

Andrzej KOLMER

ANALIZA LINIOWYCH OBWODÓW ELEKTRONICZNYCH  
(OPIS PROGRAMU ALIOBEL)

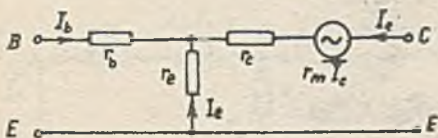
**Streszczenie.** Podano opis programu ALIOBEL przeznaczonego do małosygnalowej analizy liniowych układów elektronicznych, z wymuszeniami sinusoidalnymi. Przedstawiono zastosowany model tranzystora, metodę analizy i schemat blokowy programu. Opisano przykład praktycznego zastosowania programu.

Program ALIOBEL ( Analiza Liniowych Obwodów Elektronicznych) jest przeznaczony do analizy liniowych obwodów ze sterowanymi źródłami w stanie ustalonym, z wymuszeniami sinusoidalnymi.

## 1. Analiza programu ALIOBEL

### 1.1. Wybór modelu tranzystora

Przeprowadzając analizę układów elektronicznych należy przyjąć odpowiednie modele elementów (tranzystorów, diod). Model tranzystora zależy między innymi od stopnia dokładności analizy, zakresu rozpatrywanych częstotliwości i od wielkości sygnałów. Przyjmując, że tranzystor może być traktowany jako czwórnik liniowy, można do jego opisanja posłużyć się określeniem np. jego macierzy admitancyjnej lub hybrydowej. Schemat zastępczy uzyskany w oparciu o jeden z powyższych opisów wykazuje pewne wady przy zastosowaniu do analizy przeprowadzonej za pomocą maszyny cyfrowej, a mianowicie:



Rys. 1. Schemat zastępczy typu T tranzystora

a) wartości elementów schematu zastępczego zależą od układu połączeń tranzystora,

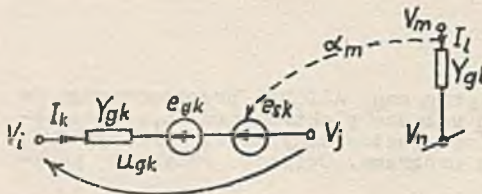
b) schematy zastępcze zawierają dwa źródła sterowane.

Wyżej wymienionych wad nie posiada schemat zastępczy tranzystora w postaci czwornika T, dlatego też został on zastosowany w programie (rys. 1).

Inne elementy (diody Zenera, tranzystory polowe) należy przedstawić w formie schematu zastępczego przed analizą na maszynie cyfrowej.

### 1.2. Metoda analizy obwodów elektronicznych zastosowana w programie ALIOBEL

Jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod układania równań obwodów elektronicznych jest metoda potencjałów węzłowych Coltriego. Metoda ta pozwala w prosty sposób przeprowadzić analizę obwodu.



Rys. 2. Gałąź zawierająca SEM sterowaną prądowo

W przypadku, gdy obwód elektryczny będzie zawierał źródło napięciowe sterowane prądowo, jego macierz admitancyjna nie będzie symetryczna i do wyznaczenia jej nie będzie można użyć metody Coltriego w znanej postaci. W celu określenia macierzy admitancyjnej obwodu rozpatrzmy jego k-tą gałąź (rys. 2).

W tym przypadku prąd w gałęzi równa się:

$$I_k = Y_{gk} \cdot u_{gk} - Y_{gk} \cdot e_{gk} - Y_{gk} \cdot e_{sk} = I'_k - I''_k,$$

gdzie:

$I'_k = Y_{gk} (u_{gk} - e_{gk})$  - składowa prądu gałęziowego, pochodząca od napięcia gałęziowego i SEM,

$I''_k = Y_{gk} \cdot e_{sk}$  - składowa prądu gałęziowego pochodząca od SEM sterowanej.

