

Andrzej CZECHOWSKI
Piotr RORBACH

ANALIZA CZUŁOŚCI I OBLICZANIE NAJBARDZIEJ NIEKORZYSTNYCH WARUNKÓW PRACY LINIOWYCH OBWODÓW PRĄDU STAŁEGO

Streszczenie. W pracy zdefiniowano pojęcia czułości oraz najgorszych warunków pracy układu elektrycznego lub elektronicznego. Przedstawiono metodę obliczania czułości i wyznaczania najgorszych warunków pracy układu, stosowaną w systemie programów ECAP 1. Metodę tę zmodyfikowano tak, aby lepiej wykorzystać język ALGOL 1204. Program zastosowano do wyznaczenia wpływu tolerancji elementów układu konwertera C-A na dokładność przetwarzania.

1. Wstęp

Ważnym problemem występującym przy projektowaniu obwodów elektrycznych i elektronicznych jest zagadnienie czułości. Pod tym pojęciem należy rozumieć wpływ zmian wartości elementów obwodu na pewne jego parametry. Z czułością związane jest określenie najbardziej niekorzystnych warunków pracy obwodu, tj. wyznaczanie największych zmian wartości jego parametrów od wartości ustalonych przy zadanym z góry rozrzucie wartości jego elementów.

Najprostszą metodę analizy czułości w liniowych obwodach prądu stałego jest obliczenie pochodnych cząstkowych parametrów względem wartości elementów. Sposób ten jest jednak całkowicie nieprzydatny dla obwodów bardziej rozbudowanych, złożonych z więcej niż kilku elementów. Ponadto, konieczne jest przy tym operowanie wielkościami ogólnymi, a dopiero po wyznaczeniu pochodnych podstawia się wartości liczbowe i dokonuje obliczeń.

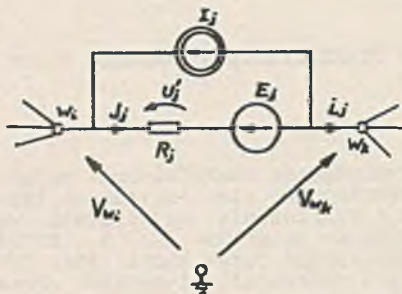
Innym sposobem jest wielokrotne przeliczenie obwodów różniących się małymi zmianami wartości poszczególnych elementów, przy czym za każdym razem dokonuje się zmiany wartości tylko jednego elementu. Następnie wyznacza się ilorazy różnicowe poszczególnych parametrów względem zmian wartości elementów. Wartości ilorazów są w przybliżeniu równe pochodnym cząstkowym. Metoda jest prosta, lecz pracochłonna.

Metoda najbardziej sformalizowana matematycznie jest stosowana w systemie programów ECAP, służącym do analizy obwodów elektronicznych [1]. Jej największą zaletą jest sprowadzenie obliczeń pochodnych cząstkowych do działań algebraicznych na macierzach.

Przedstawiony w tym artykule program analizy czułości i wyznaczania najbardziej niekorzystnych warunków pracy nawiązuje do powyższej metody, zmodyfikowanej dla lepszego wykorzystania własności języka ALGOL 1204.

2. Równania potencjałów węzłowych i ich rozwiązanie

Niech będzie dany liniowy, pasywny obwód prądu stałego o w węzłach i g gałęziach, z tego g_2 gałęzi z siłami prądomotorycznymi. Gałęzi bez sił prądomotorycznych jest więc $g_1 = g - g_2$. Każdą gałąź obwodu można przedstawić tak, jak na rys. 1.



Rys. 1. Gałąź uogólniona

Przy takim strzałkowaniu prądu gałęziowego i_j węzeł w_1 jest węzłem początkowym, a w_k - końcowym.

Elementy a_{ij} macierzy incydencji \underline{A} określa się następująco:

1. Węzeł i jest węzłem początkowym dla gałęzi j -tej $a_{ij} = 1$.
2. Węzeł i jest węzłem końcowym dla gałęzi j -tej $a_{ij} = -1$.
3. Gałąź j -ta nie styka się z i -tym węzłem $a_{ij} = 0$.

Macierz \underline{A} ma wymiary $g \times (w-1)$.

Macierz przewodności gałęziowych \underline{Y} jest diagonalna. Jej elementami są wartości przewodności gałęzi bez SPM (a więc macierz ma wymiary $g_1 \times g_1$).

Prądy gałęziowe i_j spełniają zależność: $\underline{A}^t \cdot \underline{i} = \underline{0}$. Napięcie gałęziowe U_j można wyrazić poprzez potencjały węzłowe:

$$\underline{U} = \underline{A} \cdot \underline{V},$$

gdzie \underline{V} - wektor $w-1$ potencjałów węzłowych.

