

Zygmunt GARCZARZYK

Instytut Podstawowych Problemów  
 Elektrotechniki i Energoelektroniki  
 Politechnika Śląska

ANALIZA NUMERYCZNA PEWNEJ KLASY  
 NIELINIOWYCH OBWODÓW REZYSTANCYJNYCH

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono metodę iteracyjną analizy rezystancyjnych obwodów opisywanych równaniami węzłowymi, która jest zbieżna globalnie.

### 1. Wstęp

Równanie

$$f(x) \stackrel{\text{df}}{=} Ag(A^t x + E) - AJ = 0 \quad (1)$$

przedstawia dla  $n + 1$  węzłowego obwodu zawierającego  $m$  gałęzi, układ  $n$  nieliniowych równań węzłowych z  $n$  niewiadomymi potencjałami węzłowymi  $x_1, 1 = 1, 2, \dots, n$ . W równaniu tym  $A$  - oznacza zredukowaną macierz incydencji,  $E$  - wektor stałych wymuszeń napięciowych,  $J$  - wektor stałych wymuszeń prądowych, a  $g(\hat{u}) = [g_1(\hat{u}_1), g_2(\hat{u}_2), \dots, g_m(\hat{u}_m)]^t$  wektor charakterystyk prądowo-napięciowych rezystorów nieliniowych i liniowych. Przy tym  $\hat{u} = A^t x + E$  - oznacza wektor napięć na rezystorach.

Zastosowanie algorytmu Newtona-Raphsona do rozwiązania równania (1) prowadzi do znanej metody iteracyjnej, w której obwód nieliniowy jest przekształcony w obwód liniowy rozwiązywany metodą potencjałów węzłowych [1], [2]. W metodzie tej istnieje jednak problem zbieżności. Jest ona bowiem zbieżna jedynie lokalnie tzn., że przybliżenie początkowe  $x^{(0)}$  winno być bliskie właściwemu rozwiązaniu  $x^*$  równania (1), aby uzyskany ciąg przybliżeń  $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots$  był zbieżny do  $x^*$ .

Wprawdzie twierdzenie Newtona-Raphsona-Kantorowicza ustala jak bliskie właściwemu rozwiązaniu musi być przybliżenie początkowe, aby zapewnić zbieżność, ale rezultat ten ma głównie znaczenie teoretyczne, gdyż jego wykorzystanie w praktyce nie jest łatwe, jeśli wręcz niemożliwe.

Pozostaje więc arbitralny wybór przybliżenia początkowego w oparciu o znajomość charakterystyk elementów nieliniowych. W praktyce prowadzi to do wielokrotnych prób, aż zostanie uzyskane rozwiązanie.

Przedstawione w pracy podejście do rozwiązania równania (1) oparte o znaną w analizie numerycznej metodę kontynuacji [3], [4], [5], pozwala tak zmodyfikować tę metodę analizy obwodu, by była ona zbieżna globalnie, tj. dla dowolnego przybliżenia początkowego  $x^{(0)}$ .

W oparciu o tę samą ideę w pracy [6] była prezentowana metoda numerycznego rozwiązania równania obwodu, w którym niewiadomymi są napięcia lub prądy rezystorów nieliniowych.

## 2. Metoda kontynuacji

Metoda kontynuacji jest na ogół zbieżna globalnie [5]. Idea tej metody jest następująca:

założymy, że

$$H(x, \lambda) = 0 \quad \text{dla } \lambda \in <0, 1> \quad (2)$$

jest rodziną równań nieliniowych zależnych od parametru  $\lambda$  taką, że

$$f(x) = H(x, 1) \quad (3)$$

Istotne przy tym jest by układ równań

$$H(x, 0) = 0 \quad (4)$$

był łatwy do rozwiązania.

Funkcja  $H$  nazywana jest często homotopią.

Jeżeli pierwiastki  $x(\lambda)$  równań (2) zależą od  $\lambda$  w sposób ciągły, to opisują one pewną krzywą łączącą punkt  $x(0)$  z zerem  $x(1)$  układu (1). Rozwiązanie  $x = x(\lambda)$  wyznacza się dla ciągu rosnącego wartości  $\lambda_0 = 0$ ,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s = 1$  stosując jakęś szybko zbieżną metodę iteracyjną (np. metodę Newtona-Raphsona) do kolejnych równań

$$H(x, \lambda_i) = 0 \quad i = 0, 1, 2, \dots, s \quad (5)$$

z na ogół dobrym przybliżeniem początkowym  $x(\lambda_i)^{(0)}$  zera  $x(\lambda_i)$ . Przybliżenie to otrzymuje się z poprzednich wyników

$$x(\lambda_i)^{(0)} = x(\lambda_{i-1}) \quad (6)$$

Rodzinę równań (2) tworzy się przyjmując jako homotopię następująca wyrażenie:

$$H(x, \lambda) = \lambda f(x) + (1-\lambda)f_0(x) \quad (7)$$

gdzie rozwiązanie układu

$$H(x,0) = f_0(x) \quad (8)$$

jest łatwe do uzyskania.

