ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1977

Seria: AUTOMATYKA z. 37 Nr kol. 507

Jan CHOJCAN, Lucjan KARWAN

OBLICZANIE OPTYMALNYCH TOLERANCJI W LINIOWYCH OBWODACH ELEKTRYCZNYCH

Streszczenie. W pracy podano sposób doboru tolerancji elementów tak, by przy zadanym dopuszczalnym rozrzucie wartości wielkości wyjściowej cena dobieranych elementów była najniższa. Zamieszczono algorytm, schemat blokowy programu i przykłady.

1. Wstęp

W czasie projektowania układów elektronicznych jednym z etapów jest określenie tolerancji (rozrzutu parametrów) elementów tak, aby wartości funkcji układowych mieściły się w zadanych przedziałach. Dobór odpowiednich tolerancji można przeprowadzić według różnych kryteriów. Jednym z nich, często rozważanym w literaturze i często stosowanym w praktyce, jest taki dobór tolerancji elementów, by całkowity koszt układu był minimalny. Problem ten można sformułować jako szukanie [1,2] ekstremum funkcji przy istnieniu pewnych warunków ograniczających i do jego rozwiązania zastosować metody programowania matematycznego. Efektywność wybranej metody zależeć będzie od rozwiązywanego zagadnienia.

W niniejszej pracy podano sposób wyznaczania dyskretnych wartości tolerancji elementów. W pierwszym etapie wyznaczono tolerancje z ciągłego zbioru wartości - metodą czynnika nieoznaczonego Lagrange'a - a w następnym metodą kolejnych przybliżeń uzyskano rozwiązanie ze zbioru wartości dyskretnych.

2. Sformułowanie problemu

Niech funkcja układowa T zależy od n elementów p_i układu, tj.

$$T = T(p_1, \ldots, p_n)$$

to górną wartość tolerancji funkcji układowej - dla małych zmian wartości elementów - określa się z zależności

$$G_1 = \sum_{i=1}^{n} |S_i^T| \cdot t_i \leqslant G , \tag{1}$$

gdzie:

G - dopuszczalna tolerancja (w %) funkcji układowej,

G_1 - górna wartość tolerancji funkcji układowej,

S_i^T - czułość (względna) funkcji układowej względem i-tego elementu,

t_i - tolerancja (w %) i-tego elementu.

Każdy element układu może przyjmować (wokół wartości nominalnej) m wartości dyskretnych i posiada określoną (dla każdej wartości dyskretnej) cenę. Można więc wprowadzić funkcję kosztów układu określoną przez zbiór par

$$< X_i^j , \quad Y_i^j > \quad j = 1, \ldots, m, \quad i = 1, \ldots, n ,$$

gdzie:

X_i^j - j-ta tolerancja i-tego elementu,

Y_i^j - cena (j-ta) i-tego elementu,

a cena elementów układu, przy przyjętych tolerancjach elementów

$$K = \sum_{i=1}^{n} Y_i^{j(i)} ,$$

gdzie

indeks $j(i)$ - oznacza przyjętą tolerancję (jedną z m) i-tego elementu.

Do dalszej analizy przyjęto założenie, że koszt elementów (których tolerancje należy dobrać) można aproksymować zależnością

$$Y_i = \frac{a_i}{t_i} , \tag{2}$$

gdzie

Y_i - cena i-tego elementu,

a_i - współczynnik liczbowy,

wówczas cena wszystkich elementów, gdy tylko tolerancje k elementów należy dobrać, wyrażona jest zależnością

$$K = \sum_{i=1}^{k} \frac{a_i}{t_i} + \sum_{i=k+1}^{n} Y_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{a_i}{t_i} + K_1 . \tag{2'}$$

Należy tak dobrać tolerancje t_i k elementów, by przy spełnieniu warunku (1) na dopuszczalną tolerancję cena elementów (2) była najmniejsza, czyli należy znaleźć

$$\min_{G_1 \leqslant G} (K-K_1) = \min \sum_{i=1}^{k} \frac{a_i}{t_i} . \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{n} |S_i^T| \cdot t_i \leqslant G$$

Ograniczenie (1) można przedstawić w postaci

$$G_1' = G_1 - \sum_{i=k+1}^{n} |S^T{}_i| \cdot t_i = \sum_{i=1}^{k} |S_i^T| \cdot t_i \leqslant G - \sum_{i=k+1}^{n} |S_i^T| \cdot t_i = G' \tag{1'}$$

oraz przyjąć założenie (bez straty ogólności rozważań), że elementy 1,..,k zostały przenumerowane według malejącej (ze wzrostem indeksu) czułości względnej, wówczas (3) można zapisać jako

$$\min \sum_{i=1}^{k} \frac{a_i}{t_i} \tag{3'}$$

$$\sum_{i=1}^{k} |S_i^T| \cdot t_i \leqslant G' .$$

Proponuje się rozwiązanie (3') w dwu etapach. W pierwszym etapie obliczone zostanie zerowe przybliżenie rozwiązania (3') w zbiorze wartości ciągłych. W drugim etapie w pierwszym kroku zostanie wyznaczone pierwsze przybliżenie rozwiązania dyskretnego, które w następnych krokach będzie w bardzo prosty sposób polepszane.