Z następujących równości:

$$\underline{U}' = \underline{U} - \underline{E}$$

$$\underline{i} = \underline{J} - \underline{I}$$

$$\underline{J} = \underline{Y} \cdot \underline{U}'$$

wynika równanie określające zależność potencjałów węzłowych od sił elektro- i prądomotorycznych:

$$\underline{A}^t \cdot \underline{Y} \cdot \underline{A} \cdot \underline{V} = \underline{A}^t (\underline{Y} \underline{E} + \underline{I}) \quad (1)$$

Stąd:

$$\underline{V} = (\underline{A}^t \cdot \underline{Y} \cdot \underline{A})^{-1} \underline{A}^t (\underline{Y} \underline{E} + \underline{I}) \quad (2)$$

Układ równań (1) można rozwiązać znanymi metodami. Ponieważ w dalszym toku obliczeń potrzebna jest macierz $(\underline{A}^t \cdot \underline{Y} \cdot \underline{A})^{-1}$, dlatego skorzystano z niej do wyznaczenia potencjałów węzłowych.

W schematach zastępczych realnych obwodów występują często gałęzie bezoporowe lub idealne siły elektromotoryczne. Uniemożliwia to wyznaczenie rozwiązania (2). W [1] rozwiązano ten problem, wstawiając w miejsce gałęzi bezoporowych rezystancji 0.1Ω . Sposób jest równie prosty jak skuteczny, a błędy stąd wynikające są do pominięcia, zważywszy, iż wartości elementów realnego obwodu obciążone są dużo większymi błędami (np. pomiarowymi).

W omawianym programie postąpiono podobnie: w miejsce gałęzi bezoporowych wstawia się rezystancję o wartości od 0.001 do 0.01 wartości najmniejszej niezerowej rezystancji obwodu w zależności od stopnia uwzględnienia macierzy $\underline{A}^t \cdot \underline{Y} \cdot \underline{A}$.

3. Obliczenie pochodnych cząstkowych potencjałów węzłowych

Zróżniczkowanie (2) względem R_j - wartości rezystancji j -tej gałęzi nie zawierającej SPM - prowadzi do następującej zależności [1]:

$$\frac{\partial \underline{V}}{\partial R_j} = -(\underline{A}^t \cdot \underline{Y} \cdot \underline{A})^{-1} \underline{A}^t \frac{\partial \underline{Y}}{\partial R_j} (\underline{A} \underline{V} - \underline{E}), \quad (3)$$

gdzie $\frac{\partial \underline{V}}{\partial R_j}$ jest wektorem pochodnych cząstkowych potencjałów węzłowych względem R_j .

Pochodna macierzy \underline{Y} względem R_j jest macierzą diagonalną, której j -tym elementem jest $-1/R_j^2$, a pozostałe wyrazy równe są 0.

Zastąpienie pochodnej \underline{Y} względem R_j macierzą diagonalną o elementach $-1/R_i^2$ $i = 1, 2, \dots, g_1$, pomnożenie prawostronne (3) przez $\underline{1}$ i odpowiednie pogrupowanie prowadzi do wzoru szczególnie przydatnego w obliczeniach maszynowych:

$$\frac{\partial \underline{V}}{\partial \underline{R}} = -(\underline{A}^t \cdot \underline{Y} \cdot \underline{A})^{-1} \underline{A}^t \frac{\partial \underline{Y}}{\partial \underline{R}} [(\underline{A} \underline{V} - \underline{E}) \cdot \underline{1}], \quad (4)$$

gdzie:

$\frac{\partial \underline{Y}}{\partial \underline{R}}$ - oznacza symbolicznie macierz diagonalną $\text{diag} \left[-\frac{1}{R_1^2} \right]$,

$\frac{\partial \underline{V}}{\partial \underline{R}}$ - macierz o wymiarach $(w-1) \times g_1$, której wierszami są pochodne cząstkowe kolejnych od 1 do $w-1$ potencjałów węzłowych względem rezystancji gałęzi od 1 do g_1 .

Podobnie różniczkując względem E_i i I_k :

$$\frac{\partial V}{\partial E_i} = (\underline{A}^t \underline{Y} \underline{A})^{-1} \underline{A}^t \underline{Y} \epsilon_i \quad (5)$$

gdzie: $\epsilon_i^t = [00\dots 10\dots 0]$ wektor z 1 na i-tym miejscu

$$\frac{\partial V}{\partial I_k} = (\underline{A}^t \underline{Y} \underline{A})^{-1} \underline{A}^t \epsilon_k. \quad (6)$$

Po przekształceniu do postaci analogicznej do (4) $\underline{\epsilon}_k$.

$$\frac{\partial V}{\partial E} = [(\underline{A}^t \underline{Y} \underline{A})^{-1} \underline{A}^t] \cdot \underline{Y} \cdot \underline{J}_1, \quad (7)$$

gdzie: \underline{J}_1 jest macierzą diagonalną o elementach 0 lub 1, w zależności od tego, czy w i-tej gałęzi jest SEM

$$\frac{\partial V}{\partial I} = [(\underline{A}^t \underline{Y} \underline{A})^{-1} \underline{A}^t] \cdot \underline{J}_2. \quad (8)$$

\underline{J}_2 - macierz diagonalna jw., tylko dla SPM.

