



UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI

Facultatea de Inginerie Electrica

Scoala Doctorala de Inginerie Electrica

TEZĂ DE DOCTORAT

- rezumat -

**ANALIZA CIRCUITELOR ANALOGICE NELINIARE CU
METODA HIBRIDĂ**

**RESEARCH ON ANALYSIS OF ANALOG CIRCUITS WITH
HYBRID METHOD**

Conducător de doctorat:

Prof. Dr. ing. Mihai IORDACHE

Doctorand:

ing. DIANA RAMONA SĂNĂTESCU(ENE)

BUCUREȘTI 2021

Cuprins

Capitolul 1	2
Introducere	2
Diseminarea rezultatelor	3
Capitolul 2	5
Noțiuni privind analiza circuitelor neliniare	5
Capitolul 3	10
Descrierea programului de analiză hibridă a circuitelor neliniare	10
Capitolul 4	15
Aplicabilitatea matricei hibride în practică	15
Capitolul 5	18
Concluzii finale, contribuții, direcții de cercetare viitoare	18
ANEXE.....	21
Codul programului dezvoltat în MAPLE pentru analiza circuitelor neliniare cu metoda hibridă ..	21
Bibliografie	24
Bibliografie capitolul 1.....	24
Bibliografie capitolul 2.....	25
Bibliografie capitolul 3.....	27
Bibliografie capitolul 4.....	27

Capitolul 1

Introducere

Lucrarea de cercetare intitulată: "Analiza circuitelor analogice neliniare cu metoda hibridă" vine ca o provocare pentru autor, deoarece dorește ca în cadrul acestei lucrări dezvoltarea de programe proprii specializate destinate simulării numerice și simbolice. Obiectivul principal al acestei lucrări de doctorat este reprezentat de o documentare complexă a stadiului actual al analizei, sintezei, simulării și modelării circuitelor analogice, urmărind proiectarea, optimizarea acestor sisteme electrice în urma simulărilor în softuri specializate. Pentru a optimiza analiza circuitelor electrice este necesară generarea unui model matematic pentru dimensionarea automată a circuitului. Obiectivul pe termen lung este adaptarea acestor programe la nevoile actuale ale științelor ingineresti referitoare la analiza circuitelor analogice și digitale.

Lucrarea este structurată pe 5 capitole după cum urmează:

În **Capitolul 1 - Introducere** sunt prezentate aspectele generale legate de formularea analizei circuitelor analogice neliniare și obiectivele urmărite. La ora actuală, cerințele referitoare la analiza circuitelor analogice sunt pe de o parte de a dezvolta programe de calcul performante, deseori adaptate unei anumite categorii de probleme, iar pe de altă parte de a dezvolta modele cu un anumit grad de generalitate, care să fie ușor de implementat și care să ofere rezultate cât mai apropiate de valorile reale, ce s-ar obține experimental.

Obiectivul acestei teze este dezvoltarea de programe specializate folosind simulări numerice și simbolice precum și simularea unor circuite folosind aceste programe.

În **Capitolul 2** intitulat **Noțiuni privind analiza circuitelor neliniare** sunt prezentate noțiunile de bază pentru analiza unui circuit electric folosind ecuațiile hibride. Analiza și simularea unui circuit electric presupune formularea și rezolvarea unui sistem de ecuații matematice, liniare și/sau neliniare, care să descrie funcționalitatea acestuia.

Ecuatiile hibride sunt folosite în studierea teoretică a ecuațiilor neliniare rezistive deoarece au o structură ușor de analizat. O metodă de analiză este cu atât mai eficientă, cu cât permite găsirea soluției (soluțiilor) într-un timp și cu un volum de calcul minime.

Metoda hibridă în schimb este mai eficientă cu cât circuitul analizat conține mai multe elemente de circuit liniare și surse comandate.

În *Capitolul 3* intitulat *Formularea ecuațiilor hibride* se prezintă exemple de analiza a circuitelor electrice neliniare folosind metoda ecuațiilor hibride. Pentru analiza întregului circuit analogic studiat se poate folosi, pentru fiecare soluție reală a ecuațiilor hibride neliniare, fie programul **ASINOM** - Analiza Simbolică bazată pe metoda Nodală Modificată (**CSAP** – Circuit Symbolic Analysis Program) și simulatorul simbolic **MAPLE**, fie programul **ACA** – Program de Analiză a Circuitelor Analogice și programul **MATLAB** [11].

Aceste programe împreună permit analiza în domeniul timp cât și în domeniul frecvență unei clase cât mai variate de circuite analogice liniare, neliniare și/sau variabile în timp.

În *Capitolul 4* – intitulat *Aplicație practică* prezintă modalitatea de rezolvare a unui circuit analogic rezistiv neliniar cu o aplicație practică. Această neliniaritate este datorată valorilor rezistențelor specifice ale solurilor. Rezolvarea circuitului analogic neliniar este tratată cu metoda hibridă, având ca soluție o matrice hibridă. Aplicația practică constă în modelarea variației rezistențelor specifice ale solului.

Componentele aplicației practice folosite constă în: modul tranzistor de putere IRF520, placă Arduino, modulul cu senzor de umiditate, kit de osciloscop DSO138.

În *Capitolul 5 - Concluzii și Contribuții originale* sunt sintetizate rezultatele activității științifice desfășurate în perioada elaborării tezei de doctorat, principalele contribuții originale aduse, precum și direcții ulterioare de cercetare.

Primele încercări de rezolvare a circuitelor analogice neliniare au fost făcute cu programul de automatizare de proiectare Advanced Design System (ADS). În anexele A1 și A2 sunt detaliate aceste simulări. Deasemenea, pentru a înțelege modalitatea de simulare a circuitelor analogice neliniare am început prin simularea circuitului Chua, prezentat în anexa A5.

Diseminarea rezultatelor

Rezultatele obținute au fost diseminate prin publicarea unui număr de 9 articole științifice, din care 2 ca prim autor și în 7 fiind coautor, după cum urmează:

1. **Diana – Ramona Sănătescu**, Lucian – Vasile Ene, Mihai Iordache, “*Research on Analysis of Analog Circuits with Hybrid Method*”, IEEE Xplore, 2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), DOI: 10.1109/ICATE.2016.7754703, Page(s): 1 – 7, Publisher: IEEE.

2. Ene Lucian-Vasile, **Sănătescu Diana Ramona**, “*Contributions to transfer wireless electromagnetic energy to electric cars*”, 11 Noiembrie 2016 Simpozionul de mașini electrice SME’16, SME16_paper_6.
3. Lucian-Vasile Ene, Aurel Chirilă, Dragoș Deaconu, **Diana-Ramona Sănătescu**, “*Sistem de acționare electrică pentru reglarea vitezei unei mașini asincrone trifazate de la distanță cu un PLC*”, 11 Noiembrie 2016 Simpozionul de mașini electrice SME’16, SME16_paper_7.
4. Lucian-Vasile Ene, **Diana-Ramona Sănătescu**, “*Electric Drive System for Speed Adjusting of a Three-Phase Asynchronous Motor using a PLC for Propelling an Electric Vehicle*”, Proceeding of the 10th International Symposium Advanced Topics in Electrical Engineering – ATEE’17, March 23-25, 2017 Bucharest, Romania, Editura Politehnica Press, ISBN: 978-1-5090-5160-1/17/\$31.00 ©2017 IEEE, Publisher: IEEE.
5. Lucian-Vasile Ene, **Diana-Ramona Sănătescu**, Cristian Sandu, Teodor-Cătălin Bibirică, Mihai Iordache, “*Simulation of Magnetically Coupled Coils in Ansoft Q3D Extractor Program*”, Proceedings of the 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2017, May 24-26, Brasov, România, 2017, IEEE Xplore, INSPEC Accession Number: 17028093, DOI: 10.1109/OPTIM.2017.7974971, Publisher: IEEE.
6. **Diana-Ramona Sănătescu**, Lucian-Vasile Ene, Alexandra Ionescu, Alina Oroșanu, Iordache M., “*A new approach for nonlinear analog circuits analysis*” U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 81, Iss. 3, 2019 ISSN 2286-3540, 2019.
7. Alexandra Ionescu, Alina Oroșanu, **Diana-Ramona Sănătescu**, Iordache M., “*A new approach on Chua’s circuit analysis*” U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 81, Iss. 4, 2019 ISSN 2286-3540, 2019.
8. Mihai Iordache, Marilena Stanciulescu, **Diana Sanatescu**, Sorin Deleanu, Alexandra Ionescu, Anastasie Moscu, Lavinia Bobaru, „CSAP and TFSG – Circuit Symbolic Analysis Programs”, SIELMEN 2019 - 12-th International Conference on Electromechanical and Power Systems10 – 11 October 2019, Chișinău Rep. MOLDOVA
9. Razvan Asanache, Mihai Iordache, **Diana Sanatescu**, Mihaela Turcu, Alexandru Grib, Lucian Ene „Wireless Charging Systems for Electrical Vehicle Batteries”, ECAI-2020 (12th Edition of International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence): Nr. 5

Capitolul 2

Noțiuni privind analiza circuitelor neliniare

Pentru a analiza un circuit electric este necesară formularea și rezolvarea unui sistem de ecuații matematice care să redea aspectul funcțional al acestuia. Întrucât au o construcție ușor de analizat, ecuațiile hibride sunt utilizate în studierea teoretică a circuitelor neliniare rezistive.

Pentru ca metoda hibridă să fie practică și eficientă, este de preferat ca circuitul analizat să includă mai multe surse controlate și elemente de circuit liniare. Un folos consistent pe care îl are față de metoda nodală este că neliniaritățile pot fi controlate în curent sau în tensiune.