### Przykład 1

Opisaną metodę kontynuacji zastosowano do rozwiązania układu równań

$$f(x) = \begin{cases} f_1(x_1, x_2) = x_1^2 + x_1 x_2 + 2x_2^2 - 74 = 0 \\ f_2(x_1, x_2) = 2x_1^2 + 2x_1 x_2 + x_2^2 - 73 = 0 \end{cases}$$

który posiada cztery rozwiązania:  $[3, 5]$ ,  $[-3, -5]$ ,  $[8, -5]$ ,  $[-8, 5]$ .

Przyjęto homotopię postaci (7) z funkcją

$$f_0(x) = \begin{cases} x_1 - a = 0 \\ x_2 - b = 0 \end{cases}$$

gdzie  $a, b$  dowolne liczby stanowiące rozwiązanie układu  $f_0(x) = 0$ . Stosując algorytm Newtona-Raphsona do rozwiązania równania typu (5) uzyskano, przyjmując kolejno różne stałe  $a, b$ , zbieżność do każdego z rozwiązań.

Zastosowanie tego samego algorytmu bezpośrednio do układu  $f(x) = 0$  zakończyło się niepowodzeniem dla przybliżenia początkowego  $x^{(0)} = [0, 0]$ .

### 3. Homotopia równań węzłowych

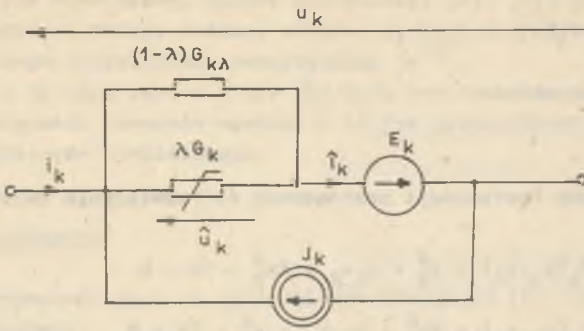
Niech każdy z  $n$  gałęzi rozważanego obwodu posiada strukturę pokazaną na rys. 1, gdzie  $G_k$  oznacza rezystor nieliniowy lub liniowy opisany zależnością

$$i_k = g_k(\hat{u}_k) \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

natomiast  $G_{k2}$  oznacza konduktancję rezystora liniowego. Pokażemy, że jeśli  $\lambda \in \langle 0, 1 \rangle$  to równanie węzłowe tego obwodu tworzy homotopię postaci (7).

Uwzględniając przyjętą strukturę gałęzi obwodu otrzymuje się równania

$$u = \hat{u} - E \quad (10)$$



Rys. 1

$$\mathbf{i} = \hat{\mathbf{i}} - \mathbf{J} \quad (11)$$

gdzie:

$\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{i}$  - oznaczają wektory napięć i prądów gałęzi,

$\hat{\mathbf{u}}$ ,  $\hat{\mathbf{i}}$  - wektory napięć i prądów elementów rezystancyjnych.

Ponieważ

$$\hat{\mathbf{i}} = \lambda \mathbf{g}(\hat{\mathbf{u}}) + (1-\lambda)G_\lambda \hat{\mathbf{u}} \quad (12)$$

gdzie

$$G_\lambda = \text{diag}[G_{1\lambda}, G_{2\lambda}, \dots, G_{m\lambda}]$$

to na podstawie I prawa Kirchhoffa

$$\mathbf{A}\mathbf{i} = \mathbf{0} \quad (13)$$

oraz wykorzystując transformację węzłową

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}^t \mathbf{x} \quad (14)$$

można napisać

$$\mathbf{A} \left\{ \lambda \mathbf{g}(\mathbf{A}^t \mathbf{x} + \mathbf{E}) + (1-\lambda)G_\lambda (\mathbf{A}^t \mathbf{x} + \mathbf{E}) - \mathbf{J} \right\} = \mathbf{0} \quad (14)$$

Stąd otrzymuje się następujące równanie węzłowe

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\mathbf{x}, \lambda) = & \lambda \left\{ \mathbf{A} \mathbf{g}(\mathbf{A}^t \mathbf{x} + \mathbf{E}) - \mathbf{A} \mathbf{J} \right\} \\ & + (1-\lambda) \left\{ \mathbf{A} G_\lambda \mathbf{A}^t \mathbf{x} - \mathbf{A} (\mathbf{J} - G_\lambda \mathbf{E}) \right\} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (15)$$

Łatwo tak widzieć jest homotopia między (7)

Przy tym wyznaczenie rozwiązania układu

$$f_0(x) = AG_\lambda A^t x - A(J-G_\lambda E) \quad (16)$$

jest szczególnie proste, gdyż jest to układ równań liniowych.

