

Henryk ROMANOWSKI

PROGRAM ANALIZY LINIOWYCH OBWODÓW PRĄDU ZMIENNEGO
NA MASZYNIE CYFROWEJ

Streszczenie. W artykule omówiono sposób analizy liniowych obwodów prądu zmiennego przy sinusoidalnych wymuszeniach w stanie ustalonym.

Omówiono program na maszynę cyfrową oraz podano przykłady zastosowania tego programu do analizy filtru oraz wzmacniacza tranzystorowego.

W pracy przedstawiony zostanie program ALIZ-1, napisany w języku ALGOL 1204, umożliwiający analizę liniowych obwodów prądu zmiennego przy sinusoidalnych wymuszeniach w stanie ustalonym.

1. Dane techniczne programu

Program ALIZ-1 przeznaczony jest dla m.c. ODRA 1204 z zestawem bębnowym. Programem tym można analizować obwody, dla których spełnione będą następujące nierówności:

$$4w^2 + 45w + 25g + 16ltr \leq 5883$$

$$g + w + 3ltr \leq 150,$$

gdzie:

- g - liczba gałęzi obwodu (dopuszczalne gałęzie przedstawiono na rys. 1),
- w - liczba węzłów obwodu,
- ltr - liczba tranzystorów w obwodzie.

Ograniczenia te wynikają ze względu na:

- wielkość pamięci operacyjnej m.c. ODRA 1204,
- rezerwację pamięci w programie ALIZ-1.

Orientacyjny czas analizy obwodu składającego się z 80 gałęzi, 25 węzłów, 5 tranzystorów wynosi 5 minut.

2. Metoda analizy

Do obliczeń zastosowano uogólnioną metodę macierzową Sigorskiego w wersji admitancyjnej [1, 2, 3, 4, 8]. W pierwszym etapie określono współczynn-

niki macierzy admitancyjnej dla układu nie zawierającego tranzystorów oraz oddzielnie dla tranzystorów.

Dla części obwodu nie zawierającej tranzystorów możliwe jest określenie współczynników macierzy admitancyjnej po zastąpieniu:

- każdej gałęzi o zerowej impedancji dwiema gałęziami o opornościach $+sr$ oraz $-sr$,
- gałęzi z idealną SEM przez dwie gałęzie: jedną z SEM i opornością $+sr$ oraz drugą z opornością $-sr$,
- szeregową gałęzi rezonansowej LC przez dwie gałęzie o opornościach $+sr$ oraz $-sr$,

gdzie:

sr - średnia wartość modułów impedancji wszystkich gałęzi obwodu.

Impedancja Z każdej z wymienionych wyżej gałęzi, przed taką modyfikacją, była równa zero czyli admitancja $Y = \infty$. Fakt ten uniemożliwiał określenie współczynników macierzy admitancyjnej dla całego obwodu. Poprzez modyfikację wyznaczanie tych współczynników staje się możliwe, ale pociąga za sobą wzrost liczby węzłów i gałęzi o 1 przy modyfikowaniu każdej z trzech wymienionych gałęzi [3, 6, 7]. W programie ograniczono liczbę modyfikowanych gałęzi do 5.

Dla części obwodu nie zawierającej tranzystorów określone są w prosty sposób współczynniki macierzy admitancyjnej \underline{Y}_g , dla której to zachodzi zależność

$$\underline{Y}_g = \text{Re}\underline{Y}_g + j \text{Im}\underline{Y}_g \quad (1)$$

W programie tym tranzystor rozpatrywany jest jako wielobiegunnik (trójnik). Dla każdego z tranzystorów określana jest macierz uogólniona

$$\underline{Y}_{t_i} = \text{Re}\underline{Y}_{t_i} + j \text{Im}\underline{Y}_{t_i} \quad (i = 1 \div ltr), \quad (2)$$

gdzie:

ltr - liczba tranzystorów w układzie.

Dla tranzystora macierz czwórnikowa w układzie OE ma postać

$$\underline{y}_e = \begin{bmatrix} y_{11e} & y_{12e} \\ y_{21e} & y_{22e} \end{bmatrix} \quad (3)$$

i dlatego też macierz uogólniona ReYt_i ma postać

$$\text{ReYt}_i = \begin{matrix} & \begin{matrix} B & C & E \end{matrix} \\ \begin{matrix} B \\ C \\ E \end{matrix} & \begin{bmatrix} R_e(y_{11e_i}), & \text{Re}(y_{12e_i}), & -\text{Re}(y_{11e_i} + y_{12e_i}), \\ \text{Re}(y_{12e_i}), & \text{Re}(y_{22e_i}), & -\text{Re}(y_{12e_i} + y_{22e_i}), \\ -\text{Re}(y_{11e_i} + y_{21e_i}), & -\text{Re}(y_{12e_i} + y_{22e_i}), & \text{Re}(y_{11e_i} + y_{12e_i} + \\ & & + y_{21e_i} + y_{22e_i}) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

W podobny sposób można przedstawić macierz ImYt_i jako macierz składowych urojonych macierzy zespolonej Yt_i .

Całkowitą macierz admitancji \underline{Y} analizowanego obwodu uzyskuje się przez sumowanie wyrazów macierzy \underline{Yg} oraz wyrazów macierzy \underline{Yt}_i ($i = 1 \div ltr$) przy uwzględnieniu jednolitej numeracji węzłów.