4. Wyznaczenie najbardziej niekorzystnych warunków pracy

Sposób znajdowania najbardziej niekorzystnych warunków pracy przy założonym rozrzucie wartości elementów obwodu opiera się na stwierdzeniu, iż potencjał węzłowy jest monotoniczną funkcją wartości każdego z elementów z osobna.

Procedura postępowania jest następująca.

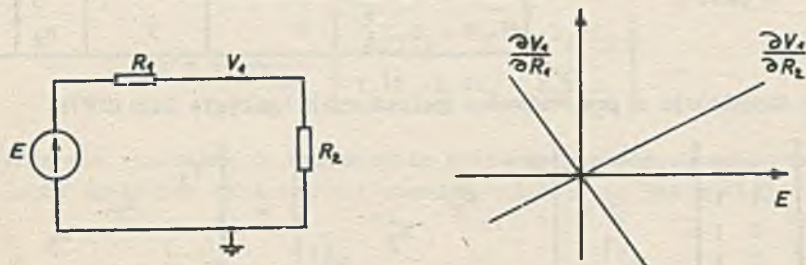
W celu znalezienia maksymalnych wartości potencjałów węzłowych należy nadać tym elementom, względem których pochodne cząstkowe są dodatnie wartości największe, a tym, względem których ujemne - najmniejsze i dokonać analizy obwodu. Postępowanie to trzeba przeprowadzić dla każdego z potencjałów węzłowych oddzielnie. Podobnie wygląda znajdowanie minimalnych wartości potencjałów.

W tym miejscu należy jednak zrobić pewne zastrzeżenie.

Otóż potencjały węzłowe są funkcjami wielu zmiennych. Nie można w takim razie nic powiedzieć o ich zachowaniu, nawet w małym otoczeniu pewnego punktu np. punktu nominalnego na podstawie znajomości tylko pierwszych pochodnych cząstkowych. Dlatego konieczne jest obliczenie wszystkich tych pochodnych w nowych punktach pracy V_{\min} i V_{\max} i porównanie ich znaków ze znakami odpowiednich pochodnych w punkcie nominalnym.

Zmiana znaku powoduje konieczność nadania nowej wartości rezystancji, względem której pochodna zmieniła znak. Sposób postępowania jest przy tym taki, jak na początku, tzn. przy szukaniu największych wartości potencjałów, elementom, względem których nowe wartości pochodnych cząstkowych są dodatnie, nadaje się przyrosty dodatnie, a względem których ujemne - ujemne.

Uzasadnienie powyższego postępowania jest następujące. Zmiana znaku pochodnych cząstkowych względem rezystancji związana jest ze zmianą znaku potencjałów węzłowych. Jeśli nominalna wartość któregoś z potencjałów jest dodatnia, a minimalna ujemna, to zmiana znaku pochodnej cząstkowej wskazuje na możliwość uzyskania jeszcze mniejszej wartości tego potencjału czyli większej co do wartości bezwzględnej. Rezystancji, względem której pochodna była w warunkach nominalnych ujemna, nadawało się wartość maksymalną, co powodowało zmniejszenie wartości potencjału. Po zmianie znaku tej pochodnej należy rezystancji nadać wartość minimalną, co związane jest ze wzrostem wartości bezwzględnej tego potencjału.



Rys. 2. Zależność pochodnych cząstkowych potencjału względem oporów od wartości SEM

Ilustracją powyższych rozważań jest prosty przykład [1]:

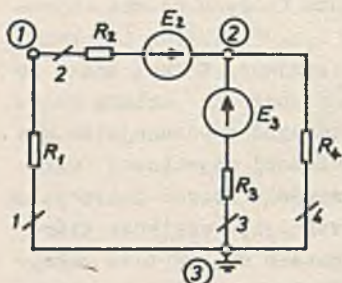
$$V_1 = E \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{\partial V_1}{\partial R_1} = -E \frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} \quad \frac{\partial V_1}{\partial R_2} = E \frac{R_1}{(R_1 + R_2)^2}$$

Zmiana biegunowości SEM E powoduje zmianę znaku pochodnych cząstkowych V_1 względem R_1 i R_2 .

5. Przykład

Jako przykład może służyć analiza prostego obwodu o 2 węzłach i 4 gałęziach.



