ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1991

Seria: ELEKTRYKA z.122 Nr kol.1124

Zofia CICHOWSKA

TOPOLOGICZNA ANALIZA OBWODÓW SLS

Streszczenie. Opisano algorytmy: poszukiwania drzewa, tworzenia macierzy oczek fundamentalnych i przekrojów fundamentalnych oraz rozwiązywania obwodów metodą prądów strun i metodą napięć konarowych w obwodach liniowych zawierających również źródła sterowane. Wymienione metody zaprezentowano dla obwodów o wymuszeniach sinusoidalnych w stanie ustalonym.

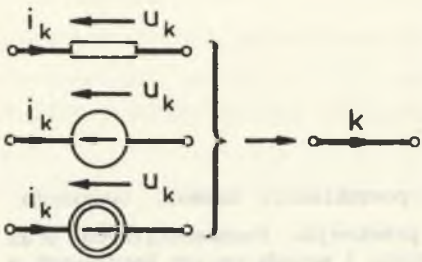
1. WPROWADZENIE

Analiza obwodów elektrycznych i elektronicznych o parametrach skupionych za pomocą metod topologicznych jest sposobem znanym i obecnie bardzo często stosowanym [1,3,6,8]. W bogatej literaturze związanej z tą problematyką nie ma jednak jednolitego podejścia do przedstawionych zagadnień. Niniejsza praca stanowi kwintesencję różnych podejść wzbogaconą o własne przemyślenia. Głównym jej zadaniem jest podanie przejrzystych algorytmów służących do: poszukiwania drzewa, tworzenia macierzy oczek fundamentalnych, tworzenia macierzy przekrojów fundamentalnych, rozwiązywania obwodów metodą prądów strun lub napięć konarowych przy wprowadzeniu do analizy minimalej liczby niewiadomych.

2. ZAŁOŻENIA WSTĘPNE I OZNACZENIA

Rozważany jest obwód elektryczny SLS planarny lub nieplanarny złożony z elementów RLC(M), źródeł autonomicznych i źródeł sterowanych. Źródła sterowane są sterowane prądami lub napięciami gałęzi pasywnych. Graf G obwodu jest mocno spójny. Oznaczamy przez w liczbę węzłów, a przez g liczbę

gałęzi grafu (i obwodu), przy czym gałąź jest to pojedynczy element pasywny R, L lub C, lub aktywny - idealnie źródło. Wszystkie gałęzie są ostrzałkowane jednolicie - napięcie przeciwko prądowi. Orientację gałęzi w grafie wyznacza prąd tej gałęzi (rys.1).



Rys.1.

Do analizy obwodu wprowadza się 2g niewiadomych prądów i napięć gałęziowych. Obwód jako całość jest opisany dwoma wektorami

$$u=\left[u_1, u_2 \ldots u_g\right]^T , \tag{1}$$

$$i=\left[i_1, i_2 \ldots i_g\right]^T . \tag{2}$$

Zbiór gałęzi dzielimy na pięć podzbiorów (grup gałęzi):

1) sterowane źródła prądowe w liczbie n'_j,
2) autonomiczne źródła prądowe w liczbie n_j,
3) gałęzie pasywne w liczbie g_p,
4) autonomiczne źródła napięciowe w liczbie n_e,
5) sterowane źródła napięciowe w liczbie n'_e.

W obrębie gałęzi pasywnych przebiega podział na struny i konary. Wynika to z warunku koniecznego rozwiązalności obwodu: wszystkie źródła prądowe sterowane i autonomiczne muszą zmieścić się w dopełnieniu D grafu, są więc strunami (aktywnymi), natomiast wszystkie źródła napięciowe sterowane i autonomiczne w drzewie T - są więc konarami (aktywnymi) [3,6].

