťovej bunky. Kandidátska dizertačná práca, VŠT Košice, júl 1995.

[2] Galajda, P., Guzan, M., Špány, V.: The State Space mystery with Negative Load. Radioengineering, Vol. 8, 1999, No. 2, pp. 2-7.

[3] Guzan,M.: Capacity effect on multiple valued logic memory. Prijatý príspevok na konferenciu DSP-MCOM 2001, november 2001, TU Košice.

[4] Guzan,M., Galajda,P., Špány,V.: The space mystery in multivalued logic circuits. Konferencia DSP, Herľany, 1999, pp.151-154.

[5] Horváth, L: Viachodnotová logika realizovaná jednobranovými elementami. Diplomová práca, TU Košice, 1996.

[6] Špány, V.: Geometrické overenie elementu hraničnej plochy v prípade kladných vlastných čísel Jacobiho matice. Interná informácia, apríl 1997.

[7] Špány, V.: Grafické riešenie nelineárneho obvodu metódou m-rozmerného fázového priestoru. Elektrotechnický časopis, 1969, č.4, s.233-249.

[8] Špány,V.: Hraničná plocha a model sekvenčného obvodu. Zborník vedeckých prác VŠT v Košiciach, Zv.1, 1985, s. 103-127.

[9] Špány, V.: Totálne nestabilný limitný cyklus. Interná informácia, jún 1998.

[10] Špány, V.: Vyjadrenie nelineárnych charakteristík absolútnymi hodnotami. Slaboproudý obzor, roč.49, 1988, č.7, s. 351-356.

[11] Špány, V.: Špeciálne plochy a trajektórie viacrozmerného stavového priestoru. Zborník vedeckých prác VŠT v Košiciach, Zv.1, 1978, str. 123-152.

[12] Špány, V.: Negative Load Resistance and the Basins of Attraction. Internal information in the Department of Radioelectronics, TU Košice, August 1994.

[13] Špány, V., Galajda, P., Guzan, M.: Boundary Surfaces of One-port Memories. 5th International Conference Tesla Millennium, Beograd, October 15-18, 1996, pp.130-137.

[14] Špány, V., Pivka, L.: Boundary Surfaces in Sequential Circuits. International Journal of Circuit Theory and Applications, vol. 18, 1990, pp. 349-360.

[15] Špány, V., Pivka, L.: Invariant Manifolds in sequential circuits. Elektrotechnický časopis, vol.42, 1991, No 6, pp. 281-293.

[16] Špány, V., Pivka, L.: 2-Segment Bistability and Basin Structure in 3-Segment PWL Circuits. IEE Proceedings-G, Vol. 140, 1993, No. 1, pp. 61-67.

[17] Špány, V., Pivka, L.: Boundary Surfaces and Basin Bifurcations in Chua's Circuit. Journal of Circuits, Systems and Computers, Vol. 3, 1993, No. 2, pp. 441-470.

[18] Špány, V., Pivka, L.: “Boundary Surfaces in sequential circuits.” Beitrage zur Theoretchischeu Elektrotechnik, Das Internationale Symposium in Ilmenau, 1988, pp.90-99.

[19] Wei, S. J., Lin, H. CH.: A Multi-State Memory Using Resonant Tunneling Diode Pair. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Singapore, June 1991, pp. 11-14.

BIOGRAPHY

Milan Guzan was born in 12.4.1969 in Snina, Slovak Republic. He received the Ing. (M.Sc.) degree in electrical engineering from the FE TU in Košice, in 1992. At present he is an assistant professor at the Department of Theoretical Electrotechnics and Electrical Measurement. His research interest is in multiple-valued logic and sensors based on multiple-valued memories.