Dla macierzy \underline{Y} analizowanego obwodu zachodzi związek

$$\underline{Y} = \underline{\text{ReY}} + j\underline{\text{ImY}} \quad (5)$$

oraz

$$\underline{Y} \underline{V} = \underline{Jw}, \quad (6)$$

gdzie:

\underline{Jw} - wektor prądów węzłowych,

\underline{V} - wektor potencjałów węzłowych,

$$\underline{V} = \underline{\text{ReV}} + j\underline{\text{ImV}}; \quad \underline{Jw} = \underline{\text{ReJw}} + j\underline{\text{ImJw}}$$

Po rozwiązaniu równania macierzowego (6) wyznaczono potencjały węzłowe wszystkich węzłów obwodu. Znając wartości potencjałów węzłowych w prosty sposób można określić prądy w gałęziach.

Korzystając z poniższej zależności opisującej tranzystor (trójkąt) można wyznaczyć prądy tranzystora

$$\underline{Jt}_i = \underline{Yt}_i \underline{V}_i, \quad (7)$$

gdzie:

\underline{V}_i - macierz zespolona potencjałów: bazy, kolektora i emitera i-tego tranzystora,

\underline{Jt}_i - macierz zespolona prądów i-tego tranzystora.

3. Możliwości programu

Analizowany obwód może zawierać następujące elementy:

- siły elektromotoryczne,
- siły prądomotoryczne,
- tranzystory,
- oporności,
- indukcyjności bez sprzężeń,
- pojemności.

W obwodzie dopuszczalne są gałęzie przedstawione na rys. 1.

Program umożliwia wyznaczenie wartości:

- a) potencjałów węzłowych,
- b) prądów w gałęziach,
- c) prądów w tranzystorach,
- d) mocy czynnych wydawanych przez źródła,
- e) mocy traconych na opornościach obwodu.

Dopuszczalna jest również analiza obwodu przy jednoczesnej zmianie wielu jego parametrów np.: jednoczesnej zmianie wartości parametrów kilku gałęzi i zmianie wartości parametrów tranzystora.

Program ten umożliwia również analizę obwodu przy zmianie ze skokiem liniowym jednego dowolnie wybranego parametru obwodu. W zależności od danych oraz od klawiszy wciśniętych na czas obliczeń wynikami mogą być wartości wielkości zawartych w punktach a + e podane w postaci numerycznej lub też wartości wielkości zawartych w punktach a,b,c podane w postaci graficznej (wykres rodziny funkcji składającej się ze zbioru punktów). Każda gałąź scharakteryzowana jest przez podanie:

- numeru gałęzi,
- numeru węzła początkowego,
- numeru węzła końcowego,
- kodu gałęzi,
- liczb określających wartości parametrów gałęzi.

W programie dopuszczono model tranzystora wynikający z małosygnałowych parametrów macierzy admitancji tranzystora pracującego w układzie wspólnego emitera (rys. 2).

Dla tak przyjętego modelu tranzystora oprócz liczb całkowitych określających:

- numer tranzystora,
- numery węzłów, do których dołączona jest: baza, kolektor i emiter tranzystora,
- model tranzystora (model przedstawiony na rys. 3 przyjęto oznaczać modelem 1),

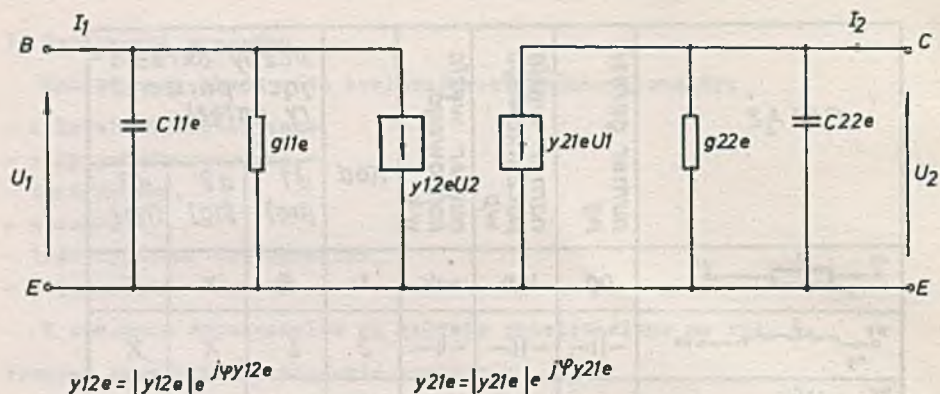
GAŁĄŹ	numer gałęzi ng	numer węzła początkowego wp	numer węzła końcowego wk	Kod	liczby określa- jące paramet- ry gałęzi		
					$d1$ [ng]	$d2$ [ng]	$d3$ [ng]
	ng	wp	wk	1	R	X	X
	- -	- -	- -	2	L	X	X
	- -	- -	- -	3	C	X	X
	- -	- -	- -	12	R	L	X
	- -	- -	- -	13	R	C	X
	- -	- -	- -	23	L	C	X
	- -	- -	- -	123	R	L	C
	- -	- -	- -	4	E	φ	X
	- -	- -	- -	41	E	φ	R
	- -	- -	- -	5	I	φ	X
	- -	- -	- -	51	I	φ	R

Znak „x” oznacza, że danej tej nie należy podawać.