Pornind de la ideea de bază de a alege un arbore normal din circuitul analizat, se construiește un P-port prin separarea elementelor liniare, condensatoare, bobine și rezistoare liniare precum și toate cele patru surse controlate liniare, [15-16].

Prin izolarea elementelor se conferă avantajul calculării o singură dată a acelor mărimi din ecuațiile de circuit ținând cont de parametrii elementelor de circuit liniare. Acest calcul se realizează în momentul inițial. Analiza tranzitorie a unui circuit dinamic neliniar se simplifică prin înlocuirea elementelor dinamice cu schemele companion asociate unui algoritm implicit de integrare numerică (de exemplu Euler implicit). În final, după realizarea acestor pași, se restrânge la analiză a unei secvențe de circuit rezistiv neliniar.

Metoda hibridă are următoarele variabile independente: vectorul tensiunilor elementelor neliniare comandate în tensiune precum și vectorului curenților elementelor neliniare comandate în curent.

Circuitele analogice pentru formularea ecuațiilor hibride, trebuie să întrunească anumite criterii, [15-16]:

1. Circuitul nu trebuie să aibă în componența sa nici o buclă formată din surse ideale independente sau comandate în tensiune;
2. Circuitul nu conține nici o secțiune formată din surse ideale independente sau comandate în curent;
3. Circuitul trebuie să permită existența unui arbore normal:

Un arbore al unui circuit electric este un subcircuit format din laturi de circuit care îndeplinește următoarele condiții:

- a) Nu formează cicluri(bucle);
- b) E conex, între oricare 2 noduri ale sale există cel puțin o legătură/cale;
- c) Conține toate nodurile circuitului.

Oricare dintre cele 3 se poate înlocui cu ipoteza: are $n-1$ laturi

Arborele normal este un arbore cu restricții care îndeplinește următoarele condiții în ordinea priorității:

- a) Conține toate sursele ideale independente și comandate de tensiune;
- b) Toate elementele de circuit neliniare comandate în tensiune;
- c) Conține un număr maxim posibil de rezistente liniare;
- d) Nu conține nici o sursă ideală independentă sau comandată de curent și nici un element neliniar comandat în curent.

4. Mărimile de comandă ale surselor controlate sunt asociate rezistoarelor liniare sau variabilelor independente.

Arborele normal nu trebuie să conțină nici o sursă ideală independentă sau comandată de curent și nici un element neliniar de circuit comandat (controlat) în curent (c.i.). Se presupune că mărimile de comandă ale surselor comandate sunt asociate rezistoarelor liniare sau aparțin vectorului tensiunilor elementelor neliniare comandate în tensiune sau vectorului curenților elementelor neliniare comandate în curent (variabilelor independente).

Ecuatiile hibride sunt [15-16]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{u,j+1}^{(k+1)} \\ \mathbf{u}_{i,j+1}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{u,u} & \mathbf{B}_{u,i} \\ \mathbf{A}_{i,u} & \mathbf{R}_{i,i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{u,j+1}^{(k+1)} \\ \mathbf{i}_{i,j+1}^{(k+1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{u,e} & \mathbf{B}_{u,j} \\ \mathbf{A}_{i,e} & \mathbf{R}_{i,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{j+1} \\ \mathbf{j}_{j+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{u,L} & \mathbf{B}_{u,C} \\ \mathbf{A}_{i,L} & \mathbf{R}_{i,C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{C,j} \\ \mathbf{j}_{C,j} \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

unde $\mathbf{B}_{u,i}(\mathbf{A}_{i,u})$ - reprezintă matricea coeficienților de transfer în curent (tensiune) ai elementelor neliniare c.u. (c.i.) ramuri (coarde) în raport cu elementele neliniare c.i. (c.u.) coarde (ramuri); $\mathbf{u}_{u,j+1}^{(k+1)}$ ($\mathbf{i}_{i,j+1}^{(k+1)}$) – este vectorul tensiunilor (curenților) elementelor neliniare c.u. (c.i.) ramuri (coarde) la momentul t_{j+1} și iterația $(k+1)$; $\mathbf{e}_{L,j}$ ($\mathbf{j}_{C,j}$) – reprezintă vectorul

t.e.m. (curenților) ale (ai) surselor de tensiune (curent) la momentul t_j (sau la momentele anterioare lui t_{j+1}) din schemele companion ale bobinelor (condensatoarelor) liniare.

$$\mathbf{X}_{j+1}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} i_{u,j+1}^{(k+1)} \\ u_{i,j+1}^{(k+1)} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{u,u} & \mathbf{B}_{u,i} \\ \mathbf{A}_{i,u} & \mathbf{R}_{i,i} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x}_{j+1}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} u_{u,j+1}^{(k+1)} \\ i_{i,j+1}^{(k+1)} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{S}_{j+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{u,e} & \mathbf{B}_{u,j} \\ \mathbf{A}_{i,e} & \mathbf{R}_{i,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{j+1} \\ \mathbf{j}_{j+1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{S}_{LC,j} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{u,L} & \mathbf{B}_{u,C} \\ \mathbf{A}_{i,L} & \mathbf{R}_{i,C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{L,j} \\ \mathbf{j}_{C,j} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

și ecuațiile (2.9) se transformă:

$$\mathbf{X}_{j+1}^{(k+1)} = \mathbf{H}\mathbf{x}_{j+1}^{(k+1)} + \mathbf{S}_{j+1} + \mathbf{S}_{LC,j}, \quad (2.20)$$

unde: \mathbf{H} este matricea hibridă a circuitului; \mathbf{S}_{j+1} reprezintă vectorul sursă la momentul t_{j+1} determinat de sursele independente de tensiune și de curent și $\mathbf{S}_{LC,j}$ este vectorul sursă corespunzător surselor independente din modelele rezistive, discrete, asociate unui algoritm implicit de integrare ale bobinelor și condensatoarelor liniare. De exemplu, termenul din vectorul \mathbf{S}_{j+1} corespunzător unui condensator neliniar c.i. are expresia $\hat{j}_{Cu,j+1} - j_{Cu,j}$ (vezi relația (2.15)), iar cel corespunzător unei bobine neliniare c.i. are expresia $\hat{e}_{Li,j+1} - e_{Li,j}$ (vezi relația (2.17)),

Caracteristicile rezistoarelor neliniare approximate prin curbe continue liniarizate pe porțiuni au la momentul $t_{j+1} = t_j + h$ și iterația $(k+1)$ următoarele formule, [15-16]:

- pentru rezistoarele neliniare c.u.:

$$i_{Ru,j+1}^{(k+1)} = \hat{i}_{Ru}(u_{Ru,j+1}^{(k+1)}) = G_{du}(s_{j+1}^{(k)}) \cdot u_{Ru,j+1}^{(k+1)} + j_{Ru}(s_{j+1}^{(k)}), \quad (2.21)$$

$$u_{Ru}^-(s_{j+1}^{(k)}) \leq u_{Ru,j+1}^{(k+1)} \leq u_{Ru}^+(s_{j+1}^{(k)})$$

- pentru rezistoarele neliniare c.i.

$$u_{Ri,j+1}^{(k+1)} = \hat{u}_{Ri}(i_{Ri,j+1}^{(k+1)}) = R_{di}(s_{j+1}^{(k)}) \cdot i_{Ri,j+1}^{(k+1)} + e_{Ri}(s_{j+1}^{(k)}), \quad (2.22)$$

$$i_{Ri}^-(s_{j+1}^{(k)}) \leq i_{Ri,j+1}^{(k+1)} \leq i_{Ri}^+(s_{j+1}^{(k)})$$

Fiecare rezistor neliniar c.u. (c.i.) se poate înlocui, pentru fiecare segment arbitrar $s_{j+1}^{(k)}$ (de la momentul t_{j+1} și iterația k), prin circuitele echivalente din figurile 2.3, a, respectiv 2.3, b.

La momentul t_{j+1} și iterația $(k+1)$ expresia curentului unui condensator neliniar c.u. liniarizat pe porțiuni când se folosește algoritmul Euler implicit de integrare numerică, reprezintă:

$$i_{Cu,j+1}^{(k+1)} = G_{dCu}(s_{j+1}^{(k)}) \cdot u_{Cu,j+1}^{(k+1)} + \hat{j}_{Cu,j+1} - j_{Cu,j}, \quad (2.24)$$

$$\text{unde: } G_{dCu}(s_{j+1}^{(k)}) = \frac{C_{du}(s_{j+1}^{(k)})}{h}; \quad \hat{j}_{Cu,j+1} = \frac{Q_{Cu}(s_{j+1}^{(k)})}{h}; \quad j_{Cu,j} = \frac{q_{Cu,j}}{h}; \quad j_{Cu,j+1,j} = \hat{j}_{Cu,j+1} - j_{Cu,j}.$$

La momentul $t_{j+1} = t_j + h$ și iterația $(k+1)$, caracteristica unei bobine neliniare c.i. aproximată printr-o curbă continuă liniarizată pe porțiuni are următoarea formulă:

$$\varphi_{Li,j+1}^{(k+1)} = \hat{\varphi}_{Li}(i_{Lu,j+1}^{(k+1)}) = L_{di}(s_{j+1}^{(k)}) \cdot i_{Lu,j+1}^{(k+1)} + \Phi_{Li}(s_{j+1}^{(k)}). \quad (2.25,a)$$

$$i_{Li}^-(s_{j+1}^{(k)}) \leq i_{Li,j+1}^{(k+1)} \leq i_{Li}^+(s_{j+1}^{(k)}). \quad (2.25,b)$$