Rys. 3. Schemat zastępczy obwodu rozpatrywanego w pkt. 5

Wielkości charakteryzujące obwód i sposób kodowania podano niżej (przyjmując węzeł 3 jako węzeł odniesienia)

$$g = 4, \quad g_1 = 4, \quad g_2 = 0, \quad w = 3$$

Nr gałęzi i	Węzeł początkowy b_i	Węzeł końcowy c_i	r_i	E_i
1	1	3	R_1	0
2	2	1	R_2	E_2
3	2	3	R_3	E_3
4	2	3	R_4	0

Macierze incydencji i przewodności gałęziowych (gałęzie bez SPM):

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \underline{Y} = \begin{bmatrix} R_1^{-1} & & & \\ & R_2^{-1} & & \\ & & R_3^{-1} & \\ & & & R_4^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & & & \\ & Y_2 & & \\ & & Y_3 & \\ & & & Y_4 \end{bmatrix}$$

Macierz przewodności w równaniach potencjałów węzłowych:

$$\underline{Y}_w = \underline{A}^t \cdot \underline{Y} \cdot \underline{A} = \begin{bmatrix} Y_1 + Y_2 & -Y_2 \\ -Y_2 & Y_2 + Y_3 + Y_4 \end{bmatrix}$$

Wektory SEM, SPM i zastępczych sił prądomotorycznych gałęzi:

$$\underline{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_2 \\ E_3 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{I} = \underline{0}, \quad (\underline{I} + \underline{Y}\underline{E}) = \begin{bmatrix} 0 \\ Y_2 E_3 \\ Y_3 E_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Wektor wyrazów wolnych (wymuszeń) w równaniach potencjałów węzłowych:

$$\underline{A}^t(\underline{I} + \underline{Y} \underline{E}) = \begin{bmatrix} -Y_2 E_2 \\ Y_2 E_2 + Y_3 E_3 \end{bmatrix}.$$

Macierz odwrotna do macierzy przewodności:

$$\underline{Y}_w^{-1} = (\underline{A}^t \underline{Y} \underline{A})^{-1} = \frac{1}{\det \underline{Y}_w} \begin{bmatrix} Y_2 + Y_3 + Y_4 & Y_2 \\ Y_2 & Y_1 + Y_2 \end{bmatrix},$$

gdzie: $\det \underline{Y}_w = (Y_1 + Y_2)(Y_3 + Y_4) + Y_1 Y_2$.

Rozwiązanie, tj. wektor potencjałów węzłowych:

$$\underline{V} = \frac{1}{\det \underline{Y}_w} \begin{bmatrix} Y_2 Y_3 E_3 - Y_2 (Y_3 + Y_4) E_2 \\ Y_3 (Y_1 + Y_2) E_3 + Y_1 Y_2 E_3 \end{bmatrix}.$$

Wyrażenia potrzebne do wyznaczenia macierzy pochodnych cząstkowych potencjałów węzłowych względem rezystancji (oznaczenia jak w (4)):

$$\underline{A} \underline{V} - \underline{E} = \begin{bmatrix} V_1 \\ -V_1 + V_2 - E_2 \\ V_2 - E_3 \\ V_2 \end{bmatrix}, \quad (\underline{A} \underline{V} - \underline{E}) \cdot \underline{1} = \begin{bmatrix} V_1 \\ -V_1 + V_2 - E_2 \\ V_2 - E_3 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \underline{V}}{\partial R} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1} \\ -\frac{1}{R_2} \\ -\frac{1}{R_3} \\ -\frac{1}{R_4} \end{bmatrix}$$

Macierz pochodnych cząstkowych potencjałów węzłowych względem wartości rezystancji gałęziowych:

$$\frac{\partial \underline{V}}{\partial \underline{R}} = -(\underline{Y}_w^{-1} \underline{A}^t) \frac{\partial \underline{Y}}{\partial \underline{R}} (\underline{A} \underline{V} - \underline{E}) \cdot \underline{1} = \frac{1}{\det \underline{Y}_w} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1^2} (Y_2 + Y_3 + Y_4) V_1 - \frac{1}{R_2^2} (Y_3 + Y_4) (-V_1 + V_2 - E_2) & \frac{1}{R_3^2} Y_2 (V_2 - E_3) & \frac{1}{R_4^2} \cdot Y_2 \cdot V_2 \\ \frac{1}{R_1^2} Y_2 V_1 & \frac{1}{R_2^2} Y_1 (-V_1 + V_2 - E_2) & \frac{1}{R_3^2} (Y_1 + Y_2) V_2 - E_3 & \frac{V_2}{R_4^2} (Y_1 + Y_2) \end{bmatrix}$$