Odpowiednio, wektor prądów gałęziowych  $\underline{I}$  równa się:

$$\underline{I} = \underline{Y}_g \cdot \underline{u}_g - \underline{Y}_g \cdot \underline{e}_g - \underline{Y}_g \cdot \underline{e}_s \quad (1)$$

Prąd w gałęzi sterującej, przy założeniu, że  $e_{gl} = 0$  równa się:

$$I_l = Y_{gl} \cdot u_{gl}$$

Wobec tego:

$$e_{sk} = \alpha_m \cdot Y_{gl} \cdot u_{gl}$$

Określmy macierz sterowania  $\underline{\alpha}_s$  o wymiarach  $g \times g$  w sposób następujący:

$$\alpha_s(i, j) = \begin{cases} \pm \alpha_m & \text{- gdy "i" równa się numerowi gałęzi z m-tą SEM sterowaną oraz "j" równa się numerowi gałęzi sterującej} \\ 0 & \text{- w pozostałych przypadkach.} \end{cases}$$

Znak "+" przy współczynniku sterowania  $\alpha_m$  występuje wtedy, gdy zwroty SEM sterowanej i prądu w gałęzi sterującej mają kierunki zgodne. W przeciwnym przypadku występuje znak "-".

Za kierunek dodatni przyjęto zwrot:

- od węzła początkowego gałęzi dla prądów,
- do węzła początkowego gałęzi dla napięć i SEM.

Wtedy wektor SEM sterowanych  $\underline{e}_g$  można przedstawić w postaci:

$$\underline{e}_g = \underline{\alpha}_g \cdot \underline{Y}_g \cdot \underline{u}_g$$

Pisząc I prawo Kirchhoffa [1] w postaci:

$$-\underline{\beta} \cdot \underline{I} = 0$$

oraz wykorzystując [1] zależność:

$$\underline{u}_g = \underline{\beta}^T \cdot \underline{V},$$

gdzie:

$\underline{V}$  - wektor potencjałów węzłowych obwodu,

$\underline{\beta}$  - macierz łącząca węzłowa,

otrzymamy pod podstawieniem do (1):

$$-\underline{\beta} \cdot \underline{Y}_g \cdot \underline{\beta}^T \cdot \underline{V} + \underline{\beta} \underline{Y}_g \cdot \underline{e}_g + \underline{\beta} \cdot \underline{Y}_g \cdot \underline{\alpha}_g \cdot \underline{Y}_g \cdot \underline{\beta}^T \cdot \underline{V} = 0$$

skąd po przekształceniu:

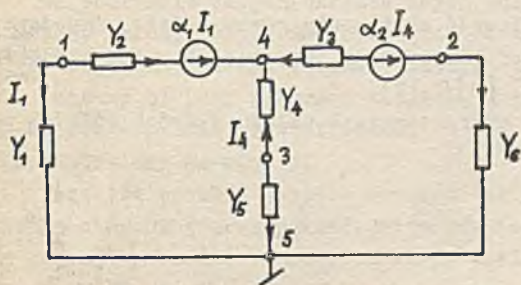
$$\underline{J} = \underline{\beta} \cdot \underline{Y}_g \cdot (1 - \underline{\alpha}_g \cdot \underline{Y}_g) \cdot \underline{\beta}^T \cdot \underline{V} \quad (2)$$

Porównując równanie (2) z równaniem potencjałów węzłowych [1]:

$$\underline{J} = \underline{Y} \cdot \underline{V}$$

otrzymujemy macierz admittancyjną obwodu ze źródłami sterowanymi prądowo w postaci:

$$\underline{Y} = \underline{\beta} \cdot \underline{Y}_g \cdot (1 - \underline{\alpha}_g \cdot \underline{Y}_g) \cdot \underline{\beta}^T \quad (3)$$