La momentul t_{j+1} și iterația $(k+1)$, expresia tensiunii unei bobine neliniare c.i. liniarizată pe porțiuni, când se utilizează algoritmul Euler implicit de integrare numerică, [17-18] este:

$$u_{Li,j+1}^{(k+1)} = R_{dLi}(s_{j+1}^{(k)}) \cdot i_{Li,j+1}^{(k+1)} + \hat{e}_{Li,j+1} - e_{Li,j}, \quad (2.26)$$

$$\text{unde: } R_{dLi}(s_{j+1}^{(k)}) = \frac{L_{di}(s_{j+1}^{(k)})}{h}; \quad \hat{e}_{Li,j+1} = \frac{\Phi_{Li}(s_{j+1}^{(k)})}{h}; \quad e_{Li,j} = \frac{\Phi_{Li,j}}{h}; \quad e_{Li,j+1,j} = \hat{e}_{Li,j+1} - e_{Li,j}$$

și rezultă:

$$u_{Li,j+1}^{(k+1)} = \frac{1}{h} \left[L_{di}(s_{j+1}^{(k)}) \cdot i_{Li,j+1}^{(k+1)} + \Phi_{Li}(s_{j+1}^{(k)}) - \Phi_{Li,j} \right] \quad (2.27)$$

unde $s_{j+1}^{(k)}$ este un segment oarecare la momentul t_{j+1} și iterația (k) , iar parametrii $L_{di}(s_{j+1}^{(k)})$ și $\Phi_{Li}(s_{j+1}^{(k)})$ reprezintă panta, inductivitatea diferențială și ordonata în origine corespunzătoare segmentului $s_{j+1}^{(k)}$. Intervalul $\left[i_{Li}^-(s_{j+1}^{(k)}), i_{Li}^+(s_{j+1}^{(k)}) \right]$ este domeniul de definiție al segmentului $s_{j+1}^{(k)}$.

Algoritmul de formulare și rezolvare a ecuațiilor hibride (2.18) pentru circuitele analogice neliniare comportă următorii pași, [15-18]:

P1. Se selectează un arbore normal;

P2. Se înlocuiesc toate elementele neliniare controlate în tensiune (c.u.) cu surse ideale independente de tensiune echivalente, iar cele controlate în curent (c.i.) cu surse ideale independente de curent echivalente;

P3. La momentul $t_{j+1} = t_j + h$, se substituie bobinele liniare (cuplate sau nu magnetic) și condensatoarele liniare cu circuite echivalente companion (circuite rezistive, discrete asociate unui algoritm implicit de integrare). Se obține astfel un circuit liniar rezistiv, care conține surse comandate, surse independente de tensiune și curent (inclusiv cele prin care au fost substituite elementele de circuit neliniare c.u., respectiv c.i.) și rezistoare liniare (inclusiv cele din circuitele echivalente companion ale bobinelor și condensatoarelor liniare);

P4. Se simulează și analizează cu unul din programele: **ASINOM** - Analiza **SI**mbolică bazată pe metoda **NO**dală **MO**dificată (**CSAP** – **C**ircuit **S**ymbolic **A**nalysis **P**rogram) și simulatorul simbolic **MAPLE**, **ACA** – Program de Analiză a Circuitelor Analogice (**ECAP** – **E**lectrical **S**ymbolic **A**nalysis **P**rogram) și programul **MATLAB** [16, 17], circuitul rezistiv obținut la pasul **P3**. Astfel, se obțin expresiile complet simbolice sau numeric-simbolice ale vectorului curenților elementelor neliniare c.u. \mathbf{i}_u și ale tensiunilor elementelor neliniare c.i. \mathbf{u}_i în funcție de: vectorul t.e.m. \mathbf{e} (curenților \mathbf{j}) ale surselor ideale independente de tensiune (curent), vectorul t.e.m. \mathbf{e}_{Lj} (curenților \mathbf{i}_{Cj}) din schemele echivalente companion ale bobinelor liniare (condensatoarelor liniare) și în funcție de variabilele independente \mathbf{u}_u și \mathbf{i}_i . Din expresiile vectorilor \mathbf{i}_u și \mathbf{u}_i se determină matricea hibridă \mathbf{H} , vectorul \mathbf{S}_{j+1} - vectorul sursă la momentul t_{j+1} determinat de sursele independente de tensiune și de curent și vectorul $\mathbf{S}_{L,j}$ - vectorul sursă corespunzător surselor independente din modelele rezistive, discrete, asociate unui algoritm implicit de integrare ale bobinelor și condensatoarelor liniare;

P5. În ecuațiile (2.18) se înlocuiesc expresiile caracteristicilor neliniare, liniarizate pe porțiuni, ale elementelor neliniare de circuit, date de relațiile:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{u,j+1}^{(k+1)} \\ \mathbf{u}_{i,j+1}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{du} \left(\mathbf{s}_{j+1}^{(k)} \right) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{di} \left(\mathbf{s}_{j+1}^{(k)} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{u,j+1}^{(k+1)} \\ \mathbf{i}_{i,j+1}^{(k+1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{j}}_{Cu,j+1} - \mathbf{j}_{Cu,j} \\ \hat{\mathbf{e}}_{Li,j+1} - \mathbf{e}_{Li,j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{j}_u \left(\mathbf{s}_{j+1}^{(k)} \right) \\ \mathbf{e}_i \left(\mathbf{s}_{j+1}^{(k)} \right) \end{bmatrix}, \quad (2.28)$$

în care $G_{du}(s_{j+1}^{(k)})$ și $J_{Ru}(s_{j+1}^{(k)})$ ($R_{di}(s_{j+1}^{(k)})$ și $e_i(s_{j+1}^{(k)})$) reprezintă matricea și vectorul conductanțelor (rezistențelor) diferențiale și ordonatelor în origine ale elementelor neliniare de circuit c.u. (c.i) corespunzătoare segmentului $s_{j+1}^{(k)}$. Elementele vectorului $\hat{J}_{Cu,j+1} - j_{Cu,j}$ și cele ale vectorului $\hat{e}_{Li,j+1} - e_{Li,j}$ corespund liniarizării pe porțiuni a condensatoarelor neliniare c.u. – relația (2.15) și respectiv liniarizării pe porțiuni bobinelor neliniare c.i. – relația (2.17). Elementele acestor vectori sunt nule pentru rezistoarele neliniare c.u. și pentru cele c.i.

După substituirea ecuației (2.19) în ecuația (2.9) se ajunge la forma matriceală generală a ecuațiilor hibride ale circuitului analogic analizat:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} G_{du}(s_{j+1}^{(k)}) - G_{u,u} \\ -A_{i,u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -B_{u,i} \\ R_{di}(s_{j+1}^{(k)}) - R_{i,i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{u,j+1}^{(k+1)} \\ i_{i,j+1}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{u,e} & B_{u,j} \\ A_{i,e} & R_{i,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{j+1} \\ j_{j+1} \end{bmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} G_{u,L} & B_{u,C} \\ A_{i,L} & R_{i,C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{C,j} \\ j_{C,j} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{J}_{Cu,j+1} - j_{Cu,j} \\ \hat{e}_{Li,j+1} - e_{Li,j} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} j_u(s_{j+1}^{(k)}) \\ e_i(s_{j+1}^{(k)}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.29)$$

P6. Sistemul de ecuații hibride neliniare se rezolvă cu un procedeu iterativ adecvat la fiecare pas de timp $t_{j+1} = t_j + h, j = 0, \dots, n_{final}$, (2.29). Aceste ecuații se pot obține și prin înlocuirea în ecuațiile (2.18) a caracteristicilor elementelor neliniare de circuit cu expresiile lor analitice (dacă acestea sunt date analitic).

Capitolul 3

Descrierea programului de analiză hibridă a circuitelor neliniare

Se consideră circuitul neliniar din figura 3.1 care funcționează în regim variabil. Acesta conține un rezistor neliniar c.i., un condensator neliniar c.u., o sursă de curent comandată în tensiune, o sursă independentă de tensiune, un rezistor liniar, un condensator liniar și o bobină liniară.

Se substituie elementele de circuit neliniare c.u., c.i cu surse ideale independente de tensiune și respectiv de curent, iar elementele liniare dinamice de circuit (condensatorul C_3 și bobina L_6) se înlocuiesc cu modele rezistive discrete, asociate unui algoritm implicit de integrare numerică (Euler implicit), rezultând schema echivalentă din figura 3.2.

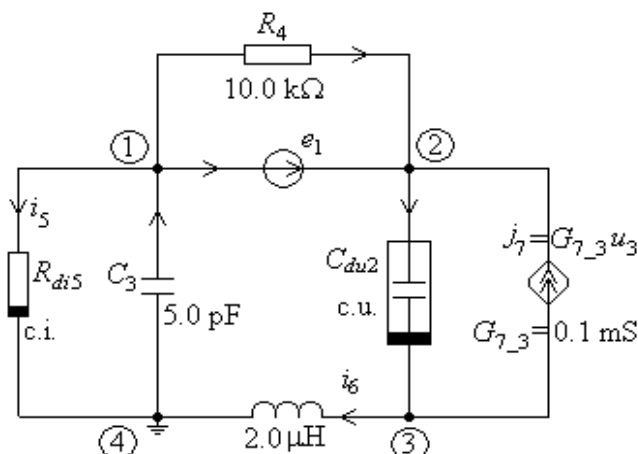


Fig. 3.1. Schema inițială a circuitului neliniar.