Macierz \underline{J}_1 z równania (7) wygląda następująco:

$$\underline{J}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

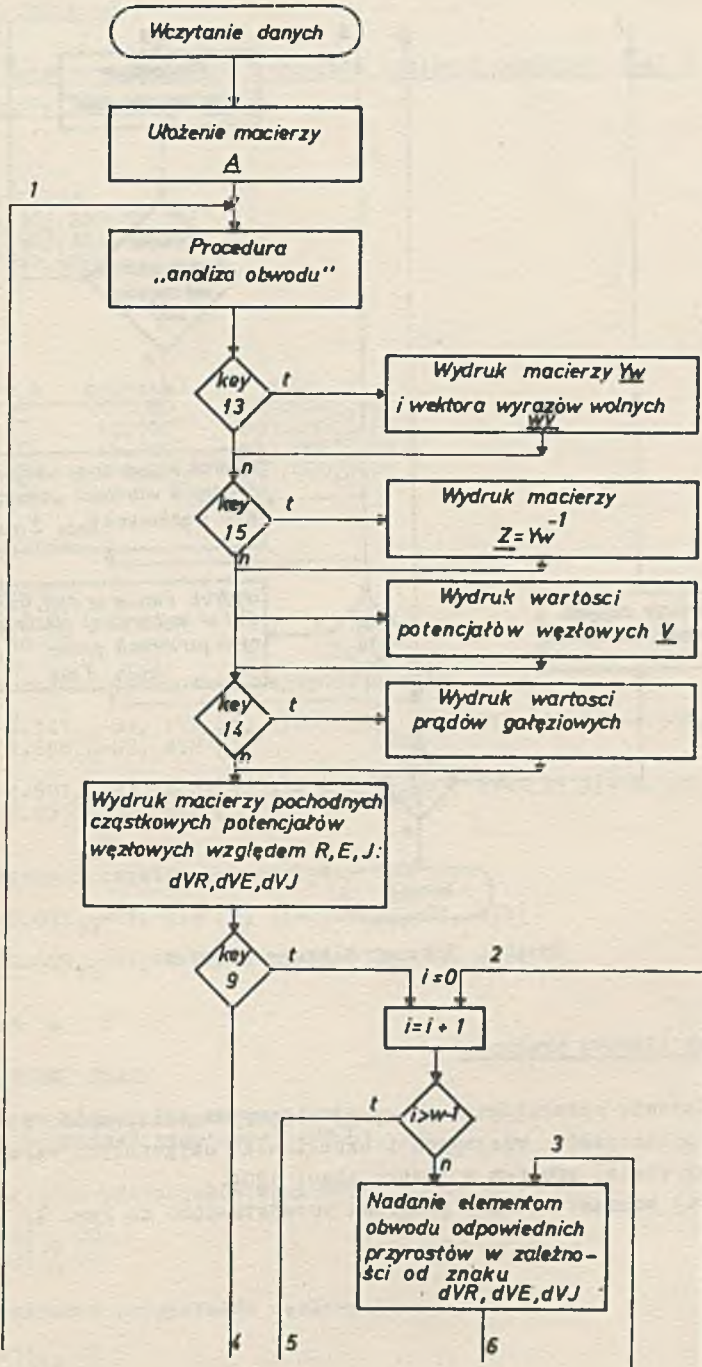
Macierz \underline{J}_2 z równania (8) $\underline{J}_2 = 0$.

Macierz pochodnych cząstkowych potencjałów węzłowych względem wartości sił elektromotorycznych:

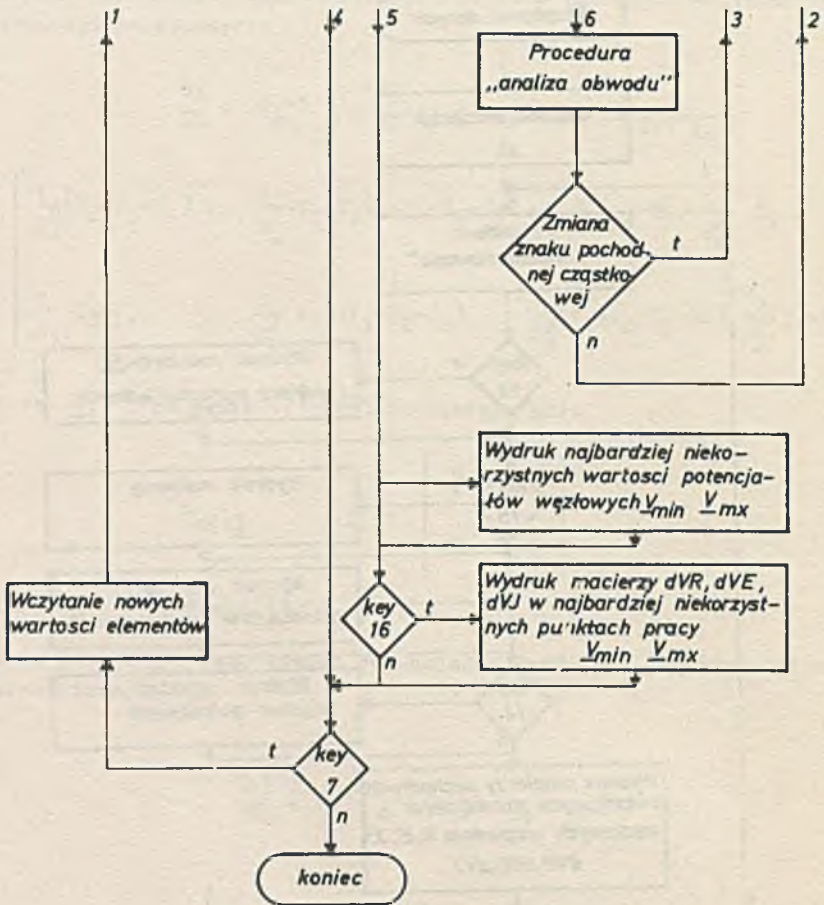
$$\begin{aligned} \frac{\partial \underline{V}}{\partial \underline{E}} &= (\underline{Y}_w^{-1} \underline{A}^t) \cdot \underline{Y} \cdot \underline{J}_1 = \\ &= \frac{1}{\det \underline{Y}_w} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -(Y_3 + Y_4) Y_2 & Y_2 Y_3 & 0 \\ 0 & Y_1 Y_2 & (Y_1 + Y_2) Y_3 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Dla sprawdzenia poprawności obliczeń można wyznaczyć pochodne cząstkowe V_1 i V_2 względem rezystorów, np.:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_1}{\partial R_1} &= -\frac{1}{R_1^2} \left(-\frac{Y_2 Y_3 E_3 - Y_2 (Y_3 + Y_4) E_2}{[(Y_1 + Y_2)(Y_3 + Y_4) + Y_1 Y_2]^2} (Y_2 + Y_3 + Y_4) \right) = \\ &= \frac{1}{R_1^2} V_1 \frac{Y_2 + Y_3 + Y_4}{\det \underline{Y}_w} \end{aligned}$$