Jednostki:

R	Ω
L	H
C	F
E	V
I	A
φ	w stopniach

Rys. 1. Dopuszczalne gałęzie



Rys. 2. Model tranzystora

należy również podać wartości następujących parametrów: g_{11e} , c_{11e} , $|y_{12e}|$, φy_{12e} , $|y_{21e}|$, φy_{21e} , g_{22e} , c_{22e} .

4. Schemat blokowy programu

Schemat blokowy programu ALIZ-1 przedstawiono na rys. 3a i 3b.

Początkowe fragmenty programu dotyczą czytania danych wejściowych. Dane dotyczące wczytywanych tranzystorów umieszczone są w pamięci bębnowej, natomiast pozostałe dane w pamięci operacyjnej. Po modyfikacji obwodu do postaci umożliwiającej określenie współczynników macierzy admitancyjnej wyznaczone są współczynniki macierzy \underline{Y} i \underline{Jw} . Po rozwiązaniu układu równań $\underline{Y} \underline{V} = \underline{Jw}$ o współczynnikach zespolonych wyznaczone zostaną wartości potencjałów węzłowych wszystkich węzłów obwodu. W przypadku, gdy zachodzi potrzeba analizy obwodu przy jednoczesnej zmianie wielu parametrów obwodu następuje powrót do początku programu, wczytywane są dodatkowe dane i przeprowadzana jest ponowna analiza obwodu.

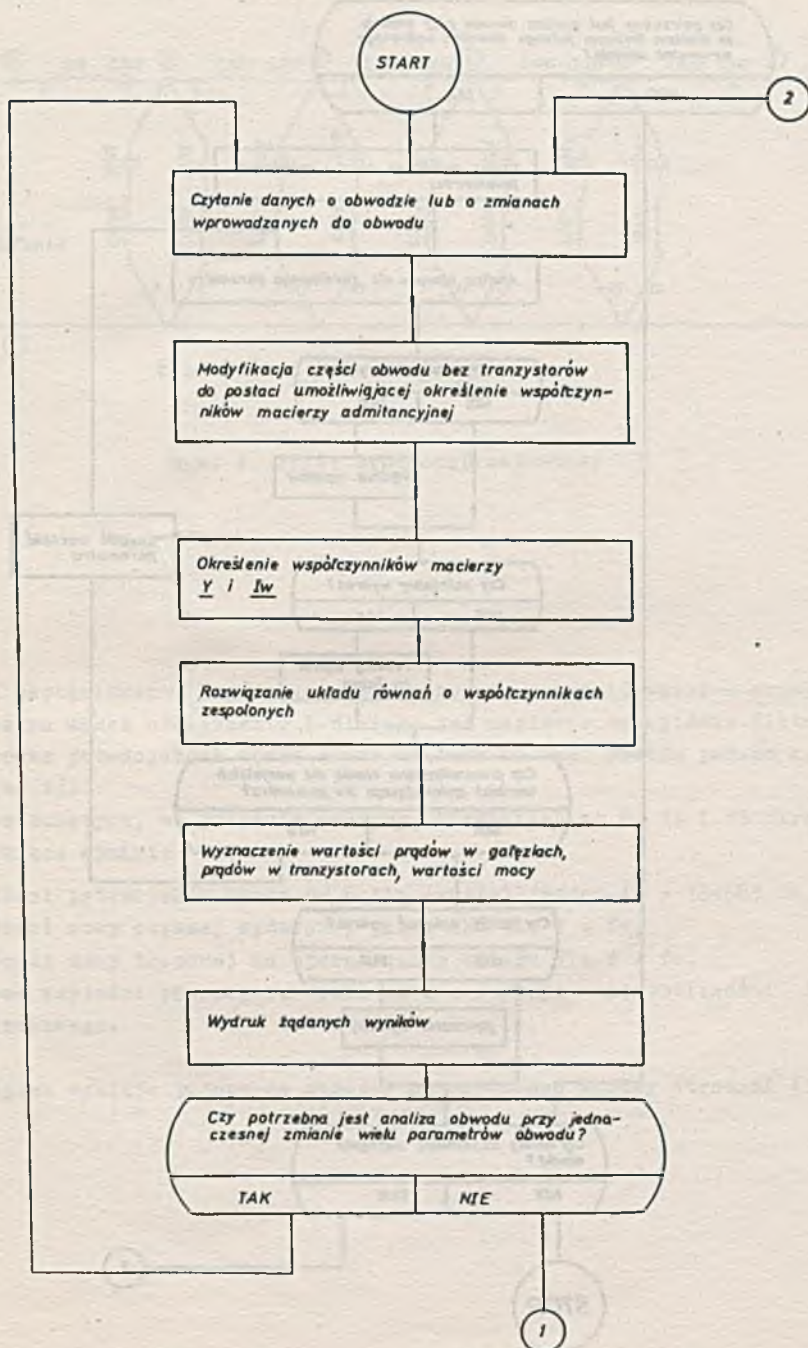
W przypadku gdy potrzebna jest analiza obwodu przy zmianie ze skokiem liniowym jednego dowolnie wybranego parametru obwodu następuje wczytanie dodatkowych danych. Dla każdej z możliwych wartości parametru ulegającego zmianie analizowany jest obwód i w zależności od żądań drukowane są wyniki obliczeń w postaci wartości liczbowych lub też po skończeniu analizy obwodu dla wszystkich wartości przedstawione są wyniki obliczeń w postaci graficznej (wykres rodziny funkcji).