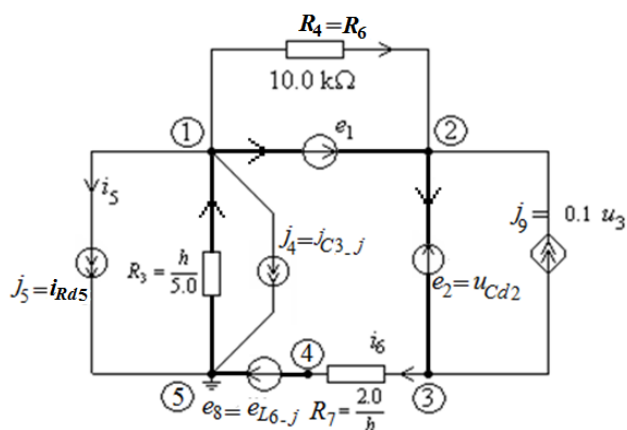


Fig. 3.2. Schema echivalentă a circuitului din figura 3.1, unde: rezistorul neliniar c.i. se înlocuiește cu sursa ideală independentă echivalentă de curent; condensatorul neliniar se înlocuiește cu sursa ideală independentă echivalentă de tensiune; elementele dinamice liniare se înlocuiesc cu scheme echivalente rezistive asociate cu algoritmul de integrare Euler implicit.

Rezultatele obținute în urma simulării, cu programul ASINOM, a circuitului din figura 3.2 cu fișierul de intrare *ex1_Hib.smb*

NECUNOSCUTELE SISTEMULUI

V1 V2 V3 V4 I1 I2 I8

SISTEMUL DE ECUATII

$$\begin{aligned}
 & + (+1/((h/C3))+1/(R4))*V1 + (-1/(R4))*V2 + (+1)*I1 = -jC3_j-iLd5 \\
 & + (-1/(R4)+G9_3)*V1 + (+1/(R4))*V2 + (-1)*I1 + (-1)*I2 = 0 \\
 & + (-G9_3)*V1 + (+1/((L6/h)))*V3 + (-1/((L6/h)))*V4 + (+1)*I2 = 0 \\
 & + (-1/((L6/h)))*V3 + (+1/((L6/h)))*V4 + (+1)*I8 = 0 \\
 & + (+1)*V1 + (-1)*V2 = -E1 \\
 & + (-1)*V2 + (+1)*V3 = -uCd2
 \end{aligned}$$

Analiza circuitelor analogice neliniare cu metoda hibridă

$$+ (+1)*V4 = -eL6_j$$

În figura 3.3 se află interfața grafică a programului dezvoltat în MAPLE. Formularea automată a ecuațiilor hibride în formă simbolică, parțial simbolică sau numerică se poate efectua folosind acest program.

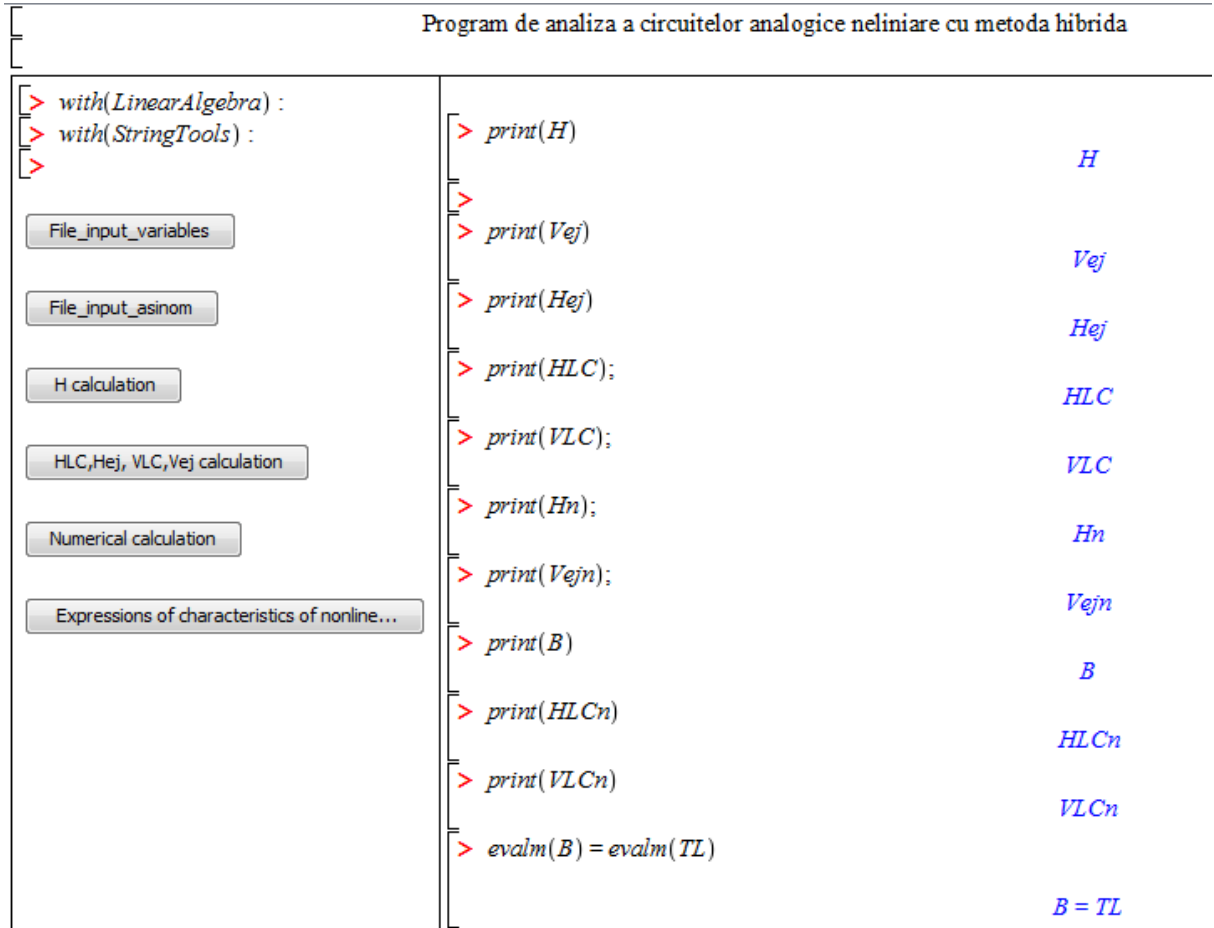


Fig. 3.3. Interfața programului de formulare automată a ecuațiilor hibride

Analiza în domeniul timp a circuitului se poate efectua cu un program de calcul în Matlab, utilizând ecuațiile hibride generate mai sus, sau cu programul ACA – pornind de la descrierea circuitului printr-un fișier de intrare de tip netlist. Caracteristicile elementelor neliniare de circuit sunt specificate prin puncte.

Fișierul de intrare *ex1_Hib.nln*, este:

7	epsilon=0.00001	10.0 50.0
4	puncte Cdu2:	80.0 60.0
1 2 e1 e=e1(i)		100.0 60.5
2 3 Cdu2 pct=9	-100.0 -60.5	
4 1 C3 c=5.0	-80.0 -60.0	puncte Rdi5:

Analiza circuitelor analogice neliniare cu metoda hibridă

1 2 R4 r=10.0	-10.0 -50.0	
1 4 Rdi5 pct=3	-1.0 -10.0	-5.5 -200.0
3 4 L6 l=4.0	0.0 0.0	0.0 0.0
3 2 j7(u) 3 gt=0.1	1.0 10.0	10.5 200.0

În fișierul de intrare *ex1_Hib.nln* parametrii și mărimile caracteristice circuitului sunt exprimați astfel: rezistențele în $k\Omega$, capacitățile în pF , inductivitățile în μH , timpul în ns , tensiunile în V , curenții în mA , frecvența GHz și sarcinile electrice în nC . Programul ACA cu Matlab permite analiza Fourier (analiza în domeniul frecvenței), apelând subrutina *fft.m*. Considerând $e_1 = 40.0 * \sin(2\pi(f_1 - f_2) * t + 1/57)$ ($f_1 = 1GHz, f_2 = 0.1 GHz$), și apelând programul de mai sus se obțin rezultatele prezentate în Tabelul 3.1.

Programul **ACA**– **A**naliza **C**ircuitelor **A**nalogice este dezvoltat în limbaj $C++$, folosind aplicația Microsoft Visual Studio. Programul ACA folosește metoda nodală modificată și se bazează pe integrarea numerică a ecuațiilor diferențiale ordinare, metoda regresivă generalizată de ordinul unu (algoritmul Euler implicit) , [42-43].