<u>Pierwszy etap</u> - zagadnienie znajdowania minimum funkcji (3') w zbiorze wartości ciągłych sprowadza się (poprzez metodę czynnika nieoznaczonego Lagrange'a) do szukania minimum bez ograniczeń funkcji $L=L(t_1,\dots,t_k, \lambda^2)$ k+1 zmiennych postaci

$$L = \sum_{i=1}^{k} \frac{a_i}{t_i} + \lambda^2 \left(\sum_{i=1}^{k} |S_i^T| \cdot t_i - G'\right) . \tag{4}$$

Rozwiązaniem jest wyrażenie na tolerancję (ze zbioru wartości ciągłych) i-tego elementu

$$t_i^{(o)} = \frac{G'}{\sum\limits_{j=1}^{k} \sqrt{|S_j^T| \cdot a_j}} \cdot \sqrt{\frac{a_i}{|S_i^T|}}, \tag{5}$$

czyli zerowe rozwiązanie ma postać

$$\underline{R}^{(o)} = (t_1^{(o)}, \ldots, t_k^{(o)}) . \tag{6}$$

<u>Drugi etap</u> - pierwsze przybliżenie rozwiązania dyskretnego otrzymuje się podstawiając (w rozwiązaniu) w miejsce wartości ze zbioru ciągłego (5) (6) wartości dyskretne

$$t_1^{(1)} = x_i^{j(1)} = x_i^{(1)}, \tag{7}$$

gdzie

$$x_i^{(1)} = \begin{cases} x_i^1 & \text{dla} \quad t_i^{(o)} < x_i^1 \\ \max \left\{ x_i^l : x_i^l \leqslant t_i^{(o)}, \quad x_i^{l+1} > t_i^{(o)} \right\} & \begin{matrix} i=1, \ldots, k \\ l=1, \ldots, m-1 \end{matrix} \\ x_i^m & \text{dla} \quad t_i^{(o)} > x_i^m \end{cases}$$

czyli należy dobrać, ze zbioru dopuszczalnych tolerancji, najbliższą wartość dyskretną mniejszą (o ile jest to możliwe) od obliczonej wartości ciągłej. W ten sposób uzyskano pierwsze przybliżenie rozwiązania dyskretnego

$$\underline{R}^{(1)} = (x_1^{(1)}, \ldots, x_k^{(1)}) . \tag{8}$$

Przed przystąpieniem do polepszania rozwiązania należy uporządkować powiększanie tolerancji według malejącej obniżki ceny elementów:

powiększenie tolerancji	obniżka ceny elementu
$x^{j1} — x^{j1+1}$	$\Delta Y^{(1)} = Y^{j1} - Y^{j1+1}$
$x^{j2} — x^{j2+1}$	$\Delta Y^{(2)} = Y^{j2} - Y^{j2+1}$
$\vdots$	
$x^{j(m-1)} — x^{j(m-1)+1}$	$\Delta Y^{(m-1)} = Y^{j(m-1)} - Y^{j(m-1)+1}$ (8a)

gdzie $\Delta Y^{(k+1)} \leqslant \Delta Y^{(k)}$

Rozpatrzmy podzbiór $S^{(1)}$ tych tolerancji pierwszego przybliżenia rozwiązania $\underline{R}^{(1)}$ (8), których powiększeniu odpowiada obniżka ceny elementu o $\Delta Y^{(1)}$. Niech podzbiór ten zawiera p1 elementów, które po przenumerowaniu i uszeregowaniu według malejących czułości można zapisać w postaci

$$S^{(1)} = \left\{ X_1^{j1}, \ldots, X_{p1}^{j1} \right\} .$$

Polepszanie rozwiązania polega na zwiększaniu tolerancji elementów, począwszy od elementu o najmniejszej czułości (tu od elementu p_1)

$$X_{p1}^{(1)} = X_{p1}^{j1} \longrightarrow X_{p1}^{j1+1} = X_{p1}^{(2)}$$

w wyniku uzyskuje się drugie przybliżenie rozwiązania dyskretnego

$$\underline{R}^{(2)} = (X_1^{(2)}, \ldots, X_{p1}^{(2)}, \ldots, X_k^{(2)}) , \tag{8}$$

gdzie

$$X_1^{(2)} = \begin{cases} X_1^{(1)} & \text{dla} \quad 1 \neq p_1 \\ X_{p1}^{(2)} & \text{dla} \quad 1 = p_1 \end{cases} .$$

Należy sprawdzić czy $\underline{R}^{(2)}$ spełnia warunek (1), czyli czy iloczyn skalarny

$$\underline{S}^t \cdot \underline{R}^{(2)} \leq G' , \tag{9}$$

gdzie

$$\underline{S} = (|S_1^T|, \ldots, |S_k^T|) ,$$

jeśli nierówność (9) jest spełniona, tolerancję $X_{p_1}^{(2)}$ należy włączyć do zbioru rozwiązań dopuszczalnych oraz przenieść p1-ty element do odpowiedniego podzbioru, jeśli nie jest spełniona nierówność (9) to pozostaje tolerancja $X_{p1}^{(1)}$ i element p1 pozostaje w podzbiorze $S^{(1)}$. Podobnie postępujemy z elementami p1-1- p1-2- aż do wyczerpania podzbioru $S^{(1)}$.