5. Przykłady

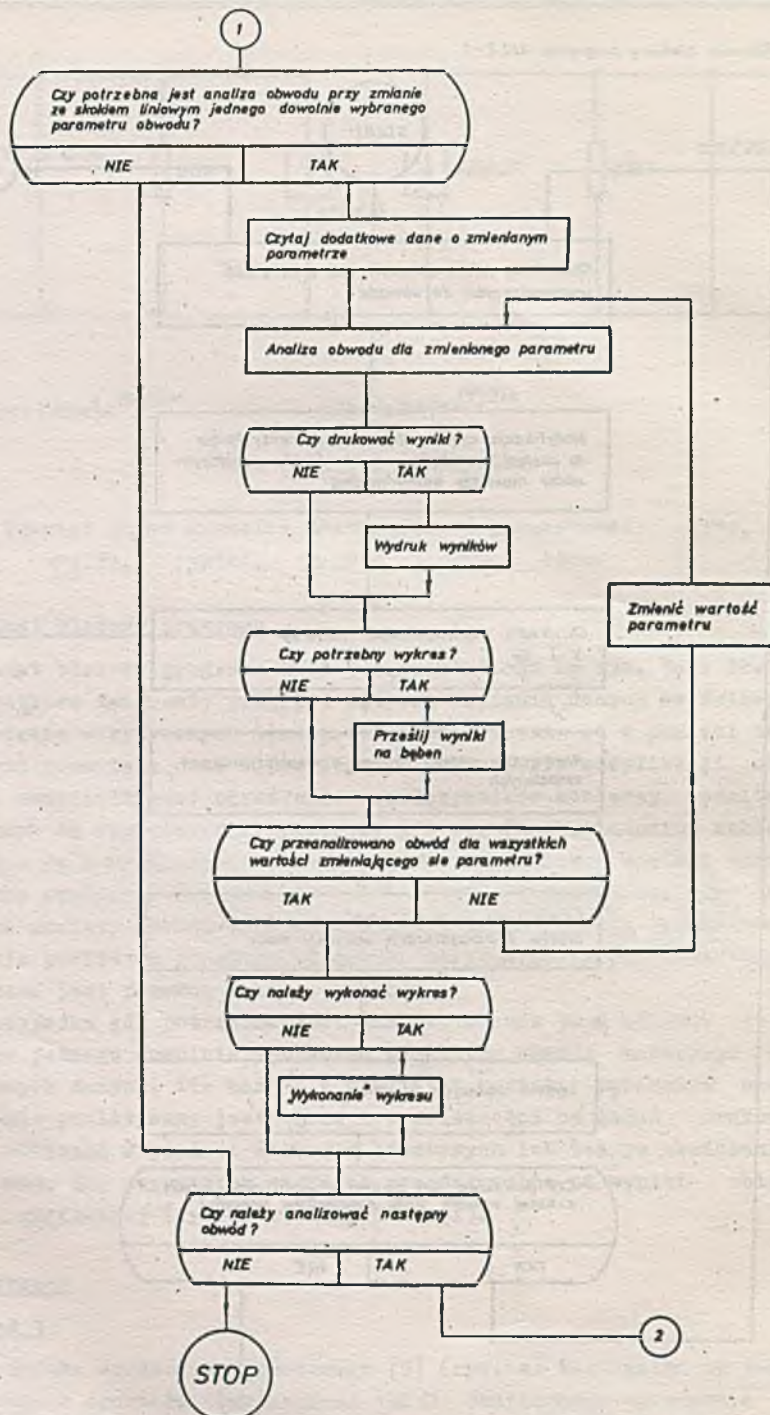
Przykład 1

Dla źródła środkowoprzepustowego [5] (rys. 4) zasilanego ze źródła napięciowego o oporności wewnętrznej 150Ω obciążonego opornością 150Ω należy wyznaczyć przebieg napięcia na wyjściu w funkcji częstotliwości

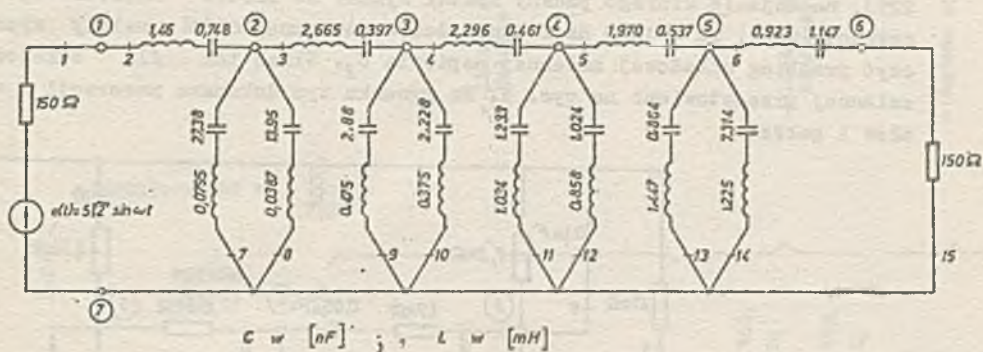
Schemat blokowy programu ALIZ-1



Rys. 3a. Schemat blokowy programu ALIZ-1



Rys. 3b. C.d. schematu blokowego programu ALIZ-1



Rys. 4. Filtr środkowoprzepustowy

źródła napięciowego. W programie tym przyjęto oznaczać węzeł o najwyższym numerze za węzeł odniesienia i dlatego też napięcie na wyjściu filtru będzie równe potencjałowi węzła numer 6. Dane do tego obwodu podano na str. 41 (Dane 1).