Rys. 4



Rys. 4. Schemat blokowy programu

6. Schemat blokowy programu

Na podstawie przedstawionego wyżej algorytmu obliczania współczynników czułości potencjałów węzłowych i określania najgorszych warunków pracy, opracowany został program w języku Algol 1204.

Uproszczony schemat blokowy programu przedstawiono na rys. 4.

7. Przykłady obliczeń

7.1. Wydruk danych wejściowych i wyników obliczeń obwodu z rys. 3
(oznaczenia jak na rysunku)

1,
4,0,3,
1,1,3,0,50/-10,10/
2,2,1,10/-15,10/,20/-10,10/
3,2,3,16/-15,10/,40/-10,10/
4,2,3,0,100/-10,10/,
3

zadanie nr= 1

nr g	w p	w k	sem (spm)	opór
1	1	3	.000	5000.000 ₁₀ ⁻⁰²
2	2	1	10.000	2000.000 ₁₀ ⁻⁰²
3	2	3	16.000	4000.000 ₁₀ ⁻⁰²
4	2	3	.000	1000.000 ₁₀ ⁻⁰¹

potencjały węzłowe

V [1]= 7.246₁₀⁻⁰¹
V [2]= 1.101₁₀⁰¹
V [3]= .000₁₀⁰⁰

macierz pochodnych cząstkowych względem oporów

dVR [1, 1]= 7.141₁₀⁻⁰³, dVR [1, 2]=-7.351₁₀⁻⁰³, dVR [1, 3]=-4.516₁₀⁻⁰²
dVR [1, 4]= 1.596₁₀⁻⁰², dVR [2, 1]= 4.201₁₀⁻⁰³, dVR [2, 2]= 4.201₁₀⁻⁰³, dVR [2, 3]=-6.322₁₀⁻⁰²
dVR [2, 4]= 2.235₁₀⁻⁰², dVR [3, 1]= 1.101₁₀⁻⁰¹, dVR [3, 2]= 1.101₁₀⁻⁰¹, dVR [3, 3]= 1.101₁₀⁻⁰¹

macierz pochodnych cząstkowych względem SEM

dVE [1, 2]=-5.072₁₀⁻⁰¹, dVE [1, 3]= 3.623₁₀⁻⁰¹, dVE [2, 2]= 2.899₁₀⁻⁰¹, dVE [2, 3]= 5.072₁₀⁻⁰¹, dVE [3, 1]= 1.101₁₀⁻⁰¹, dVE [3, 2]= 1.101₁₀⁻⁰¹, dVE [3, 3]= 1.101₁₀⁻⁰¹

czas obliczeń = 1

NAJGORSZE WARUNKI PRACY

zmiana znaku pochodnej cząstkowej dVR [1, 1]
zmiana znaku pochodnej cząstkowej dVR [1, 2]

minimalne wartości potencjałów węzłowych

V_{mn} [1]=-1.001₁₀⁰⁰
V_{mn} [2]= 8.932₁₀⁰⁰

maksymalne wartości potencjałów węzłowych

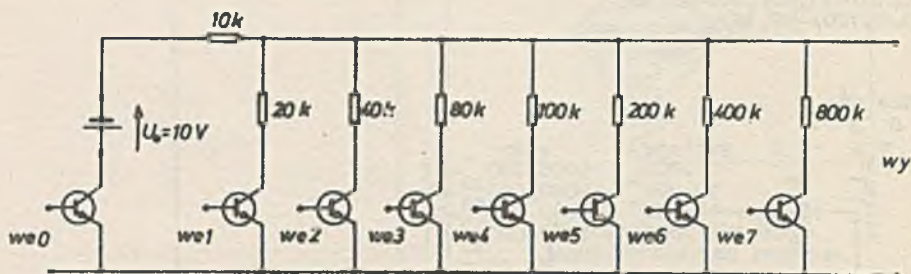
V_{mx} [1]= 2.615₁₀⁰⁰
V_{mx} [2]= 1.267₁₀⁰¹