Następnie rozpatrzmy podzbiór $S^{(2)}$ tych tolerancji, których poszerzeniu odpowiada obniżka ceny $\Delta Y^{(2)}$. Niech podzbiór ten zawiera p2 elementów, które po przenumerowaniu i uszeregowaniu według malejących czułości można zapisać w postaci

$$S^{(2)} = \left\{ X_1^{j2}, \ldots, X_{p_2}^{j2} \right\}.$$

Postępując analogicznie jak z $S^{(1)}$ wyczerpiemy podzbiór $S^{(2)}$. Podobnie postępujemy z podzbiorami $S^{(3)}, \ldots, S^{(m-1)}$. Po ostatnim kroku można obliczyć cenę elementów.

3. Algorytm

ETAP 0 - obliczenie czułości względnych.

Należy obliczyć współczynniki wpływu (czułości względne) zmian wartości elementów na wybraną wielkość wyjściową $\underline{T} - \underline{S}$, którą w tym przypadku jest napięcie. Do obliczenia współczynników wpływu wykorzystano metodę obwodów dołączonych [3] i (dla porównania) metodę przyrostów [4,5].

ETAP 1 - Obliczenie zerowego przybliżenia rozwiązania

1^o - i = 0;

2^o - i = i+1, obliczanie $t_i^{(o)}$ z równania (5);

3^o - jeśli i=k idź do 4^o, w przeciwnym razie wróć do 2^o;

4^o - koniec obliczeń, uzyskano $\underline{R}^{(o)}$ podane równaniem (6).

ETAP 2 - polepszenie rozwiązania

krok = 1

1^o - i = 0;

2^o - i = i+1, $t_i^{(1)} = X_i^{(1)}$ zgodnie z równaniem (7);

3^o - jeśli i=k idź do 4^o, jeśli nie wróć do 2^o;

4^o - koniec obliczeń, uzyskano rozwiązanie $\underline{R}^{(1)}$ z równania (8').

uporządkowanie

1^o - i=1;

2^o - i=i+1, jeśli i=m idź do 5^o;

3^o - j=i, jeśli $s_1 = \Delta Y^{(j)} > \Delta Y^{(j-1)} = s_2$, wówczas $\Delta Y^{(j)} = s_2$ a $\Delta Y^{(j-1)} = s_1$;

4^o - j=j-1, jeśli j = 1 wróć do 2^o, w przeciwnym razie wracaj do 3^o;

5^o - koniec porządkowania.

polepszenie rozwiązania

1^o - l=0, i=0;

2^o - l=l+1;

3^o - i=i+1, jeśli i=m idź do 7^o, w przeciwnym razie $j=p_i$;

4^o - $X_j^{(l)} \rightarrow X_j^{(l+1)}$ uzyskano rozwiązanie $\underline{R}^{(l+1)}$;

5^o - krok = krok+1, jeśli $\underline{S}^{\pm}.\underline{R}^{(l+1)} \leqslant G$, wówczas $S^{(l)} = S^{(l)} \setminus X_j^{(l)}$, w przeciwnym razie $S^{(l)} = S^{(l)}$;

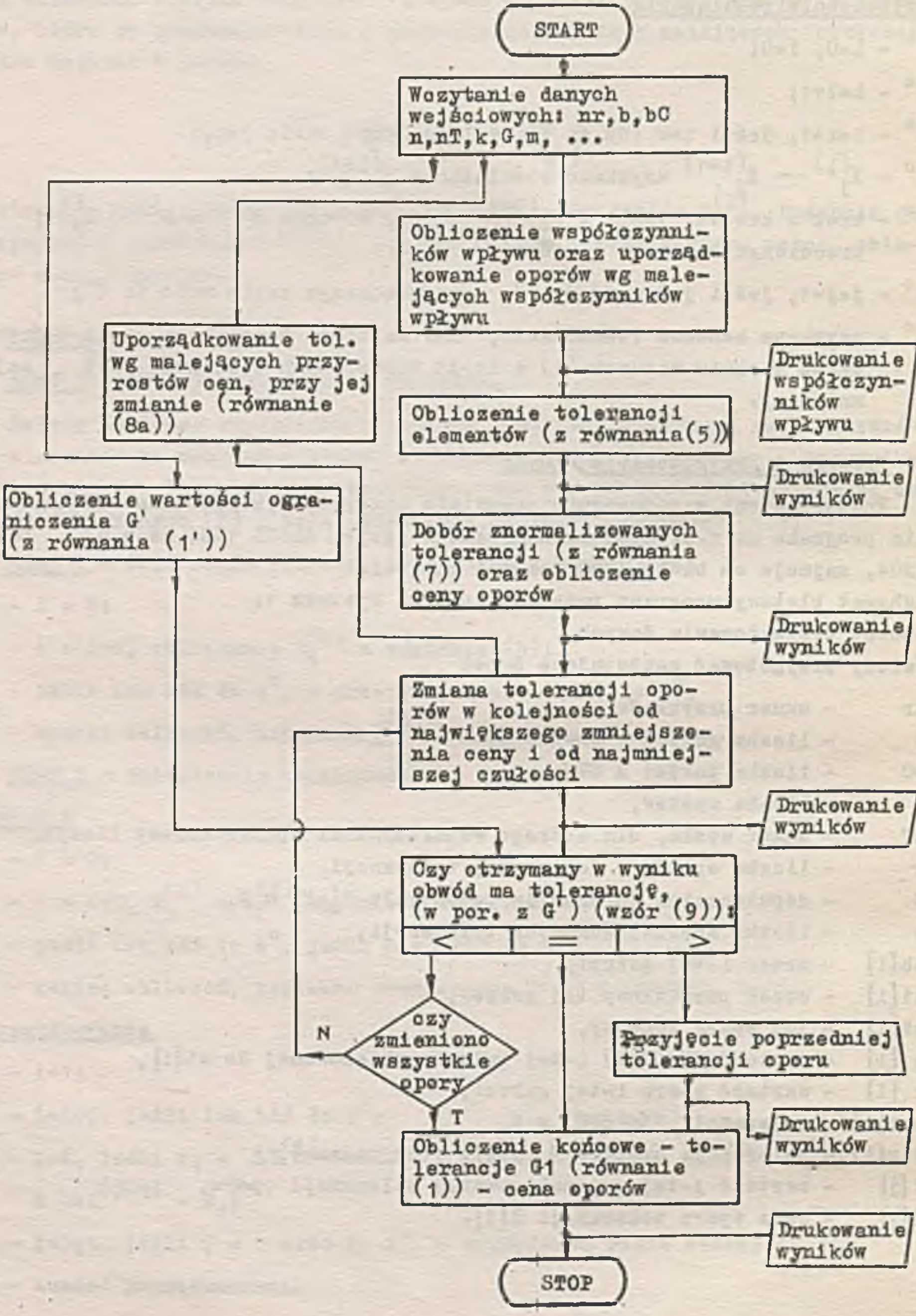
6^o - j=j-1, jeśli j=0 wróć do 3^o, a w przeciwnym razie wróć do 4^o;