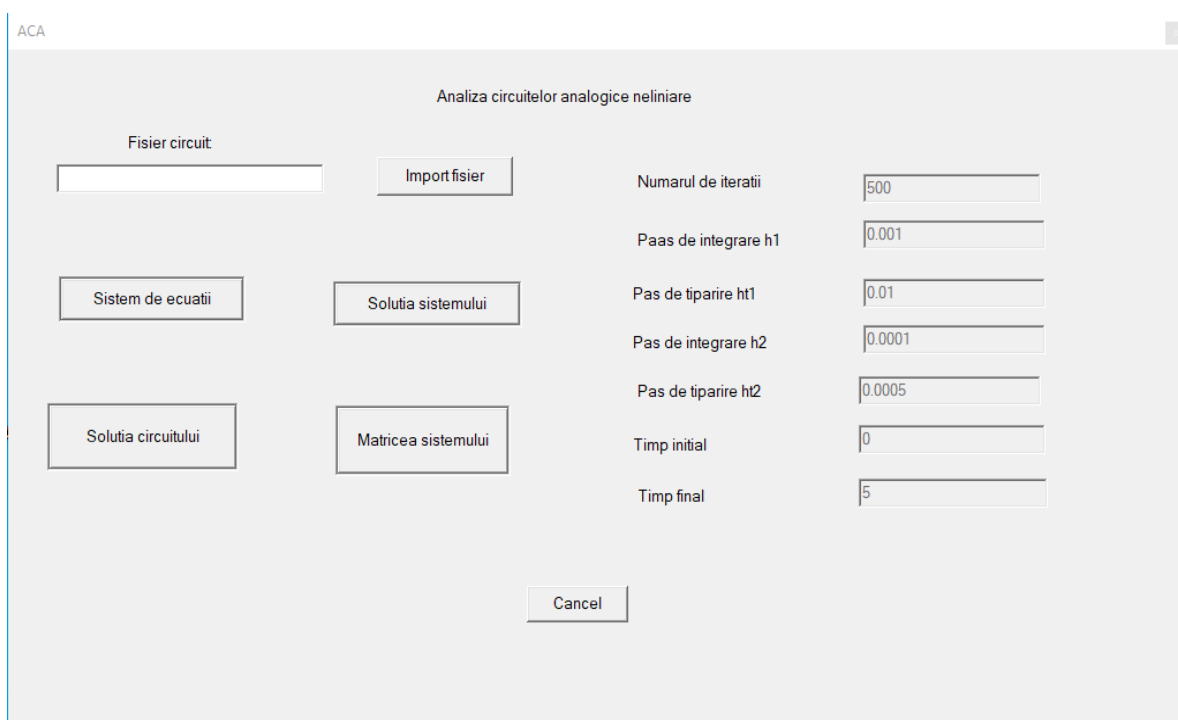
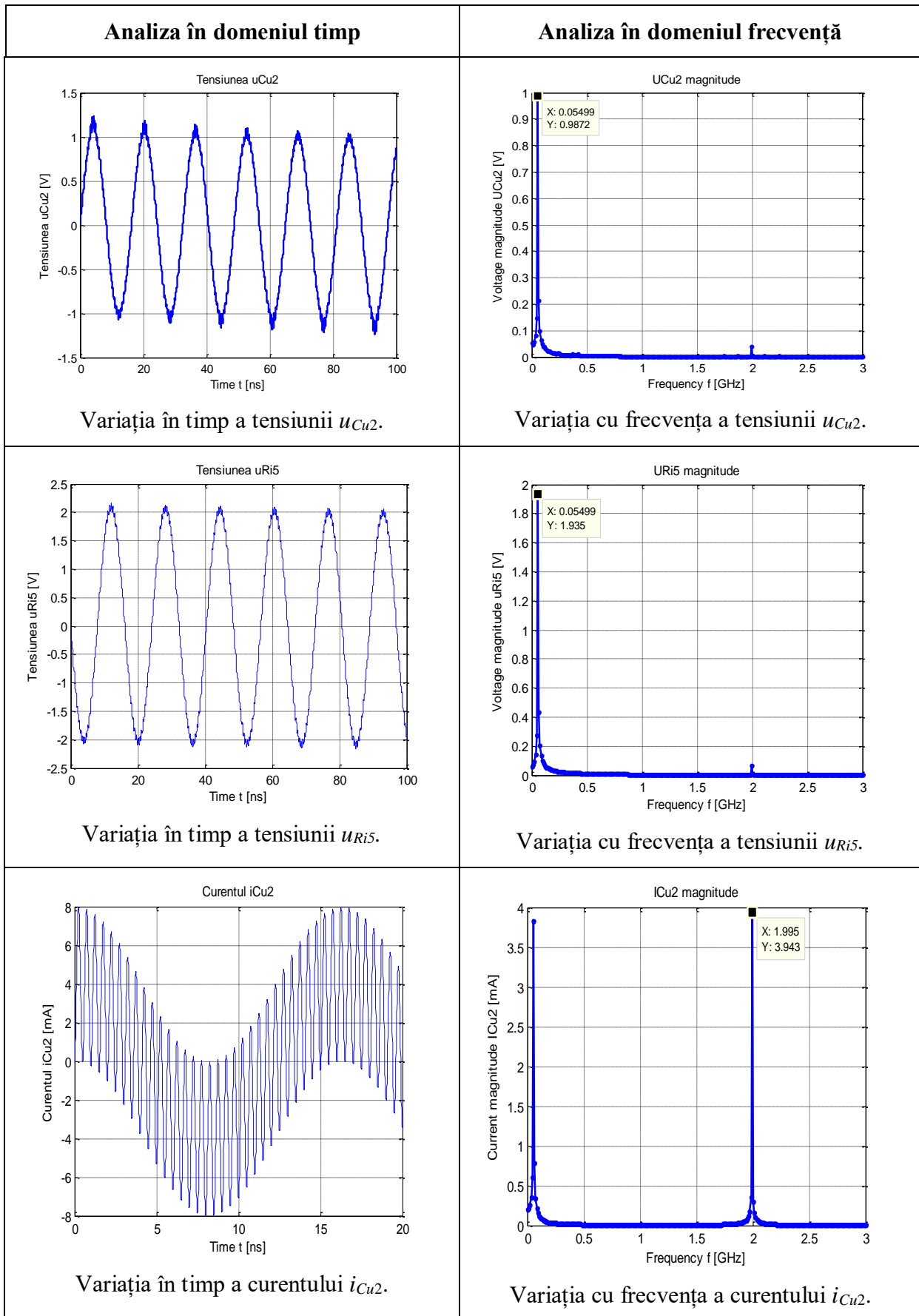
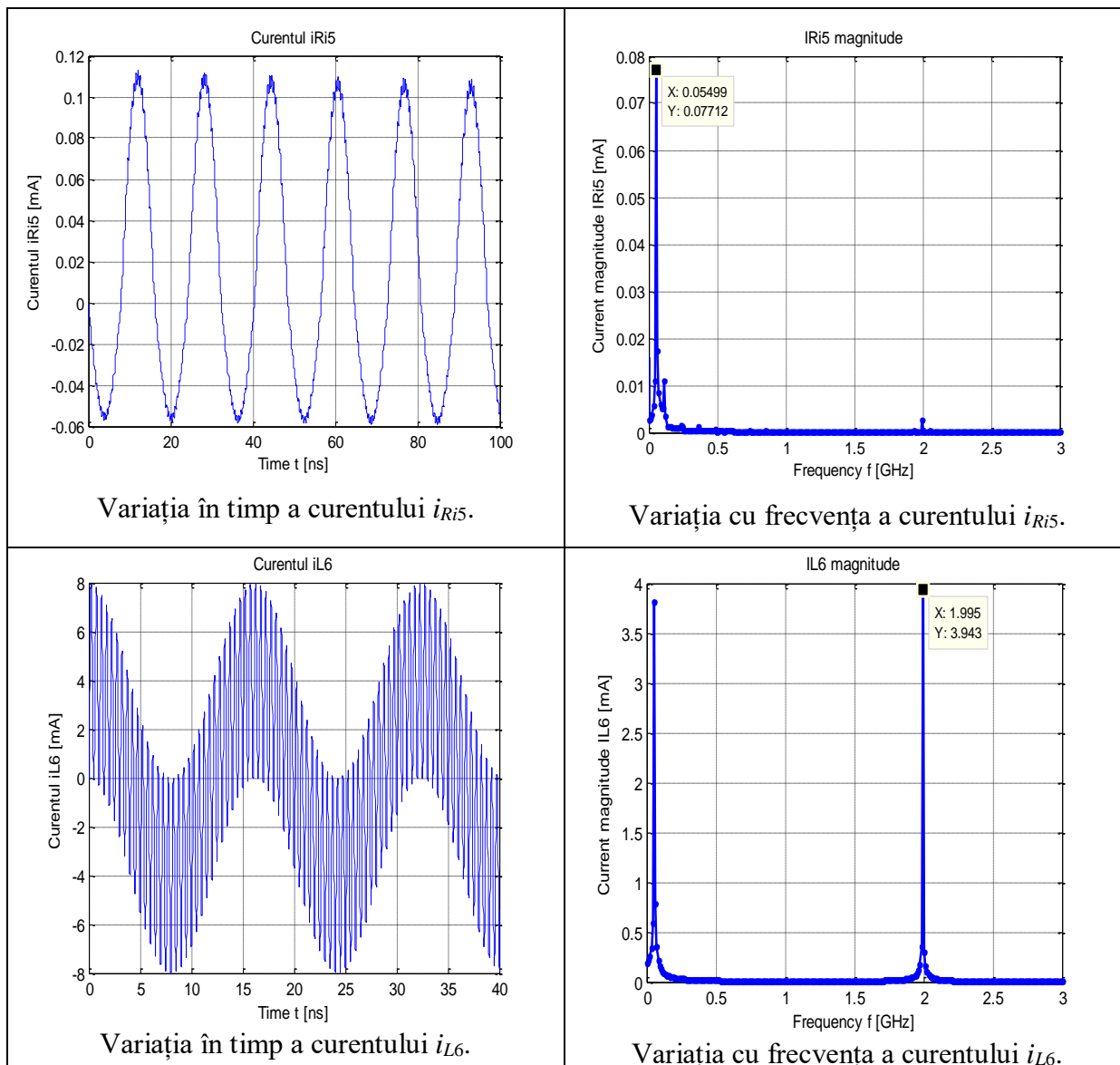


Fig. 3.8. Interfața grafică a programului ACA.