Całkowity czas obliczeń = 5

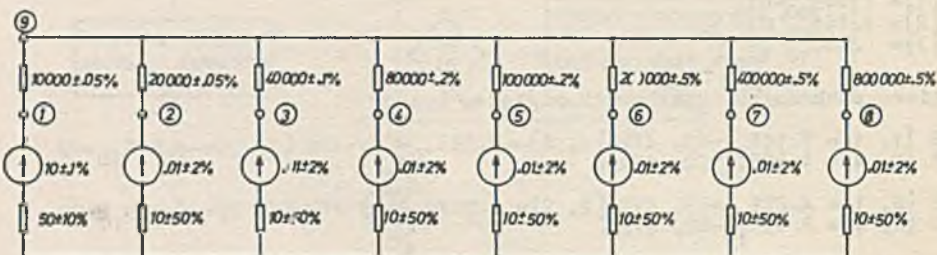
7.2. Analiza przetwornika cyfrowo-analogowego

Pokazany na rys. 5 układ jest konwerterem C-A [4]. Program pozwala na wyznaczenie wpływu tolerancji poszczególnych elementów układu na dokładność przetwarzania oraz na określenie największych odchyłek sygnału wyjściowego - napięcia V_g przy założonych tolerancjach.

Na rys. 6 podano schemat zastępczy przetwornika dla kombinacji wejść, powodującej największy błąd (wszystkie tranzystory w stanie nasycenia).



Rys. 5. Schemat ideowy przetwornika A/C



Rys. 6. Schemat zastępczy obwodu z rys. 5 z zaznaczonymi tolerancjami elementów

Wydruk wyników obliczeń dla obwodu z rys. 5:

zadanie nr=100

16 0 10

nr	g	w	p	w	k	sem (spm)	opór
2	1	10				10.000	5000.000 ¹⁰⁻⁰²
1	9	1				.000	1000.000 ¹⁰⁻⁰¹
4	2	10				.010	1000.000 ¹⁰⁻⁰²
3	9	2				.000	2000.000 ¹⁰⁻⁰¹
5	9	3				.000	4000.000 ¹⁰⁻⁰¹
6	3	10				.010	1000.000 ¹⁰⁻⁰²
7	9	4				.000	8000.000 ¹⁰⁻⁰¹
8	4	10				.010	1000.000 ¹⁰⁻⁰²
9	9	5				.000	1000.000 ¹⁰⁻⁰²
10	5	10				.010	1000.000 ¹⁰⁻⁰²
11	9	6				.000	2000.000 ¹⁰⁻⁰²
12	6	10				.010	1000.000 ¹⁰⁻⁰²
13	9	7				.000	4000.000 ¹⁰⁻⁰²
14	7	10				.010	1000.000 ¹⁰⁻⁰²
15	9	8				.000	8000.000 ¹⁰⁻⁰²
16	8	10				.010	1000.000 ¹⁰⁻⁰²

potencjały węzłowe

$V [1] = 9.974_{10} 00$
 $V [2] = 1.241_{10} -02$
 $V [3] = 1.121_{10} -02$
 $V [4] = 1.060_{10} -02$
 $V [5] = 1.048_{10} -02$
 $V [6] = 1.024_{10} -02$
 $V [7] = 1.012_{10} -02$
 $V [8] = 1.006_{10} -02$
 $V [9] = 4.842_{10} 00$
 $V [10] = .000_{10} 00$

macierz pochodnych cząstkowych względem oporów

$dVR [9, 1] = -2.482_{10} -04$, $dVR [9, 2] = -2.482_{10} -04$, $dVR [9, 3] = 5.866_{10} -05$
 $dVR [9, 4] = 5.866_{10} -05$, $dVR [9, 5] = 1.467_{10} -05$, $dVR [9, 6] = 1.467_{10} -05$
 $dVR [9, 7] = 3.669_{10} -06$, $dVR [9, 8] = 3.669_{10} -06$, $dVR [9, 9] = 2.348_{10} -06$
 $dVR [9, 10] = 2.348_{10} -06$, $dVR [9, 11] = 5.872_{10} -07$, $dVR [9, 12] = 5.872_{10} -07$
 $dVR [9, 13] = 1.468_{10} -07$, $dVR [9, 14] = 1.468_{10} -07$, $dVR [9, 15] = 3.670_{10} -08$
 $dVR [9, 16] = 3.670_{10} -08$, $dVR [$