#### 4. Dyskretny obwód równoważny

Algorytm Newtona-Raphsona dla układu równań (15) ma postać:

$$J(x^{(j)}, \lambda)x^{(j+1)} = J(x^{(j)}, \lambda)x^{(j)} - H(x^{(j)}, \lambda) \quad (17)$$

Macierz Jacobiego funkcji  $H(x, \lambda)$  jest następująca:

$$J(x^{(j)}, \lambda) = A \left[ \lambda G^{(j)} + (1-\lambda)G_\lambda \right] A^t \quad (18)$$

gdzie  $G^{(j)}$  oznacza diagonalną macierz dynamicznych konduktancji rezystorów nieliniowych dla napięć na tych rezystorach w  $j$ -tej iteracji.

Uwzględniając zależność (18) można przekształcić równanie (17) do postaci:

$$\begin{aligned} A \left[ \lambda G^{(j)} + (1-\lambda)G_\lambda \right] A^t x^{(j+1)} &= \\ &= A \left[ J^{(j)} - \lambda G^{(j)} E + (1-\lambda)(J-G_\lambda E) \right] \quad \text{dla } \lambda \in < 0, 1 > \end{aligned} \quad (19)$$

gdzie

$$J^{(j)} \stackrel{\text{df}}{=} \lambda \left[ J - J_Q^{(j)} + G^{(j)} U_Q^{(j)} \right] \quad (20)$$

$$U_Q^{(j)} \stackrel{\text{df}}{=} A^t x^{(j)} + E \quad (21)$$

$$J_Q^{(j)} \stackrel{\text{df}}{=} g(U_Q^{(j)}) \quad (22)$$

Równania (19) stanowią zmodyfikowaną postać równań węzłowych tzw. dyskretnego obwodu równoważnego [2].

Rozwiązanie tych równań rozpoczyna się od rozwiązania układu równań liniowych reprezentujących dla  $\lambda = 0$  początkowy obwód liniowy:

$$AG_\lambda A^t x^{(j+1)} = A(J-G_\lambda E) \quad (23)$$

Dla  $0 < \lambda < 1$  rozwiązywane są równania obwodów, w których konduktancje liniowe gałęzi są stopniowo zmniejszane i zastępowane konduktancjami nieliniowymi.

Dla  $\lambda = 1$  rozwiązuje się układ równań

$$AG^{(j)}A^T x^{(j+1)} = A(J^{(j)})_G^{(j)} E \quad (24)$$

stanowiący algorytm Newtona-Raphsona dla równania (1).

Postępowanie to pozwala na otrzymanie dobrego przybliżenia początkowego  $x^{(1)(0)}$  dla równania (24), co zapewnia zbieżność do właściwego rozwiązania  $x^*$  równania (1).

## 5. Program komputerowy

Równanie (19) stanowiło podstawę do napisania programu komputerowego analizy nieliniowych obwodów rezystancyjnych opisanych równaniem węzłowym (1). Tekst programu napisanego w języku Fortran i realizowanego na mini-komputerze MERA 60 podany jest w DODATKU.

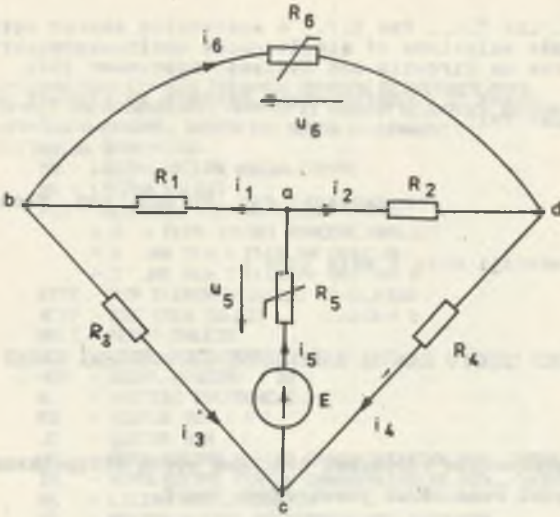
W programie tym użytkownik może wielokrotnie zadawać wybrane wartości konduktancji początkowego obwodu liniowego oraz przyrostu parametru  $\lambda$ . Przedstawiona wersja programu przystosowana jest do pobierania informacji dotyczących obwodu ze zbioru wcześniej przygotowanego.