Tabelul 3.1





Variația în timp a curentului i_{Ri5} .

Variația cu frecvența a curentului i_{Ri5} .

Variația în timp a curentului i_{L6} .

Variația cu frecvența a curentului i_{L6} .

Capitolul 4

Aplicabilitatea matricei hibride în practică

Pentru realizarea unui sistem de împământare în conformitate cu standardele europene este obligatorie studierea comportamentului electric al solului. Rezistivitatea solului influențează rezistența de dispersie a prizei de pământ. Cunoașterea rezistivității solului în locul unde se dorește realizarea prizei de pământ intră în atribuțiunea unui inginer proiectant și acesta trebuie să țină seama de faptul că rezistivitatea solului variază în funcție de temperatură, conținutul de umiditate și adâncimea la care se îngroapă electrozii ce constituie priza de pământ. Proprietățile electrice ale solului sunt caracterizate prin rezistivitatea acestuia. Este dificilă determinarea valorii acesteia din cauza faptului că solul nu are o structură omogenă, fiind format din straturi de materiale diferite.

Analiza circuitelor analogice neliniare cu metoda hibridă

Rezolvarea circuitului analogic rezistiv neliniar echivalent se poate face cu metoda hibridă.

În figura 3.6 este prezentat circuitul analogic rezistiv neliniar echivalent unde rezistivitatea solului este $\rho = 200 [\Omega \cdot m]$.

Această aplicație practică tratează rezolvarea circuitului analogic rezistiv neliniar din figura 3.6. Aceasta neliniaritate este datorată valorilor rezistențelor specifice ale solurilor.

Conform normativului I7/2011, (conform NTE 007/08/00) valorile rezistențelor specifice ale solurilor variază în funcție de așezarea geografică de pe glob, astfel [48]:

- nisip cu 10% umiditate 1Km/W ;
- pământ argilos 0,65 Km/W ;
- teren nisipos cu humă sau lut 0,65 Km/W ;
- nisip uscat (0% umiditate) 3,00 Km/W ;
- teren obișnuit uscat 3,00 Km/W

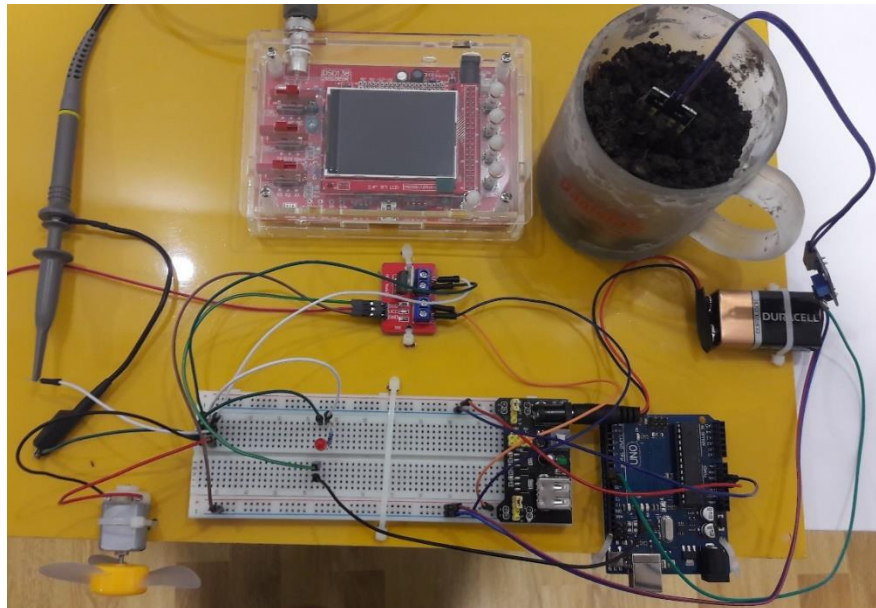


Fig. 4.4. Macheta aplicație practice cu componentele ansamblate

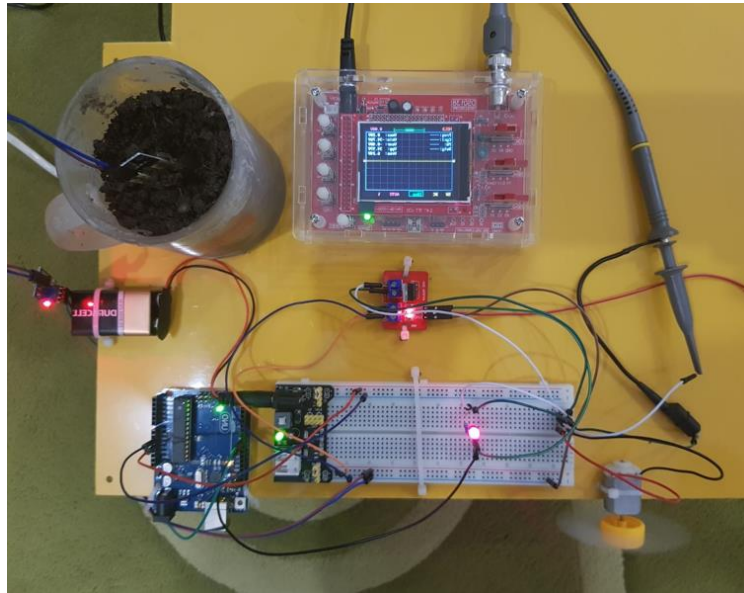


Fig. 4.5. Scenariul când motorul pornește datorită solului uscat (umiditate scăzută)

Vom lua ca etalon valoarea rezistenței specifice a solului 1 Km/W (kelvin metru/watt) pentru sol nisipos cu 10% umiditate.

În proba de sol (cea aflată în cană) în funcție de umiditate, temperatura adâncimea la care se regăsește senzorul avem mai multe valori ale rezistențelor specifice.

Dacă valoarea măsurată este mai mică decât valoarea etalon atunci înseamnă că solul este umed și pompa de apă reprezentată de către motorul de curent continuu de 5 V nu va porni.

Dacă valoarea măsurată este mai mare decât valoarea etalon atunci înseamnă că solul este uscat / arid și pompa de apă reprezentată de către motorul de curent continuu de 5 V va porni până când valoarea rezistenței specifice a solului va atinge valoarea rezistenței etalon.

Aplicația practică constă în modelarea variației rezistențelor specifice ale solului.

Componentele aplicației practice folosite constă în:

- modul tranzistor de putere IRF520
- placă Arduino
- modulul cu senzor de umiditate
- kit de osciloscop DSO138

Capitolul 5

Concluzii finale, contribuții, direcții de cercetare viitoare

Capitolul final sintetizează activitatea științifică desfășurată în perioada elaborării acestei teze de doctorat, prezentând punctual concluziile și rezultatele obținute. Capitolul se încheie cu o serie de sugestii și recomandări privind cercetările ulterioare.

Principalele contribuții originale aduse de autoare în prezenta teză de doctorat sunt:

- Lucrarea debutează cu o documentare atent selectată și la zi privind analiza, modelarea, simularea și proiectarea circuitelor analogice liniare și/sau neliniare. Se prezintă principalele probleme ce apar în simularea circuitelor analogice neliniare. Se identifică metodele de analiză, modelarea, simularea și proiectarea circuitelor analogice liniare și/sau neliniare existente și cele mai utilizate programe de calcul. Rezultatele sunt sintetizate într-o manieră folositoare și constituie astfel un instrument util pentru dezvoltarea unor cercetări ulterioare în domeniu;
- Implementarea originală a unei metode generalizate de analiză a circuitelor neliniare numită *analiză hibridă*. Se numește hibridă deoarece modelul matematic al circuitului analizat are ca variabile independente atât curenți cât și tensiuni;
- Sunt reliefate avantajele metodei hibride în raport cu celelalte metode existente de analiza și este, în special, comparată cu metoda nodală modificată. Metoda hibridă are ecuațiile formate dintr-un număr relativ mic de variabile ceea ce determină reducerea timpului de calcul și a memoriei folosite pentru analiza pe calculator a circuitelor neliniare. Un alt avantaj constă în separarea părții liniare de partea neliniară a circuitului. Ecuațiile care descriu funcționarea părții liniare se formulează o singură dată, la începutul procesului de calcul, ceea ce ușurează efortul de calcul. Aceste ecuații rămân invariabile pe parcursul procesului iterativ de rezolvare. În felul acesta se optimizează într-o măsură semnificativă efortul de calcul;
- În primul capitol sunt prezentate pe scurt câteva noțiuni fundamentale despre analiza circuitelor neliniare și parametrice întocmai pentru a fi înțeles algoritmul metodei de analiză hibridă;
- În capitolul 2 este prezentată metoda de analiză hibridă pentru circuite neliniare rezistive cât și pentru cele care conțin elemente de circuit dinamice (condensatoare și bobine). Bobinele liniare și/sau neliniare, condensatoarele liniare și/sau neliniare și rezistoarele neliniare se substituie cu circuite echivalente discrete, rezistive și asociate unui algoritm implicit de integrare numerică. Odată formulate, ecuațiile hibride ale circuitului pot fi rezolvate printr-un număr variat de tehnici iterative, cea mai generală și cea mai folosită fiind metoda bazată pe algoritmul *Newton-Raphson*. Analiza circuitelor neliniare în regim dinamic folosește teoremele lui Kirchhoff, schemele

companion asociate unui algoritm implicit de integrare numerică (Euler implicit), ecuațiile caracteristice ale rezistoarelor liniare și relațiile de definiție ale surselor comandate. În general, metoda hibridă reușește să găsească o soluție pentru marea majoritate a circuitelor analizate. Obținerea unei soluții nu poate fi garantată chiar dacă circuitul și specificațiile sale sunt corecte, datorită neliniarității ecuațiilor ce descriu circuitul și a imperfecțiunii modelelor analitice ale dispozitivelor. În majoritatea cazurilor când nu se poate obține o soluție, eșecul se datorează problemelor date de circuit, fie din cauza modului de descriere a acestuia, fie din cauza faptului că circuitul analizat nu este funcțional;