Część gałęzi pasywnych w liczbie g_{kp} wchodzi w skład drzewa stanowiąc konary pasywne, pozostałe gałęzie pasywne w liczbie g_{sp} wchodzą w skład dopełnienia stanowiąc struny pasywne

$$g_{sp}+g_{kp}=g_p . \tag{3}$$

3. WYBÓR DRZEWA GRAFU

Liczba wszystkich konarów wynosi w-1, więc

$$g_{kp}+n_e+n'_e=w-1. \tag{4}$$

Wybór drzewa może być przeprowadzony np. opierając się na badaniu kwadratowej podmacierzy A' stopnia w-1 macierzy incydencji A [1]. Macierz A' jest nieosobliwa, a jej kolumny odpowiadają gałęziom drzewa, jeżeli

$$\det A' = \pm 1 \text{ i wtedy } A' = A_T . \tag{5}$$

W celu utworzenia macierzy A' należy brać pod uwagę tylko $g_{kp} = w-1-n_e-n'_e$ gałęzi pasywnych oraz wszystkie gałęzie grup 4 i 5. Pierwsza kombinacja g_{kp} gałęzi grupy 3 i gałęzi grup 4 i 5 spełniająca warunek (5) tworzy drzewo, które może być wybrane do dalszej analizy.

Po wyborze drzewa i wprowadzeniu numeracji gałęzi macierz incydencji A można przedstawić w postaci

$$A = \left[A_L \,\vdots\, A_T \right] . \tag{6}$$

Wektory prądów i napięć z uwzględnieniem podziału na 5 grup oraz podziału na struny i konary mają postać

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_s \\ \cdots \\ u_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_{sp} \\ \cdots \\ u_{kp} \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix}, \quad i = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_s \\ \cdots \\ i_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_{sp} \\ \cdots \\ i_{kp} \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} . \tag{7) (8}$$

4. TWORZENIE MACIERZY B_f I Q_f

W oparciu o wybrane drzewo przy tej samej numeracji gałęzi dla macierzy oczek fundamentalnych $B_f = \left[1 \,\vdots\, B_{f12} \right]$, macierzy przekrojów fundamentalnych $Q_f = \left[Q_{f11} \,\vdots\, 1 \right]$ i macierzy incydencji $A = \left[A_L \,\vdots\, A_T \right]$ zachodzą związki zwane quasi-ortogonalnością odpowiednich macierzy

$$A B_f^T = 0 , \quad Q_f B_f^T = 0 \tag{9), (10}$$

i wynikający z równania (10) warunek

$$\mathbb{Q}_{f11} = -\mathbb{B}_{f12}^{T}. \tag{11}$$

Na podstawie tych związków można utworzyć macierze $\mathbb{B}_f$ i $\mathbb{Q}_f$ opierając się na znajomości macierzy $\mathbb{A}$ [1]

$$\mathbb{B}_f = \left[\mathbb{I} \vdots -\mathbb{A}_L^{T} (\mathbb{A}_T^{-1})^{T} \right], \tag{12}$$

$$\mathbb{Q}_f = \mathbb{A}_T^{-1} \mathbb{A}. \tag{13}$$

5. MACIERZOWE RÓWNANIA WYJŚCIOWE

Prawa Kirchhoffa zapisane na podstawie macierzy $\mathbb{Q}_f$ i $\mathbb{B}_f$ mają postać

$$\mathbb{Q}_f \mathbb{i} = 0 , \quad \mathbb{B}_f \mathbb{u} = 0 . \tag{14), (15}$$

Wykorzystując podział na struny i konary opisany wzorami (7) i (8) oraz quasi-ortogonalność w postaci warunku (11) prawa Kirchhoffa można przekształcić do postaci transformacji przekrojowej i oczkowej

$$\mathbb{u} = \mathbb{Q}_f^{T} \mathbb{u}_k , \quad \mathbb{i} = \mathbb{B}_f^{T} \mathbb{i}_s . \tag{16), (17}$$

Równania (14) i (16) wraz z prawem Ohma zapisanym dla wszystkich gałęzi obwodu stanowią podstawę wyprowadzenia metody napięć konarowych, a równania (15) i (17) wraz z prawem Ohma - podstawę wyprowadzenia metody prądów strun (metoda oczkowa).

Prawo Ohma w obwodzie o dowolnych wymuszeniach i znanych warunkach początkowych wszystkich cewek i kondensatorów ma postać

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ i_z \\ 0 \\ e \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_{13}(D) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{33}(D) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{53}(D) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K'_{13} \\ 0 \\ u_c(0) \\ 0 \\ K'_{53} \end{bmatrix} \tag{18}$$

gdzie $D = \frac{d}{dt}$, $D^{-1} = \int_0^t (\cdot) dt$.