## Przykład 2

Wykorzystując napisany program dokonano obliczeń dla obwodu pokazanego na rys. 2. Przyjęto, że  $E = 11$  V,  $R_1 = R_4 = 2\Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 8\Omega$ . Założono przy tym, że charakterystyki rezystorów liniowych są określone dla zakresu napięć  $< -20$  V,  $20$  V  $>$ . Charakterystyki kondukcyjne rezystorów nieliniowych  $R_5$  i  $R_6$  określone zostały tabelami

$u_5$	0	1	2	3	4	5	V
$i_5$	0	0,25	0,75	1,25	2	3,25	A
$u_6$	0	1	2	3	4	5	V
$i_6$	0	1	1,5	1,75	1,95	2	A

Przyjęto, że konduktancje początkowe obwodu liniowego mają wartości:  $G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = G_6 = 0,25$  S,  $G_5 = 1$  S. Wybierając przyrost parametru  $\Delta\lambda = 0,5$  uzyskano właściwe rozwiązanie równe  $x_a = 4$  V,  $x_b = 1$  V,  $x_c = -3$  V,  $x_d = 0$ .



Rys. 2

6. Uwagi końcowe

Przedstawiona metoda analizy jak łatwo spostrzec może być również stosowana w przypadku obwodów nieliniowych zawierających liniowe jak i nieliniowe źródła prądowe sterowane napięciem. W tym przypadku macierz  $G^{(j)}$  w równaniu (19) nie będzie już diagonalna.

Konduktancje liniowe  $G_{12}, G_{22}, \dots, G_{m2}$  mogą stanowić zbiór dowolnych liczb rzeczywistych. Oznacza to, że dla różnych zbiorów ich wartości otrzymuje się różne przybliżenia rozwiązania  $x(0)$ . Fakt ten można by wykorzystać przy opracowywaniu procedury znajdowania wszystkich rozwiązań równania (1) [7].

LITERATURA

- [1] Calahan D.A.: Projektowania układów elektronicznych za pomocą maszyny cyfrowej. WNT, Warszawa 1978.
- [2] Chua L.O., Lin P.M.: Komputerowa analiza układów elektronicznych. WNT, Warszawa 1981.
- [3] Dahlquist G., Björck A.: Metody numeryczne. PWN, Warszawa 1983.
- [4] Dryja M., Jankowski J.M.: Przegląd metod i algorytmów numerycznych. WNT, Warszawa 1982.
- [5] Ortega J.M., Rheinboldt W.C.: Iterative solution of nonlinear equations in several variables. Academic Press, New York 1970.
- [6] Tadeusiewicz M.: Analiza pewnej klasy obwodów rezystancyjnych w przestrzeni  $m_n$ . Rozprawy Elektrotechniczne, 1973, z. 2.

- [7] Chao K.S., Lin D.K., Pan C.T.: A systematic search method for obtaining multiple solutions of simultaneous nonlinear equations, IEEE Transactions on Circuits and Systems, September 1975.
- [8] Chao K.S., Seeks S.: Continuation Methods in Circuit Analysis, Proc. IEEE, August 1977.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Michał Tadeusiewicz

Wpłynęło do redakcji dnia 2 maja 1984 r.

#### ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ОДНОГО КЛАССА НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ЦЕПЕЙ

#### Р е з ю м е

В статье представлен глобально сходимый метод итерративного решения узловых уравнений нелинейных резистивных цепей.

#### NUMERICAL ANALYSIS OF A CLASS OF NONLINEAR RESISTIVE NETWORKS

#### S u m m a r y

In the paper globally convergent iterative method of analysis of nonlinear resistive networks described by nodal equations has been presented.