Rys. 3. Obwód zawierający SEM sterowane prądowo

Dla przykładu określimy macierz admitancyjną obwodu (rys. 3). Dla tego przypadku:

$$\underline{\alpha}_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \underline{Y}_g = \begin{bmatrix} Y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_6 \end{bmatrix} \quad \underline{\beta} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Podstawiając do równania (3) te macierze, otrzymamy macierz admitancyjną obwodu w postaci:

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 + Y_2 + \alpha_1 Y_1 Y_2 & 0 & 0 & -Y_2 \\ 0 & Y_3 + Y_6 & -\alpha_2 Y_3 Y_4 & -Y_3 - \alpha_2 Y_3 Y_4 \\ 0 & 0 & Y_4 + Y_5 & -Y_4 \\ -Y_2 - \alpha_1 Y_1 Y_2 & -Y_3 & -Y_4 + \alpha_2 Y_3 Y_4 & Y_2 + Y_3 + Y_4 - \alpha_2 Y_3 Y_4 \end{bmatrix}$$

### 1.3. Zakres obliczeń realizowanych przez program ALIOBEL

Program ALIOBEL służy do przeprowadzenia dla dowolnego liniowego układu elektronicznego następujących obliczeń:

- wzmocnienia napięciowego w skali liniowej i logarytmicznej,
- wzmocnienia prądowego w skali liniowej i logarytmicznej,
- wzmocnienia mocy w skali logarytmicznej,
- impedancji wejściowej,
- impedancji wyjściowej.

W wersji skróconej program pozwala na obliczenie wzmocnienia napięciowego układu.

W programie nie istnieje możliwość obliczenia równocześnie impedancji wejściowej i wyjściowej. Wartości rezystancji, pojemności, indukcyjności i SEM należy podawać w  $[\Omega]$ ,  $[F]$ ,  $[H]$  i  $[V]$ .

Program umożliwia obliczenie charakterystyk układu w dwóch różnych pasmach częstotliwości.

## 2. Opis programu ALIOBEL

### 2.1. Schemat blokowy programu

W programie w pierwszej kolejności wprowadza się do pamięci operacyjnej dane, dotyczące topologii i wartości elementów obwodu. Następnie na podstawie danych, określających parametry i sposób podłączenia tranzystorów, program tworzy ich schematy zastępcze. Ze wzoru (3) wynika, że macierz admitancyjną  $\underline{Y}$  obwodu można przedstawić w postaci:

$$\underline{Y} = \underline{Y}' - \underline{Y}''$$

gdzie:

$$\underline{Y}' = \underline{\beta} \cdot \underline{Y}_g \cdot \underline{\beta}^T \quad - \text{macierz admitancyjna obwodu bez źródeł sterowanych (mająca źródła zwarte),}$$

$$\underline{Y}'' = \underline{\beta} \cdot \underline{Y}_g \cdot \underline{\alpha}_g \cdot \underline{Y}_g \cdot \underline{\beta}^T \quad - \text{macierz admitancyjna uwzględniająca źródła sterowane.}$$

Elementy macierzy  $\underline{Y}'$ , jak również wektora  $\underline{J}$ , są obliczone według algorytmu, który został opisany w [2].