Zakłada się ciągłość przebiegów prądów w cewkach i napięć na kondensatorach w chwili t=0. $i_L(0-)=i_L(0+)=i_L(0)$, $u_c(0-)=u_c(0+)=u_c(0)$.

6. METODA PRĄDÓW STRUN

Rozpisane równania wyjściowe dla obwodu o wymuszeniach sinusoidalnych w stanie ustalonym przy zastosowaniu metody symbolicznej mają postać:

$$\mathbb{B}_f \mathbb{U} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \mathbb{B}_{13} & \mathbb{B}_{14} & \mathbb{B}_{15} \\ 0 & 1 & \mathbb{B}_{23} & \mathbb{B}_{24} & \mathbb{B}_{25} \\ 0 & 0 & \mathbb{B}_{33} & \mathbb{B}_{34} & \mathbb{B}_{35} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbb{U}_1 \\ \mathbb{U}_2 \\ \mathbb{U}_3 \\ \mathbb{U}_4 \\ \mathbb{U}_5 \end{bmatrix} = 0 , \tag{15a}$$

$$\mathbb{I} = \begin{bmatrix} \mathbb{I}_1 \\ \mathbb{I}_2 \\ \mathbb{I}_3 \\ \mathbb{I}_4 \\ \mathbb{I}_5 \end{bmatrix} = \mathbb{B}_f^T \mathbb{I}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \mathbb{B}_{13}^T & \mathbb{B}_{23}^T & \mathbb{B}_{33}^T \\ \mathbb{B}_{14}^T & \mathbb{B}_{24}^T & \mathbb{B}_{34}^T \\ \mathbb{B}_{15}^T & \mathbb{B}_{25}^T & \mathbb{B}_{35}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbb{I}_1 \\ \mathbb{I}_2 \\ \mathbb{I}_{sp} \end{bmatrix} \tag{17a}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbb{I}_1 \\ \mathbb{I}_2 \\ \mathbb{U}_3 \\ \mathbb{U}_4 \\ \mathbb{U}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbb{I}_z \\ 0 \\ \mathbb{E} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mathbb{K}_{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbb{Z}_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbb{K}_{53} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbb{U}_1 \\ \mathbb{U}_2 \\ \mathbb{I}_3 \\ \mathbb{I}_4 \\ \mathbb{I}_5 \end{bmatrix} , \tag{18a}$$

$$\text{gdzie} \quad \mathbb{Z}_{33} = \begin{bmatrix} \mathbb{R}_{33} & 0 & 0 \\ 0 & j\omega\mathbb{L}_{33} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{j\omega}\mathbb{S}_{33} \end{bmatrix} \tag{19}$$

jest macierzą zespolonych impedancji gałęziowych. We wzorach (15a), (17a), (18a) konturami przerywanymi zaznaczono macierze dotyczące obwodów bez źródeł sterowanych. Przekształcenie równań wyjściowych prowadzi do układu $g-w+1-n_j$ równań metody prądów strun o postaci:

$$\begin{bmatrix} \mathbb{1}-\mathbb{K}_{13}\mathbb{B}_{13}^T & -\mathbb{K}_{13}\mathbb{B}_{13}^T \\ \mathbb{B}_{33}\mathbb{Z}_{33}\mathbb{B}_{13}^T+\mathbb{B}_{35}\mathbb{K}_{53}\mathbb{B}_{13}^T & \mathbb{B}_{33}\mathbb{Z}_{33}\mathbb{B}_{33}^T+\mathbb{B}_{35}\mathbb{K}_{53}^T\mathbb{B}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbb{I}_1 \\ \mathbb{I}_{sp} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbb{K}_{13}\mathbb{B}_{23}^T\mathbb{I}_Z \\ \mathbb{B}_{34}\mathbb{E}-(\mathbb{B}_{33}\mathbb{Z}_{33}\mathbb{B}_{23}^T+\mathbb{B}_{35}\mathbb{K}_{53}^T\mathbb{B}_{23})\mathbb{I}_Z \end{bmatrix}. \tag{20}$$