FORTRAN IV

V02.5

PAGE 001

```

C... PROGRAM ANALIZY NIELINIOWYCH OBWODOW REZYSTANCYJNYCH
C... OPARTY NA ROZWIAZANIU HOMOTOPII ROWNAN WEZLOWYCH METODA
C... NEWTONA-RAPHSONA. DYSKRETNY OBWOD ROWNOWAZNY
C... DEFINICJA ZMIENNYCH
C...   NW - LICZBA WEZLOW NIEZALEZNYCH
C...   NG - LICZBA GALEZI
C...   MIX - WSKAZNIK TYPU WYDRUKOW
C...       = 0  V PLUS WYNIKI KONCOWE ANALIZY
C...       = 1  JAK DLA 0 PLUS GN ORAZ JN
C...       = 2  JAK DLA 1 PLUS A, UQ, JQ, G
C...   ETYP - TYP ELEMENTU GALEZI (G,E,J,EX)
C...   NTYP - KOD TYPU GALEZI (1,2,3,4)
C...   GALZ - NUMER GALEZI
C...   NOD - WEZEL POZCATKOWY ( OD )
C...   NDO - WEZEL KONCOWY ( DO )
C...   A - MACIERZ INCYDENCJI
C...   ES - WEKTOR SEM ( E )
C...   JS - WEKTOR SPM ( J )
C...   UG - WSPOLRZEDNE NAPIEC CHARAKTERYSTYK NIEL. (WIERSZAMI)
C...   IG - WSPOLRZEDNE PRADOW CHARAKTERYSTYK NIEL. (WIERSZAMI)
C...   NK - LICZBA WSPOLRZEDNYCH
C...   UQ - WEKTOR NAPIEC REZYSTOROW NIELINIOWYCH
C...   JQ - WEKTOR PRADOW REZYSTOROW NIELINIOWYCH
C...   G - MACIERZ ROZNICZKOWYCH KONDUKTANCJI GALEZIOWYCH
C...   GN - MACIERZ KONDUKTANCJI WEZLOWYCH
C...   JN - WEKTOR WEZLOWYCH WYDAJNOSCI PRADOWYCH
C...   V,VN - WEKTOR POTENCJALOW WEZLOWYCH
C...   U1 - WEKTOR NAPIEC GALEZI
C...   JG - WEKTOR PRADOW GALEZI
C...   X - POMOCNICZY WEKTOR NAPIEC CHARAKTERYSTYKI NIEL.
C...   Y - POMOCNICZY WEKTOR PRADOW CHARAKTERYSTYKI NIEL.
C...   ND - LICZBA WSPOLRZEDNYCH WEKTORA X I Y
C...   T - PARAMETR HOMOTOPII
C...   DT - PRZYROST PARAMETRU
C...   GT - WEKTOR KONDUKTANCJI POZCATKOWEGO OBWODU LINIOWEGO
C... DANE WEJSCIOWE
C...   REKORD 0 - NW, NG, MIX
C...   REKORD 1 - ETYP, GALZ, NOD, NDO
C...   REKORD 2 - ND, X(1), Y(1), X(2), Y(2),...,X(ND), Y(ND)
C...       ALBO - ES(GALZ)
C...       LUB - JS(GALZ)
C...   ZESTAW REKORDOW 1 I 2 NALEZY POWTORZYC TYLE RAZY
C...   ILE JEST ELEMENTOW (G,E,J) W OBWODZIE
C... DANE POZCATKOWE
C...   REKORD 0 - V(1), V(2),...,V(NW)
C... UWAGA: DANE WEJSCIOWE KONCYZ REKORD Z 'ELEMENTEM' EX.
C...   WEZEL ODNIESIENIA WINIEN MIEC NUMER 0.
C...   CHARAKTERYSTYKI REZYSTOROW LINIOWYCH SA
C...   ZADAWANE PRZEZ TRZY PUNKTY ( U, J(U) ).

```

0001

PROGRAM ANOR

0002

REAL JS, JN, J1, IG, JQ, JG, JW

0003

INTEGER ETYP, GALZ

0004

```

DIMENSION NTYP(4), A(10,20), ES(20), JS(20), J1(20), G(20,20),
*GN(10,10), G1(20,10), JN(10), V(10), X(10), Y(10),

```

```

FORTRAN IV          V02.5                      PAGE 002

      UG(20),U1(20),JG(20),UN(10),JG(20),GT(20)
0005      COMMON UG(20,10),IG(20,10),NK(20)
0006      DATA A/200*0./,ES/20*0./,JS/20*0./,NTYP(1),NTYP(2),
      *NTYP(3),NTYP(4)/'G ','E ','J ','EX'/
0007      OPEN(UNIT=2,NAME='DX1:FTN2.DAT',TYPE='OLD')
0008      WRITE(7,1000)
0009      1000 FORMAT(//' DANE'//)
0010      READ(2,10) NW,NG,MIX
0011      10 FORMAT(3I3)
0012      WRITE(7,20) NW,NG
0013      20 FORMAT(5X,' ANALIZA NIELINIOWEGO OBWODU REZYSTANCYJNEGO'/5X,
      *' METODA POCZAJLOW WEZLOWYCH - DYSKRETNY OBWOD ROWNOWAZNY'//
      $5X,' LICZBA WEZLOW = ',I2,5X,'LICZBA GALEZI = ',I2//)
C... CZYTANIE I WYDRUK DANYCH
0014      30 READ(2,40) ETYP,GALZ,NOD,NDO
0015      40 FORMAT(A2,3I2)
0016      DO 50 I=1,4
0017      IF(ETYP.EQ.NTYP(I)) GO TO 70
0019      50 CONTINUE
0020      WRITE(7,60) ETYP
0021      60 FORMAT(/5X,A2,' *NIEWLASCIWY TYP ELEMENTU*'/)
0022      GO TO 30
0023      70 IF(I-4) 100,80,80
0024      80 WRITE(7,90)
0025      90 FORMAT(/5X,' KONIEC DANYCH'//' PUNKT STARTOWY'//)
0026      100 GO TO (110,150,180,205),I
0027      110 READ(2,120) ND,(X(I),Y(I),I=1,ND)
0028      120 FORMAT(I3,20F9.3)
0029      NK(GALZ)=ND
0030      DO 130 I=1,ND
0031      UG(GALZ,I)=X(I)
0032      130 IG(GALZ,I)=Y(I)
0033      WRITE(7,140) ETYP,GALZ,NOD,NDO,(X(I),Y(I),I=1,ND)
0034      140 FORMAT(/5X,A2,' GALAZ',I3,' OD WEZLA',I3,' DO WEZLA',I3,
      *6X,'U',10X,'J'/30(47X,E10.3,1X,E10.3//)
      GO TO 200
0035      150 READ(2,160) WARTOSC
0037      160 FORMAT(F6.2)
0038      ES(GALZ)=WARTOSC
0039      WRITE(7,170) ETYP,GALZ,WARTOSC
0040      170 FORMAT(5X,A2,' GALAZ',I3,5X,'WARTOSC=',E10.3/)
0041      GO TO 30
0042      180 READ(2,190) WARTOSC
0043      190 FORMAT(F6.2)
0044      JS(GALZ)=WARTOSC
0045      WRITE(7,170) ETYP,GALZ,WARTOSC
0046      GO TO 30
0047      200 IF(NOD.GT.0) A(NOD,GALZ)=1.0
0049      IF(NDO.GT.0) A(NDO,GALZ)=-1.0
0051      GO TO 30
C... PUNKT STARTOWY
0052      205 CLOSE(UNIT=2)
0053      210 READ(5,215) DT,(GT(I),I=1,NG)
0054      215 FORMAT(21F10.5)