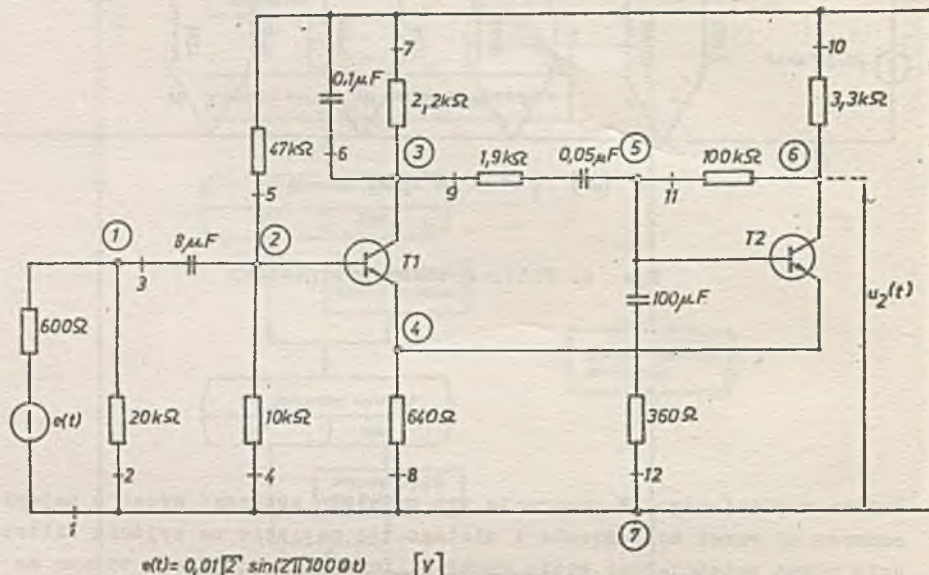
Przy wciśniętych, na pulpicie maszyny, klawiszach nr 6, 14 i 15 otrzymano następujące wyniki:

- wartości potencjałów węzła nr 6 dla częstotliwości $f_0 = 154685 \text{ Hz}$,
- wartości mocy czynnej wydawanej przez SEM dla $f = f_0$,
- wartości mocy traconej na opornościach układu dla $f = f_0$,
- wykres wartości potencjału węzła nr 6 w funkcji częstotliwości źródła napięciowego.

Tabulogram wyników podano na wkładce umieszczonej między stronami 42 a 43.

Przykład 2

Dla tranzystorowego wzmacniacza selektywnego z mostkiem Wiena ([1] s. 225), na wejście którego podany został sygnał ze źródła napięciowego o częstotliwości $f_0 = 1000$ Hz i oporności wewnętrznej 600Ω należy wyznaczyć przebieg składowej zmiennej napięcia U_2 . Układ ten dla składowej zmiennej przedstawiono na rys. 5. Na rysunku tym dokonano numeracji węzłów i gałęzi.



Rys. 5. Schemat dla składowej zmiennej tranzystorowego wzmacniacza selektywnego z mostkiem Wiena

Wartości parametrów tranzystorów T1 i T2:

$$y_{11e} = 0,077 \text{ mS}, \quad y_{12e} = -14,77 \text{ nS},$$

$$y_{21e} = 10,15 \text{ mS}, \quad y_{22e} = 0,6907 \text{ }\mu\text{S}.$$

Żądając wydruku wartości:

- wszystkich potencjałów węzłowych,
- wszystkich prądów przewodowych,
- wszystkich prądów tranzystorów T1 i T2

dane dotyczące tego obwodu [podano na str. 41 (Dane 2).

Dane 2

1, 15, 0, 7, 154685,
1, 1, 7, 41, 5, 0, 150,
2, 1, 2, 23, 1.416_{w-3}, .748_{w-9},
3, 2, 3, 23, 2.665_{w-3}, .397_{w-9},
4, 3, 4, 23, 2.296_{w-3}, .461_{w-9},
5, 4, 5, 23, 1.970_{w-3}, .537_{w-9},
6, 5, 6, 23, .923_{w-3}, 1.147_{w-9},
7, 2, 7, 23, .0759_{w-3}, 27.38_{w-9},
8, 2, 7, 23, .0387_{w-3}, 13.95_{w-9},
9, 3, 7, 23, .475_{w-3}, 2.88_{w-9},
10, 3, 7, 23, .367_{w-3}, 2.228_{w-9},
11, 4, 7, 23, 1.034_{w-3}, 1.233_{w-9},
12, 4, 7, 23, .858_{w-3}, 1.024_{w-9},
13, 5, 7, 23, 1.447_{w-3}, .864_{w-9},
14, 5, 7, 23, 1.225_{w-3}, 7.314_{w-9},
15, 6, 7, 1, 150,
0,
0,
1, 6,
7,
250, 142000, 145001,
100, 145100, 146201,
250, 146250, 147501,
500, 148000, 161501,
250, 161750, 163501,
100, 163600, 165201,
250, 165250, 168001,
0,