Równania te można zapisać skrótowo w postaci

$$\mathbb{Z}_m \begin{bmatrix} \mathbb{I}_1 \\ \mathbb{I}_{sp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbb{I}_m \\ \mathbb{E}_m \end{bmatrix}. \tag{20a}$$

Dla obwodu bez źródeł sterowanych (SLSBP) równania (20) redukują się do postaci

$$\mathbb{B}_{33}\mathbb{Z}_{33}\mathbb{B}_{33}^T\mathbb{I}_{sp} = -\mathbb{B}_{34}\mathbb{E}-\mathbb{B}_{33}\mathbb{Z}_{33}\mathbb{B}_{23}^T\mathbb{I}_Z . \tag{21}$$

Dla układu SLS należy sprawdzić warunek $\det \mathbb{Z}_m \neq 0$ (warunek wystarczający rozwiązalności), dla układu SLSBP wybór odpowiedniego drzewa gwarantuje rozwiązalność.

Dalszy tok rozwiązania przebiega następująco:

a) obliczenie macierzy $\mathbb{Z}_m^{-1}$,

b) obliczenie niewiadomych metody $[\mathbb{I}_1, \mathbb{I}_{sp}]^T = \mathbb{Z}_m^{-1}[\mathbb{I}_m, \mathbb{E}_m]^T$,

c) uzupełnienie obliczonego wektora o prądy pozostałych strun aktywnych

$\mathbb{I}_s=[\mathbb{I}_1, \mathbb{I}_2, \mathbb{I}_{sp}]^T$,

d) obliczenie wszystkich prądów gałęziowych $\mathbb{I}=[\mathbb{I}_1, \mathbb{I}_2, \mathbb{I}_3, \mathbb{I}_4, \mathbb{I}_5]^T=\mathbb{B}_f^T \mathbb{I}_s$,

e) obliczenie napięć na gałęziach pasywnych $\mathbb{U}_3=\mathbb{Z}_{33}\mathbb{I}_3$,

f) obliczenie napięć na źródłach napięciowych sterowanych $\mathbb{U}_5=\mathbb{K}_{53}\mathbb{I}_3$,

g) obliczenie napięć na źródłach prądowych sterowanych

$\mathbb{U}_1=-\mathbb{B}_{13}\mathbb{U}_3-\mathbb{B}_{14}\mathbb{E}-\mathbb{B}_{15}\mathbb{U}_5$,

h) obliczenie napięć na autonomicznych źródłach prądowych

$\mathbb{U}_2=-\mathbb{B}_{23}\mathbb{U}_3-\mathbb{B}_{24}\mathbb{E}-\mathbb{B}_{25}\mathbb{U}_5$,

i) zestawienie wektora wszystkich napięć gałęziowych

$\mathbb{U}=[\mathbb{U}_1, \mathbb{U}_2, \mathbb{U}_3, \mathbb{U}_4, \mathbb{U}_5]^T$.

Dla obwodów SLSBP nie występują punkty f) i g), a pozostałe są prostsze.

7. METODA NAPIĘĆ KONAROWYCH

Rozpisane równania wyjściowe dla obwodu o wymuszeniach sinusoidalnych w stanie ustalonym mają postać

$$\mathbb{Q}_r\mathbb{I}=\begin{bmatrix} \mathbb{Q}_{11} & \mathbb{Q}_{12} & \mathbb{Q}_{13} & 0 & 0 \\ \mathbb{Q}_{21} & \mathbb{Q}_{22} & \mathbb{Q}_{23} & 1 & 0 \\ \mathbb{Q}_{31} & \mathbb{Q}_{32} & \mathbb{Q}_{33} & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \mathbb{I}_1 \\ \mathbb{I}_2 \\ \mathbb{I}_3 \\ \mathbb{I}_4 \\ \mathbb{I}_5 \end{bmatrix}=0, \tag{14a}$$