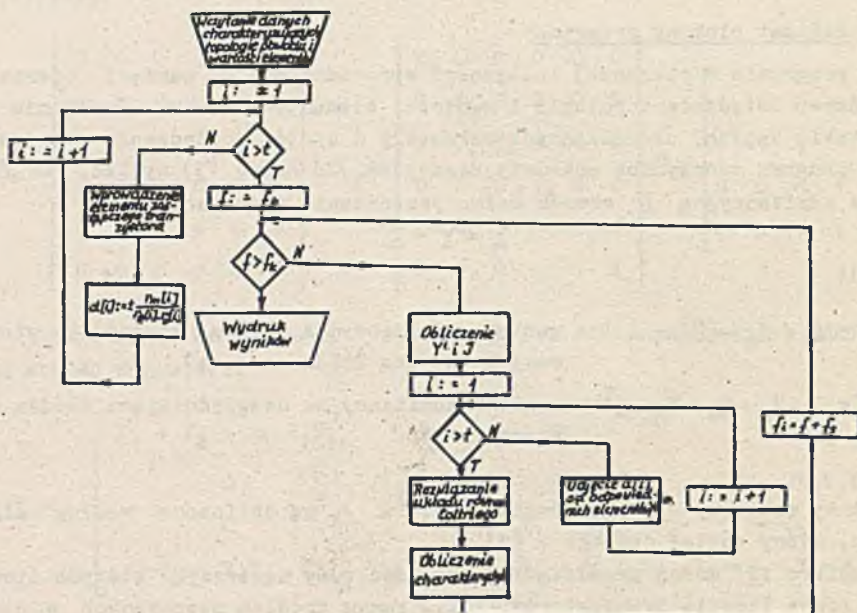
Macierz  $\underline{Y}''$  można przedstawić w postaci sumy macierzy, których liczba jest równa liczbie tranzystorów, a tym samym źródłem sterowanych w obwodzie. Każda macierz, będąca składnikiem tej sumy, posiada liczbę elementów niezerowanych wynoszącą 2 lub 4 zależnie od układu połączeń tranzystora i są one sobie równe co do wartości bezwzględnej. Dlatego też dla zapamiętania wartości elementów niezerowych poszczególnych macierzy tworzy się wektor  $\underline{d}$  o wymiarze równym liczbie tranzystorów, którego wartości elementów wynoszą zgodnie z równaniem (3):

$$d[i] = \pm \frac{r_m[i]}{r_e[i] \cdot r_c[i]}$$

Na podstawie danych określających węzły obwodu, do których został podłączony tranzystor, można określić, od których elementów macierzy  $\underline{Y}'$  należy odjąć odpowiedni element wektora  $\underline{d}$ .

Schemat blokowy programu ALIOBEL, analizujący obwód, zawierający  $t$  tranzystorów w paśmie częstotliwości od  $f_p$  do  $f_k$  z krokiem  $f_g$  został przedstawiony na rys. 4.

Ponieważ problem analizy obwodów dał się rozbić na części, z których każda stanowi zwartą całość, więc również sam program będzie składał się z szeregu procedur, z których każda spełnia określoną funkcję.



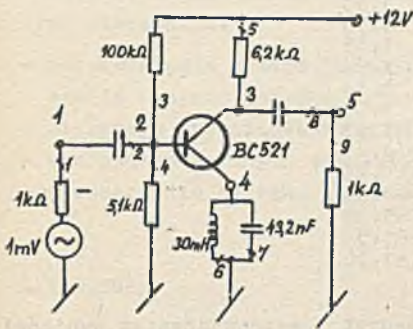
Rys. 4. Schemat blokowy programu ALIOBEL

I tak procedura:

- "modyf" - wprowadza schematy zastępcze tranzystorów,
- "macierz" - oblicza współczynniki macierzy admitancyjnej i wyrazów wolnych w oparciu o zmodyfikowany algorytm Coltriego,
- "celine G" - rozwiązuje układ równań Coltriego w oparciu o metodę eliminacji Gaussa z wyborem elementów podstawowych (procedura biblioteczna),
- "chka" - oblicza i drukuje charakterystyki obwodu.

## 2.2. Przykład zastosowania programu ALIOBEL

Dla układu elektronicznego przedstawionego na rys. 5 należy określić amplitudową charakterystykę częstotliwościową wzmocnienia napięciowego w paśmie częstotliwości od 4200 Hz do 440 Hz co 10 Hz i od 4420 Hz do 4500 Hz co 20 Hz.