- Cu cât complexitatea circuitului este mai avansată, crește atât dificultatea formulării unor criterii de existență a soluțiilor cât și dificultatea aplicării lor. În asemenea cazuri se evită aplicarea unor criterii cu grad de generalitate mai avansat și se recurge la tatonări pentru găsirea soluției (soluțiilor), eventual prin mai multe metode. Criteriile specifice circuitelor rezistive sunt valabile atât pentru regimuri staționare, cât și pentru regimuri dinamice dacă analiza se bazează pe scheme echivalente rezistive companion;
- În capitolul 3 sunt prezentate mai multe exemple de circuite electrice neliniare. Acestea sunt analizate cu ajutorul a două programe de analiză a circuitelor și anume: Asinom—Analiza Simbolică bazată pe Metoda Nodală Modificată și ACA - Program de Analiză a Circuitelor analogice. Ambele exemple prezentate sunt rezolvate prin metoda nodală modificată și prin metoda hibridă pentru a putea face în final o comparație între cele două metode. Analizând rezultatele grafice obținute se observă că variațiile curenților și tensiunilor obținute prin metoda nodală modificată și metoda hibridă sunt asemănătoare. Singurele diferențe care apar se datorează pasului de integrare (h). Cu cât pasul de integrare este mai mic cu atât diferențele sunt mai mici;
- După rezolvarea circuitelor cu metoda nodală modificată, respectiv metoda hibridă se observă că metoda hibridă are un avantaj major față de metoda nodală modificată și anume lucrează cu un număr mai mic de variabile ceea ce conduce la reducerea timpului de calcul și memoria necesară analizei pe calculator a circuitelor neliniare;
- Implementarea, în capitolul 3, a unui algoritm de analiză a circuitelor neliniare analogice, bazat pe utilizarea circuitelor echivalente companion pentru elementele acumulative de energie liniare și/sau neliniare liniarizate pe porțiuni;
- Pentru toate exemplele prezentate în lucrare sunt descriși, pas cu pas, algoritmi de rezolvare ai acestora;

- In capitolul 4 se tratează rezolvarea unui circuit analogic rezistiv neliniar cu o aplicație practica. Aceasta neliniaritate este datorată valorilor rezistențelor specifice ale solurilor. Cu un sensor (de umiditate) vom măsura valoarea umidității din solul discretizat Dacă solul este nisipos uscat (0% umiditate) ieșirea digitală a senzorului de umiditate va fi setată pe “1” logic. Acest semnal este conectat la portul 8 digital al plăcii de dezvoltare Arduino Uno, port setat ca port de intrare (Input). Portul 9 digital al plăcii de dezvoltare Arduino Uno este setat ca port de ieșire(Output). Acest semnal reprezintă comanda tranzistorului Mosfet situat pe modulul tranzistor de putere IRF520 ce acționează pornirea unei pompe(simulat în aplicația practică cu ajutorul unui motor de curent continuu de 5 V).

Pornind de la rezultatele obținute în această teză, se pot identifica următoarele direcții principale de continuare a cercetărilor viitoare:

- Adaptarea softurilor prezentate în teză la nevoile actuale și viitoare ale științei ingineresti referitoare la analiza circuitelor analogice și digitale;
- Utilizarea balanței armonice și seria Volterra pentru studierea circuitelor neliniare în regim periodic nesinusoidal;
- Introducerea de noi instrumente(unelte de calcul) de către proiectanții circuitelor care să le permită să înțeleagă și să exploateze neliniaritatea circuitelor pentru o procesare cât mai utilă;
- Studierea comportamentului neliniar al circuitului într-un mod grafic, facilitând dezvoltarea unei aprecieri calitative pentru circuite analogice neliniare.

ANEXE

Codul programului dezvoltat în MAPLE pentru analiza circuitelor neliniare cu metoda hibridă

Deschidere fișier și citește date

```

>openDialogue := module()
  local MAPLEt, ModuleApply;
  global fd;uses MAPLEts:-Elements;
  MAPLEt := MAPLEt(FileDialog['FD1'](
    '-filefilter' = "txt",
    '-filterdescription' = "Text Files",
    '-onapprove' = Shutdown( ['FD1'] ),
    '-oncancel' = Shutdown() ));
  ModuleApply := proc()
    local G;
    G := MAPLEts:-Display(MAPLEt);
    if G::list and numelems(G)>0 and G[1]<>"" then
      fd:=fopen( G[1],READ,TEXT)
    end if;
    return NULL;
  end proc;
end module;

global first,second,third,four;
OpenDialogue();
>first := readline(fd);
>second := readline(fd);
>third := readline(fd);
>four := readline(fd);
>fclose(fd);
>d := Split(third);
>for j to nops(d) do parse(d[j], statement) end do;
rez1 := simplify(rez1)
>covar := Split(first);

```

```
>var := Split(second);
>print(nops(var));
>for j to nops(var) do varp[j] := parse(var[j]) end do;
>for j to nops(covar) do covarp[j] := parse(covar[j]) end do;
```

Calculare vector covariabilelor

```
> for j to nops(covar) do vectorCovar[j] := collect(simplify(subs(rez1, covarp[j])),
[seq(varp[i], i = 1 .. nops(var))]) end do;
```

Calculare matrice hibride H

```
> for j to nops(covar) do for i to nops(covar) do H[j][i] := 0 end do end do;
> for j to nops(covar) do for i to nops(covar) do H[j][i] := coeff(vectorCovar[j], varp[i]);
print(H[j][i]) end do end do;
```

Calculare matrice HLC and Vej

```
dinamic := Split(five);
for j from 1 to nops(dinamic) do
din[j] := parse(dinamic[j]) end do;
if din[1] <> 0 then print*ana else print*blabla end if;
if din[1] <> 0 then
print (ana);
for j from 1 to nops(covar) do
for i from 1 to nops(dinamic) do
HLC[j][i] := coeff(vectorCovar[j], din[i]);
end do; end do; end if;
ss := Split(six);
for j from 1 to nops(ss) do surse[j] := parse(ss[j]) end do;
for j from 1 to nops(covar) do
for i from 1 to nops(ss) do Hej[j][i] := coeff(vectorCovar[j], surse[i]); print(Hej[j][i]) end do
end do;
M3 := Matrix(nops(covar), nops(ss), 0);
for j from 1 to nops(covar) do
for i from 1 to nops(ss) do
M3[j, i] := Hej[j][i] end do end do;
print(M3);
M4 := Matrix(nops(ss), 1, 0);
for i from 1 to nops(ss) do M4[i] := surse[i] end do;
```

```

Vej := Multiply(M3, M4);
if din[1] <> 0 then HLCmatrix := Matrix(nops(covar), nops(dinamic), 0);
for j from 1 to nops(covar) do
for i from 1 to nops(dinamic) do
HLCmatrix[j, i] := HLC[j][i] end do end do;
dinmatrix := Matrix(nops(dinamic), 1, 0);
for j from 1 to nops(dinamic) do
dinmatrix[j] := din[j] end do;
VLC := Multiply(HLCmatrix, dinmatrix) end if;
end use;

```

Calculare numerică a matricelor

```

num := Split(seven);
for j from 1 to nops(num) do valori[j] := parse(num[j]) end do;
if din[1] <> 0 then VLCn := subs(valori[1], evalm(VLC));
print(SLCn); HLCn := subs(valori[1], evalm(HLCmatrix)) end if;
Hejn := subs(valori[1], evalm(M3));
Vejn := subs(valori[1], evalm(Vej));
Hmatrix := Matrix(nops(covar), nops(covar), 0);
for j from 1 to nops(covar) do for i from 1 to nops(covar) do
Hmatrix[j, i] := H[j][i]; print(Hmatrix[j][i]) end do end do;
Hn := subs(valori[1], evalm(Hmatrix));
end use;

```

Expresiile caracteristicilor elementelor neliniare de circuit, liniarizate pe porțiuni, corespunzătoare combinației oarecare s de segmente și ecuații hibride:

```

segn := Split(eight);
for j from 1 to nops(segn) do segmente[j] := parse(segn[j]); end do;
segmentematrix := Vector(nops(segn), 0);
for j from 1 to nops(segn) do segmentematrix[j] := segmente[j]; end do;
C := Matrix(nops(covar), nops(covar), 0);
for j from 1 to nops(covar) do
for i from 1 to nops(covar) do
if i = j then C[j, i] := segmentematrix[i]-Hn[j, i];
else C[j, i] := -Hn[j, i]; end if; end do; end do;
ninevector := Split(nine);

```



```
for j from 1 to nops(ninevector) do suiv[j] := parse(ninevector[j]) end do;
Sui := Vector(nops(ninevector), 0);
for j from 1 to nops(ninevector) do Sui[j] := suiv[j]; end do;
if din[1] <> 0 then TL := evalm(Vejn+VLCn-Sui); else TL := evalm(Vejn-Sui); end if;
fourvector := Split(four);
for j from 1 to nops(fourvector) do xv[j] := parse(fourvector[j]); end do;
x := Vector(nops(fourvector), 0);
for j from 1 to nops(fourvector) do x[j] := xv[j]; end do;
B := Multiply(C, x);
evalm(B) = evalm(TL)
end use;
```