7^o - uzyskano końcowe rozwiązanie, tzn. wartości tolerancji, przy których układ spełnia warunek (1) a koszt dobieranych elementów jest najmniejszy.

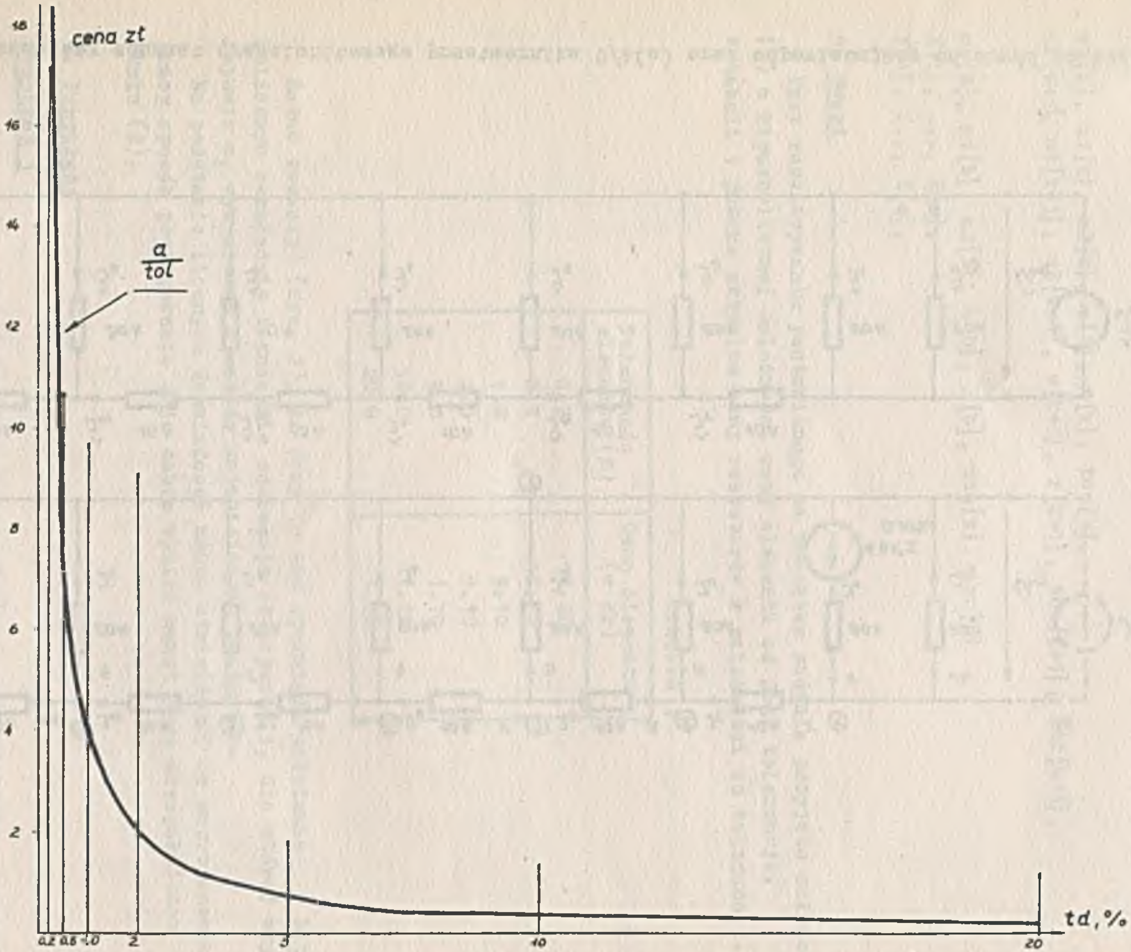
4. Program i przygotowanie danych

Przedstawiony w poprzednim rozdziale algorytm wykorzystano do napisania programu na m.c. Program napisano w języku ALGOL 1204 na m.c. ODRA 1204, zajmuje on około 4000 komórek pamięci.
Schemat blokowy programu przedstawiono na rysunku 1.
Sposób przygotowania danych.
Należy przygotować następujące dane:

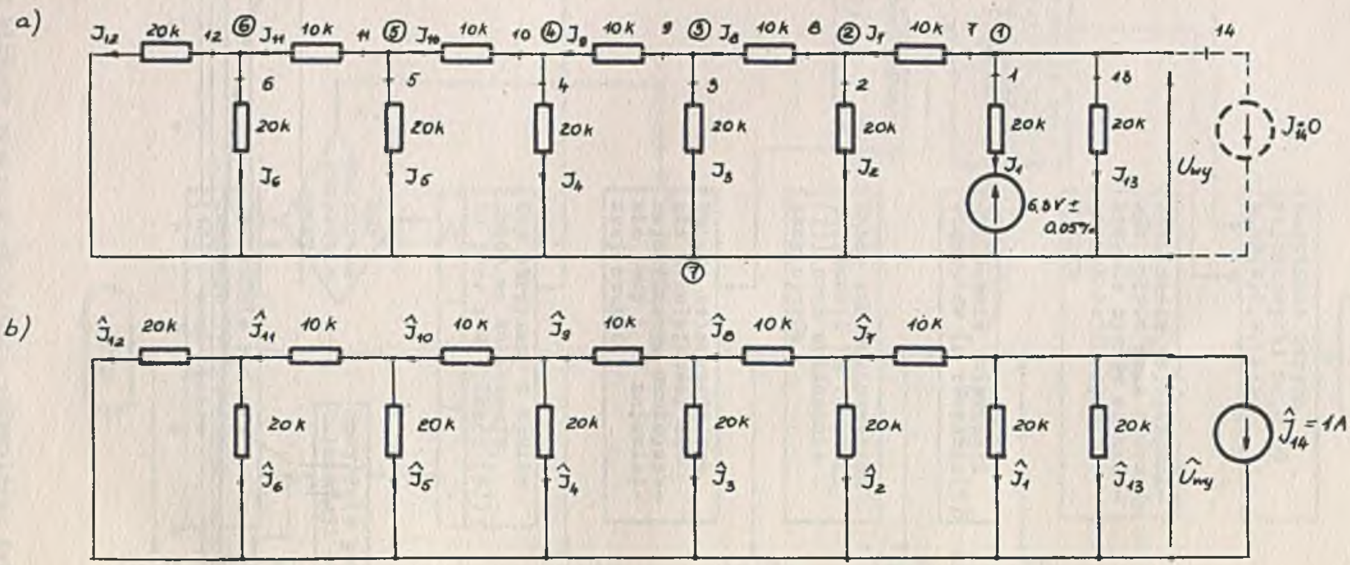
nr - numer przykładu,
b - liczba gałęzi w obwodzie,
bC - liczba gałęzi z SPM,
n - liczba węzłów,
nT - numer węzła, dla którego współczynniki wpływu należy liczyć,
k - liczba oporów o dobieranej tolerancji,
G - dopuszczalna tolerancja potencjału V[nT] w %,
m - liczba znormalizowanych tolerancji,
nb[i] - numer i-tej gałęzi,
n1[i] - węzeł początkowy tej gałęzi,
n2[i] - jej węzeł końcowy,
e [i] - wartość SEM(SPM) i-tej gałęzi, skierowanej do n1[i],
r [i] - wartość oporu i-tej gałęzi,
toe[i] - tolerancja SEM(SPM) w %,
tor[i] - tolerancja oporu w % (jeśli jest zadana),
X[j] - wartość j-tej znormalizowanej tolerancji oporu,
Y[j] - cena oporu tolerancji X[j].



Rys. 1. Schemat blokowy programu obliczania optymalnych tolerancji



Rys. 2. Wykres zależności cen oporów od tolerancji (odcinki pionowe) i odpowiadająca im (z metody najmniejszych kwadratów) hiperbola



Rys. 3. Uproszczony schemat sześciobitowego przetwornika C/A(a) oraz odpowiadający mu obwód dołączony (b)

i wpisać w następującej kolejności:

nr,b,bC,n,nT,k,G,m,
nb[1], n1[1], n2[1], e[1], r[1], toe[1],
⋮
nb[k], n1[k], n2[k], e[k], r[k], toe[k],
nb[k+1], n1[k+1], n2[k+1], e[k+1], r[k+1], toe[k+1], tor[k+1],
⋮
nb[b], n1[b], n2[b], e[b], r[b], toe[b], tor[b]
X[1], ..., X[m],
Y[1], ..., Y[m],

5. Uwagi

Przy rozwiązywaniu postawionego na początku zadania przyjęto założenie (2) o hiperbolicznej zależności ceny elementu od jego tolerancji. W tabeli 1 podano aktualne ceny rezystorów w zależności od tolerancji.

Tablica 1

Tolerancja elementu (%)	Cena elementu (w zł)
0.2	17.20
0.5	10.70
1.0	9.70
2.0	9.10
5.0	1.70
10.0	1.28
20.0	1.15

Łatwo zauważyć (rys. 2), że ceny te nie spełniają założenia o hiperbolicznym rozkładzie i znacznie odbiegają od hiperboli, dla której współczynnik a_i wyznaczono z metody najmniejszych kwadratów.

Na podstawie licznych doświadczeń można stwierdzić, że zaproponowany w pracy sposób postępowania daje dobre wyniki nawet przy niespełnionym warunku (2).