```

FORTRAN IV

V02.5

PAGE 003

```

0055      T=0.
0056      220 L=0
0057      WRITE(7,225) T
0058      225 FORMAT(' PARAMETR = ',F4.2//)
0059      230 L=L+1
0060      IF(T.EQ.0.) GO TO 265
C... ITERACJA L - TA
C... OBLICZANIE WEKTORA NAPIEC REZYSTOROW UQ=AT*V+ES
0062      DO 260 I=1,NG
0063      U1(I)=0.
0064      DO 250 J=1,NW
0065      250 U1(I)=U1(I)+A(J,I)*V(J)
0066      260 UQ(I)=U1(I)+ES(I)
C... OBLICZANIE WEKTORA PRADOW REZYSTOROW NIELINIOWYCH JQ ORAZ
C... MACIERZY ROZNICZKOWYCH KONDUKTANCJI GALEZIOWYCH
0067      265 DO 280 I=1,NG
0068      DO 270 J=1,NG
0069      270 G(I,J)=0.
0070      IF(T.EQ.0.) GO TO 280
0072      IGAR=I
0073      CALL FUNC(IGAR,UQ(I),JQ(I),G(I,I),FIX,L)
0074      IF(FIX.EQ.0.) GO TO 210
0076      280 CONTINUE
C... WYDRUKI KONTROLNE
0077      IF(MIX.LE.1) GO TO 380
0079      WRITE(7,290)
0080      290 FORMAT(//5X,' MACIERZ INCYDENCJI'//)
0081      DO 300 I=1,NW
0082      300 WRITE(7,310) (A(I,J),J=1,NG)
0083      310 FORMAT(1X,20F6.1)
0084      WRITE(7,320)
0085      320 FORMAT(//5X,' WEKTORY:',5X,'UQ',6X,'JQ'//)
0086      DO 330 I=1,NG
0087      330 WRITE(7,340) I,UQ(I),JQ(I)
0088      340 FORMAT(12X,I2,2(2X,F6.2))
0089      WRITE(7,350)
0090      350 FORMAT(// ' MACIERZ ROZNICZKOWYCH KONDUKTANCJI GALEZIOWYCH'//)
0091      DO 360 I=1,NG
0092      360 WRITE(7,370) (G(I,J),J=1,NG)
0093      370 FORMAT(1X,15F8.2)
C... FORMOWANIE KOWANAN WEZLOWYCH
C... MACIERZ KONDUKTANCJI WEZLOWYCH GN=A*G*AT
0094      380 DO 385 I=1,NG
0095      385 G(I,I)=T*G(I,I)+(1-T)*GT(I)
0096      DO 390 J=1,NW
0097      DO 390 I=1,NG
0098      G1(I,J)=0.
0099      DO 390 K=1,NG
0100      390 G1(I,J)=G1(I,J)+G(I,K)*A(J,K)
0101      DO 400 I=1,NW
0102      DO 400 J=1,NW
0103      GN(I,J)=0.
0104      DO 400 K=1,NG
0105      400 GN(I,J)=GN(I,J)+A(I,K)*G1(K,J)