$$\mathbb{U} = \begin{bmatrix} \mathbb{U}_1 \\ \hline \mathbb{U}_2 \\ \mathbb{U}_3 \\ \mathbb{U}_4 \\ \mathbb{U}_5 \end{bmatrix} = \mathbb{Q}_f^T \mathbb{U}_k = \left[\begin{array}{cc|c} \mathbb{Q}_{11}^T & \mathbb{Q}_{21}^T & \mathbb{Q}_{31}^T \\ \hline \mathbb{Q}_{12}^T & \mathbb{Q}_{22}^T & \mathbb{Q}_{32}^T \\ \mathbb{Q}_{13}^T & \mathbb{Q}_{23}^T & \mathbb{Q}_{33}^T \\ \mathbb{O} & \mathbb{1} & \mathbb{O} \\ \hline \mathbb{O} & \mathbb{O} & \mathbb{1} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \mathbb{U}_{kp} \\ \hline \mathbb{U}_4 \\ \mathbb{U}_5 \end{bmatrix}. \tag{16a}$$

oraz równanie (18a) rozpisane poprzednio.

Dla potrzeb metody konieczne jest wprowadzenie macierzy zespolonych admitancji gałęziowych $\mathbb{Y}_{33}$. Jest ona odwrotnością macierzy $\mathbb{Z}_{33}$ opisnej równaniem (19).

$$\mathbb{Y}_{33} = \begin{bmatrix} \mathbb{R}_{33} & 0 & 0 \\ 0 & j\omega\mathbb{L}_{33} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{j\omega}\mathbb{S}_{33} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbb{G}_{33} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{j\omega}\Gamma & 0 \\ 0 & 0 & j\omega\mathbb{C}_{33} \end{bmatrix}. \tag{22}$$

Macierz $\mathbb{Y}_{33}$ istnieje, jeżeli dla każdej pary cewek sprzężonych zachodzi nierówność

$$L_q L_k > M_{qk}^2 . \tag{23}$$

Przekształcenie równań wyjściowych (14a), (16a) i (18a) prowadzi do układu w-1-n_e równań metody napięć konarowych o postaci

$$\begin{bmatrix} (\mathbb{Q}_{11}\mathbb{K}_{13}+\mathbb{Q}_{13})\mathbb{Y}_{33}\mathbb{Q}_{13}^T & (\mathbb{Q}_{11}\mathbb{K}_{13}+\mathbb{Q}_{13})\mathbb{Y}_{33}\mathbb{Q}_{33}^T \\ -\mathbb{K}_{53}\mathbb{Y}_{33}\mathbb{Q}_{13}^T & \mathbb{1}-\mathbb{K}_{53}\mathbb{Y}_{33}\mathbb{Q}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbb{U}_{kp} \\ \mathbb{U}_5 \end{bmatrix} = \tag{24}$$

$$= \begin{bmatrix} -(\mathbb{Q}_{11}\mathbb{K}_{13}+\mathbb{Q}_{13})\mathbb{Y}_{33}\mathbb{Q}_{23}^T\mathbb{E}-\mathbb{Q}_{12}\mathbb{I}_Z \\ \mathbb{K}_{53}\mathbb{Y}_{33}\mathbb{Q}_{23}^T\mathbb{E} \end{bmatrix}.$$

Równania te można zapisać skrótowo w postaci

$$\mathbf{Y}_p \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{kp} \\ \mathbf{U}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_p \\ \mathbf{E}_p \end{bmatrix}. \tag{24a}$$

Dla obwodu bez źródeł sterowanych równania (24) przybierają postać

$$\mathbf{Q}_{13}\mathbf{Y}_{33}\mathbf{Q}_{13}^T\mathbf{U}_{kp} = -\mathbf{Q}_{13}\mathbf{Y}_{33}\mathbf{Q}_{23}\mathbf{E} - \mathbf{Q}_{12}\mathbf{I}_Z . \tag{25}$$

Dla układu SLS należy sprawdzić warunek $\det \mathbf{Y}_p \neq 0$.