6. Przykłady

Przykład 1

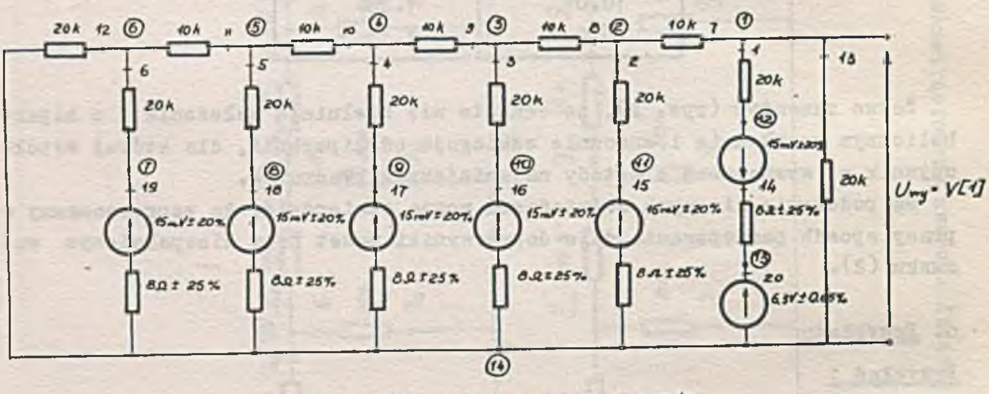
Przykładowo podano dobór tolerancji oporów w sześciobitowym przetworniku C/A (rys. 3a) przy narzuconej, równej 0.5%, tolerancji napięcie U_{wy}. Na rys. 3b podano obwód dołączony. Przy przyjętej, jak na rys. 3a, numeracji węzłów i gałęzi napięcie U_{wy} = V[1], a dane mają następującą postać:

1,14,1,7,1,13,0.5,7,
1,1,7,6.3,2E4,0.05,
2,2,7,0,2E4,0,
3,3,7,0,2E4,0,
4,4,7,0,2E4,0,
5,5,7,0,2E4,0,
6,6,7,0,2E4,0,
7,1,2,0,1E4,0,
8,2,3,0,1E4,0,
9,3,4,0,2E4,0,
10,4,5,0,1E4,0,
11,5,6,0,1E4,0,
12,6,7,0,2E4,0,
13,1,7,0,2E4,0,
14,1,7,0,0,0,
0.2,0.5,1,2,5,10,20,
17.20,10.70,9.70,9.10,1.79,1.28,1.15,.

Otrzymano następującą postać wyników podaną w tablicy 2:

Przykład 2

Rozpatrzono jeszcze raz przetwornik C/A ale dokładniej, z uwzględnieniem rzeczywistych kluczy (rys. 4). Rozrzut parametrów tych kluczy jest zadany. Obliczenia przeprowadzono przy przyjęciu aktualnych cen oporów oraz (dla porównania) przy przyjęciu hiperbolicznej zależności ceny elementów od tolerancji (tablica 3 i 4).



Rys. 4. Schemat przetwornika C/A

A oto wyniki obliczeń:

Tablica 2

```
PRZYKLAD NR =        1
WSPOLCZYNNIKI WPLYWOW DLA WEZLA 1
POTENCJAL (PRZY ZNAMIONOWYCH WARTOSCIACH ELEMENTOW) V [1]= 2.1000  0
QR [ 1]=-7.00@-5  QR [2]= 8.75@-6  QR [3]= 2.19@-6  QR [4]= 5.47@-7  QR [ 5]= 1.37@-7  QR [ 6]= 3.42@-8
QR [ 7]= 3.50@-5  QR [8]= 8.75@-6  QR [9]= 2.19@-6  QR [10]= 5.47@-7  QR [11]= 1.37@-7  QR [12]= 3.42@-8
QR [13]= 3.50@-5
QE [ 1]= 3.33@-1
SR [ 1]=-6.67@-1  SR [2]= 8.33@-2  SR [3]= 2.08@-2  SR [4]= 5.21@-3  SR [ 5]= 1.30@-3  SR [ 6]= 3.26@-4
SR [ 7]= 1.67@-1  SR [8]= 4.17@-2  SR [9]= 1.04@-2  SR [10]= 2.60@-3  SR [11]= 6.51@-4  SR [12]= 3.26@-4
SR [13]= 3.33@-1
SE [ 1]= 1.00@ 0
NUMERY REZYSTOROW W KOLEJNOSCI MAJELACYCH CZULOSCI WZGLEDNYCH:
   1  13   7   2   8   3   9   4  10   5
  11   6  12
KROK  0
OBLICZONE WARTOSCI TOLERANCJI OPOROW:
TOR [1]=   .200   TOR [13]=   .282   TOR[ 7]=   .399   TOR [ 2]=   .564   TOR [8]=   .798
TOR [3]=  1.129   TOR [9]=  1.596   TQR[ 4]=  2.257   TOR [10]=  3.192   TOR [5]=  4.515
TOR [11]=  6.385   TOR [6]=  9.029   TOR[12]=  9.029
ZNORMALIZOWANY SZEREG TOLERANCJI
 TOL(PROC)   CENA(ZL)
   .2     17.20
   .5     10.70
  1.0      9.70
  2.0      9.10
  5.0      1.79
 10.0      1.28
 20.0      1.15
KROK 1
PRZYJETE ZNORMALIZOWANE WARTOSCI TOLERANCJI OPOROW:
TOR [1]=   2   TOR[13]=  .2   TOR [7]=  .2   TOR[ 2]=  .5   TOR [8]=  .5
TOR [3]= 1.0   TOR[ 9]= 1.0   TOR [4]= 2.0   TOR[10]= 2.0   TOR [5]= 2.0
TOR [11]= 5.0  TOR[ 6]= 5.0   TOR [12]= 5.0
TOL. OPOROW =  .352  < .450
CENA OPOROW =  125.07
OBNIŻKA CENY PRZY ZMIANIE TOLERANCJI OPORU
Z TOL.  NA TOL.  OBNIZKA CENY(W ZL)
   2.00    5.00    7.31
    .20     .50    6.50
    .50    1.00    1.00
   1.00    2.00     .60
   5.00   10.00     .51
  10.00   20.00     .13
KROK =   2
ZMIANA   TOR [ 5]= 5.0
TOL. OPOROW = .356  < .450
K = 117.76
KROK =   3
ZMIANA   TOR [10]= 5.0
TOL. OPOROW = .364  < .450
K = 110.45
KROK =   4
ZMIANA   TOR [ 4]= 5.0
TOL. OPOROW = .379  < ,450
K = 103.14
KROK =   5
ZMIANA   TOR [7]=  .5
TOL. OPOROW = .429  < .450
K =  96.64
KROK =   8
ZMIANA   TOR [9]= 2.0
TOL. OPOROW = .440  < .450
K =  96.04
KROK =  10
ZMIANA   TOR [12]=10.0
TOL. OPOROW =  441  < .450
K =  95.53
KROK =  11
ZMIANA   TOR [6]=10.0
TORL. OPOROW =.443  < .450
K =  95.02
KROK =  12
ZMIANA   TOR [11]=10.0
TOL. OPOROW = .446  < .450
K =  94.51
KROK =  14
ZMIANA   TOR [12]=20.0
TOL. OPOROW = .449  < .450
K =  94.38
KONCOWE WARTOSCI TOLERANCJI OPOROW:
TOR [1]=  .2   TOR [2]=  .5   TOR [3]= 1.0   TOR [4]= 5.0   TOR [5]= 5.0
TOR [6]=10.0   TOR [7]=  .5   TOR [8]=  .5   TOR [9]= 2.0   TOR [10]= 5.0
TOR [11]=10.0  TOR [12]=20.0
TOR [13]=  .2
TOLERANCJA NAPIECIA V 1= .499  < .500
CENA OPOROW =    94.38
WYNIK KONCOWY UZYSKANO PO    15  KROKACH
```