dane dotyczące obwodu
 podstawowego oraz
 żądanych wyników

zmiana częstotliwości

przedziały zmian
częstotliwości
(krok, wartość
początkowa, wartość
końcowa)

koniec zmian

- rr obwodu -

- l1czba
ga2qzi

liczba
transystorów

- liczba
węzłów

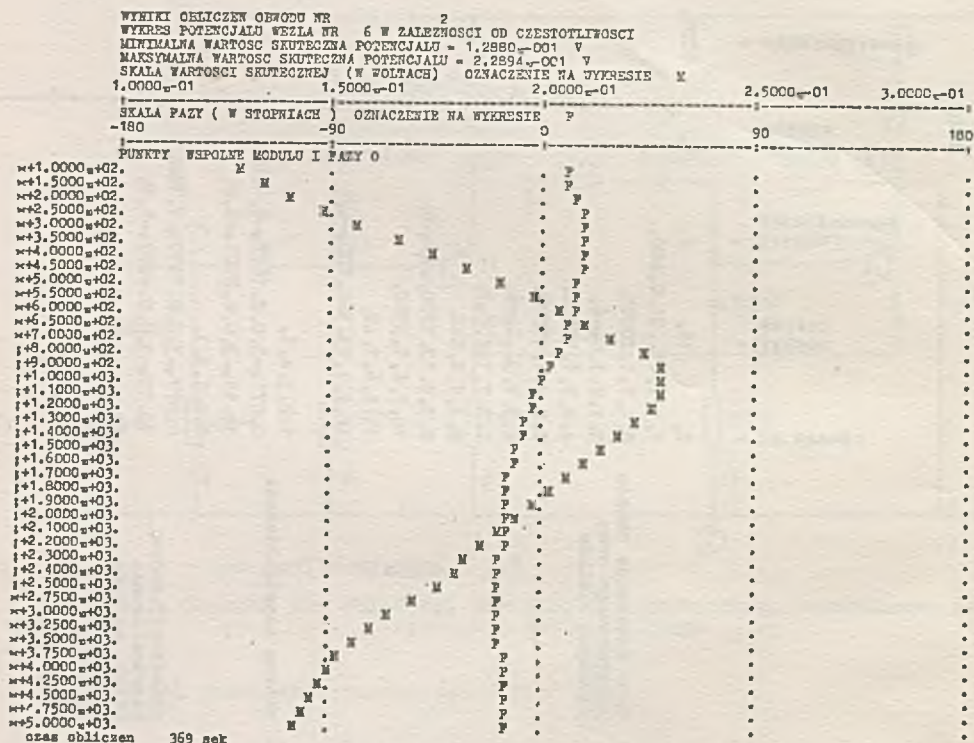
- argntotl1w06

2,	2,	2,	7,	1000,
1, 1, 7, 41, .01, 0, 600,			}	
2, 1, 7, 1, 20000,				
3, 1, 2, 3, 8 w-6,				
4, 2, 7, 1, 10000,				
5, 2, 7, 1, 47000,				
6, 3, 7, 3, .1 w-6,				
7, 3, 7, 1, 2.2 w3,				
8, 4, 7, 1, 640,				
9, 3, 5, 13, 1300, .05 w-6,				
10, 7, 6, 1, 3300,				
11, 5, 6, 1, w5,				
12, 5, 7, 13, 360, 100 w-6,				
1, 2, 3, 4, 1,			}	
0.077 w-3, 0, 0, 1477 w-7, 180,				
10, 15 w-3, 0, 0, 6907 w-6, 0,				
2, 5, 6, 4, 1,				
0.077 w-3, 0, 0, 1477 w-7, 180,				
10, 15 w-3, 0, 0, 6907 w-6, 0,				
12,			}	
2,				
1, 1, 1, 1,				
2, 1, 1, 1,				
7,				