Rys. 5. Wzmacniacz selektywny środkowo-zaporowy LC

Dane wprowadzone do maszyny cyfrowej mają następującą postać:

5,9,1,4200,10,4400,4420,20,4500,1,5,1,9,  
 1,0,1,0<sub>10</sub><sup>3</sup>,.0,.0, 1,0<sub>10</sub><sup>-3</sup>,  
 2,1,.0,.0,1,0<sub>10</sub><sup>-5</sup>,.0,  
 2,0,1,0<sub>10</sub><sup>5</sup>,.0,.0,.0,  
 2,0,5,1<sub>10</sub><sup>3</sup>,.0,.0,.0,  
 3,0,6,2<sub>10</sub><sup>3</sup>,.0,.0,.0,  
 4,0,.0,3,0<sub>10</sub><sup>-2</sup>,.0,.0,  
 4,0,.0,.0,4,3,2<sub>10</sub><sup>-9</sup>,.0,  
 5,3,.0,.0,1,0<sub>10</sub><sup>-5</sup>,.0,  
 5,0,1,0<sub>10</sub><sup>3</sup>,.0,.0,.0,  
 2,3,4,  
 1,5<sub>10</sub><sup>3</sup>,5,0<sub>10</sub><sup>-4</sup>,5,0<sub>10</sub><sup>1</sup>,5,0<sub>10</sub><sup>-5</sup>

W wierszu pierwszym kolejne cyfry określają:

- 5 - liczbę węzłów w obwodzie,
- 9 - liczbę gałęzi w obwodzie,
- 1 - liczbę tranzystorów w obwodzie,
- 4200, 4400, 4420 i 4500 - granice rozpatrywanych pasm częstotliwości,
- 10 i 20 - krok w paśmie,
- 1 - numer węzła wejściowego,
- 5 - numer węzła wyjściowego,
- 1 - numer gałęzi wejściowej,
- 9 - numer gałęzi wyjściowej.

Kolejnych 9 wierszy charakteryzuje poszczególne gałęzie obwodu, w których poszczególne liczby oznaczają:

- numer węzła początkowego,
- numer węzła końcowego,
- wartość rezystancji, indukcyjności, pojemności i SEM gałęzi.

Przedostatni wiersz określa numer węzła bazy, kolektora i emitera tranzystora. Ostatni wiersz podaje parametry macierzy hybrydowej tranzystora.

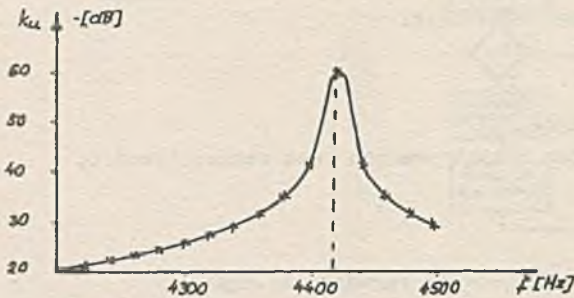
Wyniki uzyskane z maszyny cyfrowej mają następującą postać:

charakterystyki	obwodu	elektronicznego	
f	ku	fi	
	ku [dB]		
4200	1.04 <sub>10</sub> <sup>-1</sup>	-20	1.57
4210	9.89 <sub>10</sub> <sup>-2</sup>	-21	1.57
4220	9.41 <sub>10</sub> <sup>-2</sup>	-21	1.57
4230	8.93 <sub>10</sub> <sup>-2</sup>	-21	1.57
4240	8.46 <sub>10</sub> <sup>-2</sup>	-22	1.57
4250	7.98 <sub>10</sub> <sup>-2</sup>	-22	1.56
4260	7.50 <sub>10</sub> <sup>-2</sup>	-23	1.56
4270	7.03 <sub>10</sub> <sup>-2</sup>	-24	1.56
4280	6.56 <sub>10</sub> <sup>-2</sup>	-24	1.56
4290	6.08 <sub>10</sub> <sup>-2</sup>	-25	1.56
4300	5.61 <sub>10</sub> <sup>-2</sup>	-26	1.56
4310	5.14 <sub>10</sub> <sup>-2</sup>	-26	1.56
4320	4.67 <sub>10</sub> <sup>-2</sup>	-27	1.56