Tablica 3

```
PRZYKLAD NR =      2
WSPOLCZYNNIKI WPLYWOW DLA WEZLA 1
POTENCJAL (PRZY ZNAMIONOWYCH WARTOSCIACH ELEMENTOW) V [1]= 2.0994@ 0
NUMERY REZYSTOROW W KOLEJNOSCI MALEJACYCH CZULOSCI WZGLEDNYCH:
   1  13   7   2   8   3   9   4  10   5
  11  12   6
KROK 0
OBLICZONE WARTOSCI TOLERANCJI OPOROW:
TOR [1]=   .155   TOR[13]=   .219   TOR [7]=   .311   TOR [ 2]=   .440   TOR [8]=   .621
TOR [3]=   .879   TOR[ 9]=  1.242   TOR [4]=  1.761   TOR[10]=  2.471   TOR [5]=  3.549
TOR[11]=  4.898   TOR[12]=  6.531   TOR [6]=  7.362
ZNORMALIZOWANY SZEREG TOLERANCJI
 TOL(PROC)   CENA(ZL)
   .2    17.20
   .5    10.70
  1.0     9.70
  2.0     9.10
  5.0     1.79
 10.0     1.28
 20.0     1.15
KROK 1
PRZYJETE ZNORMALIZOWANE WARTOSCI TOLERANCJI OPOROW:
TOR [1]=  .2    TOR[13]=  .2    TOR [7]=  .2    TOR [2]=  .2    TOR [8]=  .5
TOR [3]=  .5    TOR[ 9]= 1.0    TOR [4]= 1.0    TOR[10]= 2.0    TOR [5]= 2.0
TOR[11]= 2.0    TOR[12]= 5.0    TOR [6]= 5.0
TOL. OPOROW =  .308  < .348
CENA OPOROW =  140.48
OBNIZKA CENY PRZY ZMIANIE TOLERANCJI OPORU
Z Tol.  NA TOL.  OBNIZKA CENY(W ZL)
   2.00   5.00   7.31
    .20    .50   6.50
    .50   1.00   1.00
   1.00   2.00    .60
   5.00  10.00    .51
  10.00  20.00    .13
KROK =   2
ZMIANA   TOR[11]= 5.0
TOL. OPOROW = .310  < .348
K = 133.17
KROK   3
ZMIANA   TOR [5]= 5.0
TOL. OPOROW = .314  < .348
K = 125.86
KROK =   4
ZMIANA   TOR[10]= 5.0
TOL. OPOROW = .322  < .348
K = 118.55
KROK =   5
ZMIANA   TOR [2]=  .5
TOL. OPOROW = .347  < .348
K = 112.05
KROK =   9
ZMIANA   TOR [6]=10.0
TOL. OPOROW = .348  < .348
K = 111.54
KONCOWE WARTOSCI TOLERANCJI OPOROW:
TOR [1]=  .2    TOR [2]=  .5    TOR [3]=  .5    TOR [4]= 1.0    TOR [5]= 5.0
TOR [6]=10.0    TOR [7]=  .2    TOR [8]=  .5    TOR [9]= 1.0    TOR[10]= 5.0
TOR[11]= 5.0    TOR[12]= 5.0
TOR[13]=  .2    TOR[14]=25.0    TOR[15]=25.0    TOR[16]=25.0    TOR[17]=25.0    TOR[18]=25.0
TOR[19]=25.0
TOLERANCJA NAPIECIA V 1= .500  < .500
CENA OPOROW =  111.54
WYNIK KONCOWY UZYSKANO PO    11  KROKACH
```