- liczby opisujące gałęzie

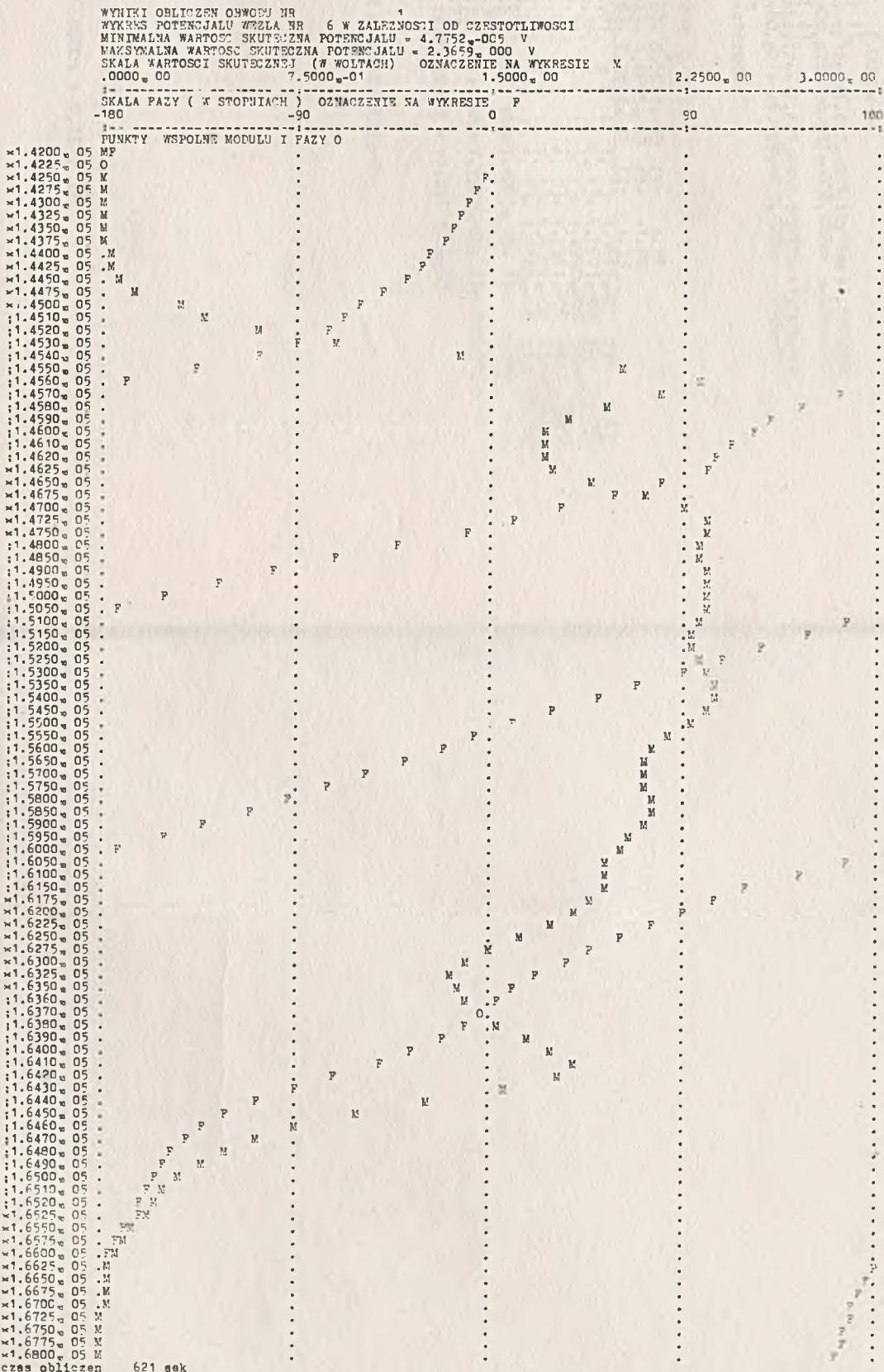
- liczby opisujące tranzystory

- żądane wyniki



Rys. 6. Przebieg napięcia u_2 (na wyjściu wzmacniacza selektywnego) w zależności od częstotliwości

DANE OBWODU NR 1
g= 15. ltr= 0. w= 7. f=1.546 850e+05
nr g w p w k kod
1 1 7 41 5.0000e-00 .0000e-00 1.5000e-02
2 1 2 23 1.4160e-03 7.4800e-10
3 3 3 23 2.6650e-03 3.9700e-10
4 3 4 23 2.2960e-03 4.6100e-10
5 5 5 23 1.9700e-03 5.3700e-10
6 6 6 23 7.2300e-04 1.1470e-09
7 2 7 23 7.5900e-05 2.7380e-08
8 2 7 23 3.8700e-05 1.3950e-08
9 3 7 23 4.7500e-04 2.8800e-09
10 3 7 23 3.6700e-04 2.2280e-09
11 4 7 23 1.0340e-03 1.2330e-09
12 4 7 23 8.5800e-04 1.0240e-09
13 5 7 23 1.4470e-03 8.6400e-10
14 5 7 23 1.2250e-03 7.3140e-09
15 6 7 1 1.5000e-02
obliczyc potencjal wzela nr: 6.
WYNIKI OBLICZEN OBWODU NR 1
v[6]= 2.3096e+00 f1= +23.46
MOC CZYNNA WYDAWANA PRZEZ SEM SPW TRANZYSTORY = +9.654 057e-02
MOC TRACONA NA OPORNOSCIACH UKLADU = +9.654 057e-02