4330	4.21	$10^{-2}$	-28	1.55
4340	3.74	$10^{-2}$	-29	1.55
4350	3.27	$10^{-2}$	-30	1.55
4360	2.81	$10^{-2}$	-32	1.54
4370	2.35	$10^{-2}$	-33	1.54
4380	1.89	$10^{-2}$	-35	1.53
4390	1.42	$10^{-2}$	-37	1.51
4400	9.65	$10^{-3}$	-41	1.49
4420	9.53	$10^{-4}$	-61	.49
4440	8.73	$10^{-3}$	-42	-1.47
4460	1.78	$10^{-2}$	-35	-1.52
4480	2.68	$10^{-2}$	-32	-1.54
4500	3.58	$10^{-2}$	-29	-1.55

Czas obliczeń (łącznie z wprowadzeniem danych i wyprowadzeniem wyników) wyniósł 88 sek.

Z otrzymanych wyników sporządzono wykres przedstawiony na rys. 6.



Rys. 6

Dokładność obliczeń wykonywanych programem ALIOBEL zależy od dokładności rozwiązania układu równań Coltriego. Ponieważ do jego rozwiązania użyto metody eliminacji Gaussa, więc w przypadku obwodów, dla których macierz admitancyjna jest rzadka i źle uwarunkowana wyniki mogą być obciążone znacznymi błędami.

### 2.3. Charakterystyka programu ALIOBEL

Ze schematu blokowego programu wynika, że składa się on z pewnej liczby segmentów. Było to zaletą programu przy jego uruchomieniu i testowaniu. Oprócz tego segmentacja programu daje możliwość jego łatwego rozszerzenia i modyfikacji.

Program ALIOBEL znajduje zastosowanie nie tylko do analizy liniowych układów elektronicznych, ale może też okazać się pożyteczny przy projektowaniu, gdyż umożliwia:

- zdejmowanie charakterystyki układu,
- określenie wpływu zmian wartości elementów obwodu na przebieg charakterystyk,
- obliczenie impedancji wejściowej i wyjściowej układu,
- wybór optymalnej wartości danego elementu z punktu widzenia określonej właściwości układu,
- określenie wpływu zmian napięcia zasilania na właściwości układu.



Dalsze ulepszenia i modyfikacje programu będą zmierzały w następujących kierunkach:

- udoskonalenia samego procesu obliczeń (skrócenia czasu obliczeń, zmniejszenia obszaru pamięci zajmowanej przez program itp.),
- większego zróżnicowania modeli tranzystorów,
- wprowadzenia innych elementów,
- rozszerzenia zakresu zastosowania programu.

#### LITERATURA

- [1] Kurzawa S.: Liniowe obwody elektryczne. PWN W-wa 1974 r.
- [2] Chojcan J.: Analiza liniowych obwodów prądu stałego (program ALINIES) Skrypt Pol. Śl. Nr 385, Gliwice 1972 r.
- [3] Kolmer A.: Analiza liniowych obwodów ze sterowanymi źródłami (praca dyplomowa), Gliwice 1973 r.

#### АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ (ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ АЛИОБЭЛЬ)

#### Резюме

Проведено описание программы АЛИОБЭЛЬ для анализа линейных электронных схем с синусоидальными сигналами в динамическом режиме. Представлена модель транзистора, метод анализа и блок-схема программы. Показан пример практического использования программы.

#### THE ANALYSIS OF THE LINEAR ELECTRONIC CIRCUITS (THE DESCRIPTION OF THE ROUTINE ALIOBEL)

#### Summary

The description of the routine ALIOBEL for the analysis of linear electronic circuits with sinusoidal signals in the dynamic state has been given. The applied transistor model, the method of analysis and the block-diagram of the routine were presented. Finally an example for the practical application of routine was described.