Tablica 4

```
PRZYKŁAD NR =      3
WSPOLCZYNNIKI WPLYWOW DLA WEZLA 1
POTENCJAL (PRZY ZNAMIONOWYCH WARTOSCIACH ELEMENTOW) V [1]= 2.0994@ 0
NUMERY REZYSTOROW W KOLEJNOSCI MALEJACYCH CZULOSCI WZGLEDNYCH:
   1  13   7   2   8   3   9   4  10   5
  11  12   6
KROK 0
OBLICZONE WARTOSCI TOLERANCJI OPOROW:
TOR [ 1]=   .155   TOR[13]=   .219   TOR [7]=   .311   TOR [2]=   .440   TOR [8]=   .621
TOR [ 3]=   .879   TOR[ 9]=  1.242   TOR [4]=  1.761   TOR [10]=  2.471   TOR [5]=  3.549
TOR [11]=  4.898   TOR[12]=  6.531   TOR [6]=  7.362
ZNORMALIZOWANY SZEREG TOLERANCJI
 TOL(PROC)   CENA(ZL)
   2

   .5    40.00
  1.0    20.00
  2.0    10.00
  5.0     4.00
 10.0     2.00
 20.0     1.00
KROK  1
PRZYJETE ZNORMALIZOWANE WARTOSCI TOLERANCJI OPOROW:
TOR [1]=  .2   TOR[13]=  .2   TOR [7]=  .2   TOR [2]=  .2   TOR [8]=  .5
TOR [3]=  .5   TOR[ 9]= 1.0   TOR [4]= 1.0   TOR[10]= 2.0   TOR [5]= 2.0
TOR[11]= 2.0   TOR[12]= 5.0   TOR [6]= 5.0
TOL. OPOROW =  .308  <.348
CENA OPOROW =  558.00
OBNIZKA CENY  PRZY ZMIANIE TOLERANCJI OPORU
Z TOL.  NA TOL.  OBNIZKA CENY(W ZL)
     .20     .50  60.00
     .50    1.00  20.00
    1.00    2.00  10.00
    2.00    5.00   6.00
    5.00   10.00   2.00
   10.00   20.00   1.00
KROK =    2

ZMIANA   TOR [2]=   .5
TOL. OPOROW = .333   < .348
K = 498.00
KROK =    4
ZMIANA   TOR [3]= 1.0
TOL. OPOROW = .343 <.348
K = 478.00
KROK =    6
ZMIANA   TOR [4]= 2.0
TOL. OPOROW = .348  < .348
K = 468.00
KONCOWE WARTOSCI TOLERANCJI OPOROW:
TOR [ 1]=  .2   TOR [2]=  .5   TOR [3]= 1.0   TOR [4]= 2.0   TOR [ 5]= 2.0
TOR [ 6]= 5.0   TOR [7]=  .2   TOR [8]=  .5   TOR [9]= 1.0   TOR [10]= 2.0
TOR [11]= 2.0   TOR [12]= 5.0

TOR [13]=  .2   TOR [14]=25.0   TOR [15]=25.0   TOR [16]=25.0   TOR [17]=25.0   TOR [18]=25.0
TOR [19]=25.0
TOLERANCJA NAPIECIA V 1= .500 < .500
CENA OPOROW =  468.00
WYNIK KONCOWY UZYSKANO PO     9  KROKACH
```

LITERATURA

[1] GEHER K.: Theory of Network Tolerances. Akademiai Kiado,Budapest 197., pp. 93-96.

[2] HAMZA M.H., PRATER W.: Economical Optimization of Electrical Network Using Separable Programming, Proc. IEEE, March 1972, pp. 332-333.

[3] DIRECTOR S.W., ROHRER R.A.: A Generalized Adjoint Network and Network Sensitivities, IEEE Trans. on Circuit Theory, CT-16, Aug. 1969, pp. 330-336.

[4] CHOJCAN J., KARWAN L.: Program NAPS obliczania najbardziej niekorzystnych warunków pracy obwodów prądu stałego. Problemy projektowania obwodów elektrycznych przy zastosowaniu maszyn cyfrowych, PTETiS, Gliwice 1973, s. 115-117.

[5] CHOJCAN J., KARWAN L.: Metoda znajdowania najniekorzystniejszych warunków pracy obwodu: algorytm i zastosowanie, Automatyka, Z. 32, Gliwice, 1976, s. 45-53.

МЕТОД РАСЧЁТА ОПТИМАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ

Р е з ю м е

В статье представлено метод выбора распределений элементов, если поданы ограничения на выход, чтобы получить минимум стоимости цепей. Представлена облочная схема программы и численные примеры.

CALCULATION OF OPTIMAL TOLERANCE IN LINEAR NETWORK

S u m m a r y

The paper describes a method of selecting element's tolerance for minimal network cost if tolerance value of output is given. The paper also presents the algorithm and the programme diagram with examples.