Bibliografie

Bibliografie capitolul 1

- [1] M. Iordache, Lucia Dumitriu, Simularea Asistată de Calculator a Circuitelor Analogice – Algoritmi și Tehnici de Calcul, Editura POLITEHNICA Press, București 2014, ISBN 978–606-515-567-1, Vol. Al II-lea - ISBN 978-606-515-586-2 (471 pag.).
- [2] Mihai Iordache, Lucian Mandache, Analiza asistată de calculator a circuitelor analogice neliniare, 2004, Editura POLITEHNICA, București,.
- [3] Formulating hybrid equations and state equations for nonlinear circuits using SPICE Kiyotaka Yamamura and Mitsuru Tonokura, 2011
- [4] L., O., Chua, and P., M., Lin, Computer-Aided Analysis of Electronic Circuits: Algorithms and Computational Techniques, 1975.
- [5] Marjan Jenko, Development of an analog simulator for the transient analysis of electric circuits, with the aim of teaching circuit phenomena by simulating equations , IEEE 2012
- [6] Ping Liu,Xuezhong Liu,Yue Zhang,Zhiming Liang,Bo Hu, A Novel Nonlinearly Equivalent Circuit Model for Calculating Electric Fields Along the Stator End-winding of HV Rotating Machine, IEEE 2019
- [7] Filip Paulu;Jiří Hospodka, Web-Based Application for Analysis of Electrical Circuits and Systems, IEEE 2018
- [8] Chenyang Liu,Bo Zhang,Dejian Xiao,Kangning Li,Yufeng Qian,Xiaoquan Zheng, Study on simulation design of protected circuit models for non-linear dielectric conductivity measurement system under high electric field condition, IEEE 2016

[9] Georgios Rozakis, Apostolos Samelis, Symbolic/Numerical Nonlinear Circuit Analysis Using Volterra Series IEEE 2006

[10] Abdullah G. Alharbi, Mohammed E. Fouda, Zainulabideen J. Khalifa, Masud H. Chowdhury, "Electrical Nonlinearity Emulation Technique for Current-Controlled Memristive Devices", Access IEEE, vol. 5, pp. 5399-5409, 2017

[11] M. Iordache, Lucia Dumitriu, Simularea Asistată de Calculator a Circuitelor Analogice – Algoritmi și Tehnici de Calcul, Editura POLITEHNICA Press, București 2014, ISBN 978–606-515-567-1, Vol. I. ISBN 978-606-515-585-5 (477 pag.).

Bibliografie capitolul 2

[12] J. M. Ortega, W. C. Rheinboldt, Iterative solutions of nonlinear equations in several variables, New York, Academic Press, 1970.

[13] D. Sanatescu, L. Ene, M. Iordache, "Research on analysis of analog circuits with hybrid method", IEEE, 10.1109/ICATE.2016.7754601, 2016

[14] C. W. Ho, A. E. Ruehli, P. A. Brennan, "The modified nodal approach to network analysis", IEEE Trans. on CAS, Vol.22, No.6, June 1975, pp. 504-509.

[15] M. Iordache, M. Perpelea, Analiza asistată de calculator a circuitelor electrice și electronice neliniare complexe de mari dimensiuni, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1993.

[16] M. Iordache, Lucia Dumitriu, Simularea Asistată de Calculator a Circuitelor Analogice – Algoritmi și Tehnici de Calcul, Editura POLITEHNICA Press, București 2014, ISBN 978–606-515-567-1, Vol. Al II-lea - ISBN 978-606-515-586-2 (471 pag.).

[17] Mihai Iordache, Lucian Mandache, Analiza asistată de calculator a circuitelor analogice neliniare, 2004, Editura POLITEHNICA, București,

[18] M. Iordache, „Asupra metodei nodale modificate de analiză a circuitelor electrice; Partea I: Circuite electrice de c.c.“, E.E.A.-Electrotehnica 40, nr.2, febr. 1992, pp. 29-33.

[19] M. Iordache, M. Perpelea, „Modified nodal analysis for large-scale piecewise-linear nonlinear electric circuits“, Rev., Roum., Sci., Techn., Électrotechn. et Énerg., 37, nr. 4, 1992, pp. 487-496.

[20] D. A. Calahan, Computer-aided network design, McGraw-Hill, N. Y., 1972.

[21] P. R. Gray, R.G. Meyer, Circuite integrate analogice – Analiză și proiectare, Editura Tehnică, București, 1997.

- [22] Lucia Dumitriu, M. Iordache, Teoria modernă a circuitelor electrice - Vol. I - Fundamentare teoretică, Aplicații, Algoritmi și Programe de calcul, Editura All Educational S.A., București 1998.
- [23] A. Vladimirescu, SPICE, Editura Tehnică, București, 1999.
- [24] M. Iordache, Lucia Dumitriu, Simularea Asistată de Calculator a Circuitelor Analogice – Algoritmi și Tehnici de Calcul, Editura POLITEHNICA Press, București 2014, ISBN 978–606-515-567-1, Vol. I. ISBN 978-606-515-585-5 (477 pag.).
- [25] Chua, L. O., Memristor - the missing circuit element. IEEE Trans. Circuit Theory, Vol. 18, no. 5 50725–519 (1971).
- [26] A. N. Willson Jr., „Some aspects of the theory of nonlinear networks“, Proc. IEEE, Vol. 61, Aug. 1973, pp. 1092- 1113.
- [27] C. I. Mocanu, Teoria circuitelor electrice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- [28] M. Preda, P. Cristea, Bazele electrotehnicii, Vol. II, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [29] M. Hasler, J. Neiryneck, Circuits nonlinéaires, Press Polytechniques Romandes, Lausanne, 1983.
- [30] A. E. Schwarz, Computer-aided design of microelectronic circuits and systems, Academic Press, London, 1987.
- [31] A. E. Ruehli (Ed.), Circuit analysis, simulation and design, Elsevier, N.Y., 1986.
- [32] M. Iordache, Analiza asistată de calculator a circuitelor electrice neliniare - Algoritmi și tehnici de calcul, Lit. Universității „Politehnica“ București, 1993.
- [33]. P. Cristea, Analiza circuitelor electrice neliniare, Litografia U.P.B, București, 1979.
- [34] L. O. Chua, Introduction to nonlinear network theory, Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1969.
- [35] T. Marian, SPICE, Editura Teora, București, 1996.
- [36] Șt. Andrei, PSPICE – Analiza Asistată de Calculator a Circuitelor Electronice, Editura ICPE, București, 1996.
- [37] C. Voloșencu, Analiza Circuitelor cu Programul SPICE, Editura Electronistul, Timișoara, 1994.

[38] T.G. Engel, „SPLICE : An Analytical Network Analysis Software“, IEEE Transactions on Education, Vol.39, no.3, aug.1996, pp.394-398.

[39] P. Tuinega, SPICE: A Guide to Circuit Simulation and Analysis Using PSPICE, Prentice-Hall, N.Y., 1988.

[40] M. Iordache, Lucia Dumitriu, PACER – Program de Analiză a Circuitelor Electronice Neliniare Rezistive, Manual de utilizare, Biblioteca Catedrei de Electrotehnică, Universitatea „Politehnica“ București, 1988.

Bibliografie capitolul 3

[41] Andrei Vladimirescu, The Spice Book, Wiley Publishing, 1994.

[42] Lucia Dumitriu, M. Iordache, Simularea numerică a circuitelor analogice cu programul SPICE MATRIX ROM, București, 2006, ISBN (10) 973 – 755 – 054 – 4, ISBN (13) 978 – 773 – 755 - 054 – 5 (133 pag.), www.dragos.elth.pub.ro.

[43] M. Iordache, Lucia Dumitriu, Teoria Circuitelor Electrice, Editura Matrix ROM, București, 2007, ISBN: 979 – 973 – 755 – 174 - 0 (289 pag.), www.dragos.elth.pub.ro. 3. M. Iordache, Bazele Electrotehnicii, Editura Matrix ROM, București, 2008, ISBN: 978 – 973 – 755 – 296 - 9 (281 pag.), www.dragos.elth.pub.ro.

[44] M. Iordache, Simularea Simbolică, Numeric-Simbolică și Numerică a Circuitelor Analogice – Ghiduri de Utilizare a Programelor, MATRIX ROM, București, 2015, ISBN 978 – 606 – 25 – 0126 - 6, 621.3.049.77, (413 pag.)

[45] Diana-Ramona Sănătescu, Lucian-Vasile Ene, Alexandra Ionescu, Alina Oroșanu, Iordache M., ”A new approach for nonlinear analog circuits analysis” U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 81, Iss. 3, 2019 ISSN 2286-3540, 2019..

[46] Mihai Iordache, Marilena Stanciulescu , Diana Sanatescu, Sorin Deleanu, Alexandra Ionescu, Anastasie Moscu , Lavinia Bobaru, „CSAP and TFSG – Circuit Symbolic Analysis Programs”, SIELEM 2019 - 12-th International Conference on Electromechanical and Power Systems 10 – 11 October 2019, Chișinău Rep. MOLDOVA

Bibliografie capitolul 4

[47] <http://edadocs.software.keysight.com/display/ads2011>

[48] https://curentulelectric.ro/wp-content/uploads/2019/01/NORMATIV_I7_2011.pdf