```

```

FORTRAN IV          V02.5                                PAGE 004

0106          IF (MIX.LT.1) GO TO 440
0108          WRITE (7,410)
0109          410 FORMAT (//5X,' MACIERZ KONDUKTANCJI WEZLOWYCH'/)
0110          DO 420 I=1,NW
0111          420 WRITE (7,430) (GN(I,J),J=1,NW)
0112          430 FORMAT (1X,10E12.3)
C... WEKTOR WEZLOWYCH WYDAJNOSCI PRADOWYCH JN=A*(JS-JQ+G*AT*V)
0113          440 DO 460 I=1,NG
0114             J1(I)=0.
0115             IF (T.EQ.0.) GO TO 455
0117             DO 450 J=1,NW
0118          450 J1(I)=J1(I)+G1(I,J)*V(J)
0119             J1(I)=JS(I)-T*(JQ(I)-J1(I))
0120          455 J1(I)=J1(I)-(1-T)*GT(I)*ES(I)
0121          460 CONTINUE
0122             DO 470 I=1,NW
0123             JN(I)=0.
0124             DO 470 J=1,NG
0125          470 JN(I)=JN(I)+A(I,J)*J1(J)
0126             IF (MIX.LT.1) GO TO 510
0128             WRITE (7,480)
0129          480 FORMAT (//5X,' WEKTOR WEZLOWYCH WYDAJNOSCI PRADOWYCH'/)
0130             DO 490 I=1,NW
0131          490 WRITE (7,500) JN(I)
0132          500 FORMAT (1X,E12.3)
C... OBLICZANIE POTENCJALOW WEZLOWYCH - METODA ELIMINACJI GAUSSA
0133          510 CALL GAUSS (NW,GN,JN,DIX)
0134             IF (DIX.EQ.0.) GO TO 210
0136             TOL=1.E-4
0137             IF (T.EQ.0.) GO TO 530
0139             DO 520 I=1,NW
0140             VN(I)=JN(I)
0141             IF (ABS(V(I)-VN(I))-TOL) 520,520,530
0142          520 CONTINUE
0143             GO TO 550
C... NASTEPNA ITERACJA
0144          530 DO 540 I=1,NW
0145          540 V(I)=JN(I)
0146             IF (T.GT.0.) GO TO 230
0148          550 WRITE (7,555) L, (I,VN(I),I=1,NW)
0149          555 FORMAT (' ITERACJA=',I3,' WEZEL', ' POTENCJAL'/10(16X,I2,3X,
*E13.6/))
0150             T=T+DT
0151             IF (T.GT.1.) GO TO 560
0153             GO TO 220
C... WYNIKI ANALIZY - PRADY I NAPIECIA GALEZI OBWODU
0154          560 DO 565 I=1,NG
0155             U1(I)=0.
0156             DO 565 J=1,NW
0157          565 U1(I)=U1(I)+A(J,I)*V(J)
0158             DO 570 I=1,NG
0159          570 JG(I)=JQ(I)-JS(I)
0160             DO 580 I=1,NG
0161          580 WRITE (7,590) I,U1(I),JG(I)

```

```

FORTRAN IV          V02.5                                PAGE 005
0162   590 FORMAT(6X,' GALAZ ',I2,3X,'NAPIECIE=',E10.3,3X,'PRAD=',E10.3/)
      C... SPRAWDZENIE WYNIKOW ANALIZY - I PRAWO KIRCHHOFFA
0163       DO 620 I=1,NW
0164       JW=0.
0165       DO 600 J=1,NG
0166       600 JW=JW+A(I,J)*JG(J)
0167       WRITE(7,610) I,JW
0168       610 FORMAT(' WEZEL ',I2,' SUMA PRADOW=',F8.5)
0169       620 CONTINUE
0170       630 WRITE(7,640)
0171       640 FORMAT(///SX,' KONIEC ANALIZY'///)
0172       STOP
0173       END
    
```