macierz pochodnych cząstkowych względem SEM

$dVE [9, 2] = 4.837_{10} -01$, $dVE [9, 4] = 2.429_{10} -01$, $dVE [9, 6] = 1.215_{10} -01$
 $dVE [9, 8] = 6.076_{10} -02$, $dVE [9, 10] = 4.861_{10} -02$, $dVE [9, 12] = 2.430_{10} -02$
 $dVE [9, 14] = 1.215_{10} -02$, $dVE [9, 16] = 6.076_{10} -03$, $dVE [$

czas obliczeń = 13

NAJGORSZE WARUNKI PRACY

minimalne wartości potencjałów węzłowych

$V_{mn} [9] = 4.831_{10} 00$

maksymalne wartości potencjałów węzłowych

$V_{mx} [9] = 4.853_{10} 00$

całkowity czas obliczeń = 27

8. Ocena dokładności obliczeń

Dokładność obliczeń wykonywanych przez program można ocenić jedynie przez porównanie z istniejącymi i działającymi programami [3], [4] oraz na podstawie wielu prób. Dokładność zależy od uwarunkowania macierzy przewodnościowej \underline{Y}_w w równaniach potencjałów węzłowych i dlatego dokładność programu oceniać można na podstawie wyników obliczeń obwodów źle uwarunkowanych, tj. prowadzących do dużej liczby zer w macierzy \underline{Y}_w oraz do dużej liczby równań, a więc wysokiego stopnia tej macierzy. Wygodnie jest analizować obwody, w których rozkład napięć i rozpyw prądów można z góry przewidzieć. Takimi są np. układy, w których suma napięć wymuszających w każdym oczku jest równa 0. W rezultacie analizy obwodu o 3 oczkach, 16 węzłach i 18 gałęziach, w których potencjały węzłowe są albo równe 0, albo są kombinacją wartości SEM, otrzymano wartości potencjałów obarczone błę-

dem bezwzględny nie większym niż 10^{-6} . Obliczane wartości prądów przewodowych, które powinny być równe 0, są rzędu 10^{-7} przy SEM obwodu rzędu 10^2 . Błędy tej wielkości są porównywalne z błędami mnożeń i dzieleni, przy liczbie tych operacji około $16^3 + 16^2$.

Przekład programu zajmuje w pamięci operacyjnej maszyny Odra 1204 ok. 4500 komórek (wersja z częścią procedur na taśmach binarnych zajmuje ok. 3500 komórek) co pozwala obliczyć obwody o ok. 30 węzłach.

Czas obliczania wartości potencjałów, prądów i współczynników czułości względem rezystorów i SEM obwodu o 16 węzłach wyniósł 37 sekund.

9. Podsumowanie

W artykule podano sposób obliczania macierzy pochodnych cząstkowych potencjałów węzłowych względem wartości rezystancji gałęziowych oraz sił elektro- i prądomotorycznych i określania najgorszych warunków pracy. Przedstawiony został schemat blokowy programu realizującego te obliczenia. Przy opracowaniu programu wykorzystano algorytm obliczania współczynników czułości i określania najgorszych warunków pracy, opisany w [1], który zmodyfikowano dla lepszego wykorzystania właściwości maszyny cyfrowej Odra 1204. Modyfikacje polegają na równoczesnym wyznaczaniu całych macierzy współczynników czułości. Pokazany przykład obrazuje możliwości zastosowania programu do praktycznych obliczeń.

LITERATURA

- [1] Jensen R.O., Lieberman M.D.: IBM Electronic Circuit Analysis Program. Techniques and Applic. Prentice-Hall, 1968.
- [2] Jerzykiewicz K., Szczepkiewicz J.: Algol 1204, PWN, 1972.
- [3] Chojcan J.: Analiza liniowych obwodów prądów stałego. Skrypt Uczelniany Politechniki Śląskiej., Gliwice 1972.
- [4] Chojcan J., Karwan L.: Metoda znajdowania najniekorzystniejszych warunków pracy obwodów: algorytm i zastosowania. W druku.

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Р е з ю м е

В статье представлен метод анализа чувствительности и вычисления условий работы при наихудшем наборе параметров цепи. Метод основан на алгоритме ЕСАР-1. Программа, написанная на языке ALGOL-1204, была применена для определения влияния разброса параметров на точность цифрово-аналогового преобразователя.

SENSITIVITY ANALYSIS AND THE WORST CASE SOLUTION
OF LINEAR D-C CIRCUITS

S u m m a r y

The paper presents a method for sensitivity derivation and the worst case solution of d-c linear electric networks based on the ECAP-1 algorithm. This algorithm has been modified for the ODRA 1204 computer. The program based on this method was used to determine the influence of elements tolerances for the accuracy of the digital-analog converter.