Przy wciśniętym klawiszu nr 6 otrzymano następujące wyniki:

```

DANE OBWODU NR      2
g= 12, ltr= 2, w= 7, f=1.000 000w+03
nr g w p w k kod      1.0000w-02 .0000w 00 6.0000w 02
1 1 1 7 41
2 1 1 7 1 2.0000w 04
3 1 2 3 8.0000w-06
4 2 7 1 1.0000w 04
5 2 7 1 4.7000w 04
6 3 7 3 1.0000w-07
7 3 7 1 2.2000w 03
8 4 7 1 6.4000w 02
9 3 5 13 1.9000w 03 5.0000w-08
10 7 6 1 3.3000w 03
11 5 6 1 1.0000w 05
12 5 7 13 3.6000w 02 1.0000w-04
TRANZYSTOR NR 1 B[ 2],C[ 3],E[ 4],
g11e=+7.700w-05S,C11e=+.000w+00F,absy12e=+1.477w-03S,fiy12e=+1.800w+02
absy21e=+1.015w-02S,fiy21e=+.000w+00,g22e=+6.907w-07S,C22e=+.000w+00F
TRANZYSTOR NR 2 B[ 5],C[ 6],E[ 4],
g11e=+7.700w-05S,C11e=+.000w+00F,absy12e=+1.477w-03S,fiy12e=+1.800w+02
absy21e=+1.015w-02S,fiy21e=+.000w+00,g22e=+6.907w-07S,C22e=+.000w+00F
obliczyc wszystkie prądy przewodowe
obliczyc następujące prądy w tranzystorach:
T 1 iB,iC,iE,
T 2 iB,iC,iE,
obliczyc potencjały wszystkich węzłów
WYNIKI OBLICZEN OBWODU NR      2
v[ 1]= 8.7622w-03 fi= -.03 v[ 2]= 8.7621w-03 fi= +.18
v[ 3]= 7.1588w-02 fi=+126.23 v[ 4]= 1.4695w-03 fi= -1.98
v[ 5]= 5.6143w-03 fi=-178.57 v[ 6]= 2.2894w-01 fi= +.73
g 1 1[ 1, 7]= 2.0630w-06 fi=-179.77, g 2 1[ 1, 7]= 4.3811w-07 fi= -.03,
g 3 1[ 1, 2]= 1.6249w-06 fi= +.30, g 4 1[ 2, 7]= 8.7621w-07 fi= +.18,
g 5 1[ 1, 2]= 1.8643w-07 fi= +.18, g 6 1[ 3, 7]= 4.4980w-05 fi=-143.77,
g 7 1[ 3, 7]= 3.2540w-05 fi=+126.23, g 8 1[ 4, 7]= 2.2961w-06 fi= -1.98,
g 9 1[ 3, 5]= 1.8489w-05 fi=-178.46, g 10 1[ 7, 6]= 6.9377w-05 fi=-179.27,
g 11 1[ 5, 6]= 2.3456w-06 fi=-179.26, g 12 1[ 5, 7]= 1.5595w-05 fi=-178.31,
T 1 iB: abs=5.6226w-07, fi= +.53, iC: abs=7.4003w-05, fi= +.64,
iE: abs=7.4565w-05, fi=-179.36,
T 2 iB: abs=5.4866w-07, fi=-179.27, iC: abs=7.1723w-05, fi=-179.27,
iE: abs=7.2271w-05, fi= +.73,
MOC CZYNNA WYDAWANA PRZEZ SEM SPM TRANZYSTORY = +1.951 935w-05
pE 1=+2.062 982w-08
pT 1=+3.187 348w-06
pT 2=+1.631 137w-05
MOC TRACONA NA OPORNOŚCIACH UKŁADU = +1.951 935w-05
galaz moc
1 +2.553 577w-09
2 +3.838 818w-09
4 +7.677 413w-09
5 +1.633 492w-09
7 +2.329 501w-06
8 +3.374 061w-09
9 +6.495 112w-07
10 +1.588 353w-05
11 +5.501 772w-08
12 +8.755 597w-07
czas obliczeń 48 sek

```

A zatem $u_2(t) = 0,229 \sqrt{2} \sin(2\pi \cdot 1000t + 0,73^\circ)$ [V].

Dla tego obwodu przedstawiono na rys. 6 przebieg napięcia u_2 w funkcji częstotliwości (napięcie u_2 jest równe potencjałowi węzła nr 6 względem węzła odniesienia czyli węzła nr 7).

LITERATURA

- [1] Zagajewski T.: Układy elektroniki przemysłowej, WNT, Warszawa 1971.
- [2] Grobelny M.: Zarys liniowej teorii układów elektronicznych, WKiŁ Warszawa 1976.
- [3] Mitra S.K.: Analiza i synteza układów aktywnych liniowych, WNT, Warszawa 1974.
- [4] Ramey R.L., White E.J.: Zastosowanie macierzy w maszynowej analizie układów elektronicznych, PWN, Warszawa 1974.
- [5] Przesmycki O.: Filtry elektryczne, WKiŁ, Warszawa 1962.
- [6] Chojean J.: Analiza liniowych obwodów prądu stałego Program ALINIES i przykłady, Zeszyt 1. Seminarium Obwodów Elektrycznych, Politechnika Śląska, Gliwice 1972.
- [7] Romanowski H.: Analiza liniowych obwodów prądu zmiennego program ALIZ i przykłady, Zeszyt 2. Seminarium Obwodów Elektrycznych, Politechnika Śląska, Gliwice 1973.
- [8] Сигорский В.П., Петренко А.И.: Основы теории электронных схем, ВУЗ, Киев 1971.

МЕТОД АНАЛИЗА ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

Р е з ю м е

В статье представлено метод анализа линейных цепей переменного тока при возбуждениях синусоидального типа в установившемся режиме. Обсуждено программу для цифровой вычислительной машины и представлено некоторые примеры использования этой программы к анализу фильтра и транзисторного усилителя.

COMPUTER PROGRAMME FOR LINEAR AC NETWORKS ANALYSIS

S u m m a r y

A method of steady state analysis of linear sinusoidal networks has been presented. A digital computer routine and examples of its application to filter and transistor amplifier analysis have also been given. The paper will present the ALIZ-1 programme (written in the ALGOL 1204 language) which makes possible the analysis of linear AC sinusoidal networks in the steady state.