FORTRAN IV

V02.5

PAGE 001

```

C... PODPROGRAM OBLICZANIA PRADOW I ROZNICZKOWYCH KONDUKTANCJI
C... REZYSTOROW NIELINIOWYCH O CHARAKTERYSTYKACH J(U) INTERPOLOWANYCH
C... NATURALNYMI FUNKCJAMI SKLEJANYMI STOPNIA 3
0001 SUBROUTINE FUNC(K,Z,S,DS,FIX,IER)
0002 REAL M,IG
0003 DIMENSION A(10,20),B(10,20),C(10,20),D(10,20),
* H(10),W(10),U(10),V(10),M(10,10)
0004 COMMON UG(20,10),IG(20,10),NK(20)
0005 DATA M/900*0./
0006 N=NK(K)
0007 IF (IER.GT.1) GO TO 80
C... WYZNACZANIE WSPOLCZYNNIKOW FUNKCJI SKLEJANYCH
0009 N1=N-1
0010 DO 10 I=1,N1
0011 10 H(I)=UG(K,I+1)-UG(K,I)
0012 N2=N-2
0013 DO 20 I=1,N2
0014 W(I)=H(I+1)/(H(I)+H(I+1))
0015 20 U(I)=1.-W(I)
0016 DO 30 I=1,N2
0017 30 V(I)=3.0*((IG(K,I+2)-IG(K,I+1))/H(I+1)-(IG(K,I+1)-IG(K,I))/
* H(I))/H(I)+H(I+1))
0018 DO 50 I=1,N2
0019 IF (I.GT.(N-3)) GO TO 40
0021 M(I,I+1)=W(I)
0022 M(I+1,I)=U(I+1)
0023 40 M(I,I)=2.0
0024 50 CONTINUE
0025 CALL GAUSS(N2,M,V,DIX)
0026 C(1,K)=0.
0027 C(N,K)=0.
0028 DO 60 I=1,N2
0029 60 C(I+1,K)=V(I)
0030 DO 70 I=1,N1
0031 A(I,K)=IG(K,I)
0032 B(I,K)=(IG(K,I+1)-IG(K,I))/H(I)-H(I)*(C(I+1,K)+2.*C(I,K))/3.
0033 70 D(I,K)=(C(I+1,K)-C(I,K))/H(I)/3.
C... WYZNACZENIE PRZEDZIALU W KTORYM LEZY Z
0034 80 IF (Z-UG(K,1)) 120,90,100
0035 90 I=1
0036 GO TO 170
0037 100 IF (Z-UG(K,N)) 140,110,120
0038 110 I=N-1
0039 GO TO 170
0040 120 WRITE(7,130) Z,K
0041 130 FORMAT(' *ZMIENNA NIEZALEZNA=',E10.3,' Z GALEZI',I3,
* ' NIE NALEZY DO DZIEDZINY*///' ZMIENIC PUNKT STARTOWY')
0042 FIX=0.
0043 RETURN
0044 140 DO 150 I=2,N
0045 IF (Z-UG(K,I)) 160,160,150
0046 150 CONTINUE
0047 160 I=I-1
C... OBLICZANIE WARTOSCI FUNKCJI S(Z) I POCHODNEJ DS(Z)

```

FORTRAN IV

V02.5

PAGE 002

```

0048 170 S=A(I,K)+(Z-UG(K,I))*(B(I,K)+(Z-UG(K,I))*
      * (C(I,K)+(Z-UG(K,I))*D(I,K)))
0049 DS=B(I,K)+(Z-UG(K,I))*(2.*C(I,K)+(Z-UG(K,I))*3.*D(I,K))
0050 FIX=1.
0051 RETURN
0052 END
    
```

FORTRAN IV

V02.5

PAGE 001

```

C... PODPROGRAM ROZWIĄZYWANIA UKŁADU RÓWNAŃ LINIOWYCH
0001 SUBROUTINE GAUSS(N,A,B,DIX)
0002 DIMENSION A(10,10),B(10)
0003 N1=N-1
0004 DO 100 I=1,N1
0005 P=0.
0006 DO 20 K=I,N
0007 IF (ABS(P)-ABS(A(K,I))) 10,20,20
0008 10 F=A(K,I)
0009 L=K
0010 20 CONTINUE
0011 IF (ABS(P)-0.) 30,30,50
0012 30 WRITE(7,40)
0013 40 FORMAT(/10X,'* OSOBLIWY UKŁAD RÓWNAŃ */
    *' ZMIENIC PUNKT STARTOWY'/)
0014 DIX=0.
0015 RETURN
0016 50 DO 60 J=1,N
0017 SAVE=A(I,J)
0018 A(I,J)=A(L,J)
0019 A(L,J)=SAVE
0020 60 CONTINUE
0021 SAVE=B(I)
0022 B(I)=B(L)
0023 B(L)=SAVE
0024 KK=I+1
0025 DO 70 K=KK,N
0026 A(K,I)=A(K,I)/F
0027 70 CONTINUE
0028 DO 90 K=KK,N
0029 DO 80 JK=KK,N
0030 A(K,JK)=A(K,JK)-A(K,I)*A(I,JK)
0031 80 CONTINUE
0032 B(K)=B(K)-A(K,I)*B(I)
0033 90 CONTINUE
0034 100 CONTINUE
0035 B(N)=B(N)/A(N,N)
0036 IF(N.EQ.1) GO TO 130
0037 DO 120 I=1,N1
0038 IB=N-I
0039 IC=N
0040 DO 110 K=1,I
0041 B(IB)=B(IB)-A(IB,IC)*B(IC)
0042 IC=IC-1
0043 110 CONTINUE
0044 B(IB)=B(IB)/A(IB,IB)
0045 120 CONTINUE
0046 130 DIX=1.
0047 RETURN
0048 END
0049

```