Dalszy tok rozwiązania przebiega następująco:

a) obliczenie macierzy $\mathbf{Y}_p^{-1}$,

b) obliczenie niewiadomych metody $[\mathbf{U}_{kp}, \mathbf{U}_5]^T = \mathbf{Y}_p^{-1}[\mathbf{I}_p, \mathbf{E}_p]^T$,

c) uzupełnienie obliczonego wektora o napięcia pozostałych konarów aktywnych $\mathbf{U}_k = [\mathbf{U}_{kp}, \mathbf{E}, \mathbf{U}_5]^T$,

d) obliczenie wszystkich napięć gałęziowych

$\mathbf{U} = [\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \mathbf{U}_3, \mathbf{U}_4, \mathbf{U}_5]^T = \mathbf{Q}_f^T \mathbf{U}_k$,

e) obliczenie prądów gałęzi pasywnych $\mathbf{I}_3 = \mathbf{Y}_{33}\mathbf{U}_3$,

f) obliczenie prądów źródeł prądowych sterowanych $\mathbf{I}_1 = \mathbf{K}_{13}\mathbf{I}_3$,

g) obliczenie prądów autonomicznych źródeł napięciowych

$\mathbf{I}_4 = -\mathbf{Q}_{21}\mathbf{I}_1 - \mathbf{Q}_{22}\mathbf{I}_Z - \mathbf{Q}_{23}\mathbf{I}_3$,

h) obliczenie prądów źródeł napięciowych sterowanych

$\mathbf{I}_5 = -\mathbf{Q}_{31}\mathbf{I}_1 - \mathbf{Q}_{32}\mathbf{I}_Z - \mathbf{Q}_{33}\mathbf{I}_3$,

i) zestawienie wektora wszystkich prądów gałęziowych

$\mathbf{I} = [\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \mathbf{I}_3, \mathbf{I}_4, \mathbf{I}_5]^T$.

8. ZAKOŃCZENIE

Zaproponowane algorytmy poszukiwania drzewa, tworzenia macierzy $\mathbf{B}_f$ i $\mathbf{Q}_f$, układania równań obwodu metodą prądów strun i napięć konarowych stanowią bazę do opracowania programów komputerowych. Tworzone obecnie w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej Politechniki Śląskiej programy

komputerowe umożliwiają analizę dowolnie złożonych obwodów SLS zarówno planarnych, jak i nieplanarnych. Proponowany w pracy algorytm poszukiwania drzewa może być z powodzeniem stosowany przy topologicznym formułowaniu równań stanu.

LITERATURA

1. Chua L.O., Lin P.M.: Komputerowa analiza układów elektronicznych. Algorytmy i metody obliczeniowe. WNT, Warszawa 1981.
2. Cichowska Z.: Topologiczna analiza obwodów elektrycznych liniowych. Skrypt Uczelniany Politechniki Śląskiej nr 1578, Gliwice 1990.
3. Juszczyk A.: Równania teorii obwodów, cz.I. Skrypt Uczelniany AGH nr 656, Kraków 1978.
4. Kulikowski J.L.: Zarys teorii grafów. Zastosowania w technice. PWN, Warszawa 1976.
5. Rajski Cz.: Teoria obwodów, t.I. WNT, Warszawa 1971.
6. Seshu S., Reed M.: Linear graphs and electrical networks. Addinson - Wesley, 1961.
7. Wilson R.J.: Wprowadzenie do teorii grafów. PWN, Warszawa 1985.
8. Wolski W., Uruski M.: Teoria obwodów, cz.I i II. Skrypty Uczelniane Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1982, 1983.

Recenzent: doc.dr inż. Zdzisław Klonowicz

Wpłynęło do Redakcji dnia 1 marca 1991 r.

TOPOLOGICAL METHODS IN THEORETIC ELECTROTECHNICS EDUCATION

S u m m a r y

Algorithms of tree searching as well as fundamental circuit matrix and fundamental cut set matrix creation are presented. Moreover choral current method and branch voltage method used to solve circuits with controlled generators are described. These methods have been presented to sinusoidal circuits in the steady state.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ

Р е з ю м е

В паботе описаны алгоритмы: поиска дерева, создания матрицы фундаментальных контуров и фундаментальных сечений, а также решения цепей методом струнных токов и методом ветвевых напряжений для линиейных цепей содержащих также управляемые источники. Названые методы представлены для цепей с синусоидальными воздействиями и в статическом состоянии.