

Lesław TOPÓR-KAMIŃSKI

Institut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

ELEMENTY SKŁADOWE REZYSTANCYJNYCH AKTYWNYCH
OBWODÓW PARAMETRYCZNYCH

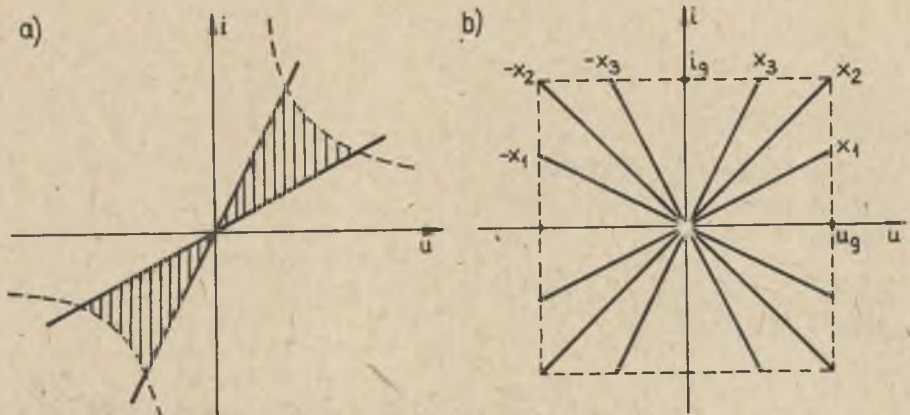
Streszczenie. Opisano klasę obwodów elektrycznych zawierającą rezystancje, aktywne elementy bezinercyjne oraz rezystancyjne elementy parametryczne. Podano podstawowy zbiór elementów tworzących tę klasę obwodów oraz zależności między nimi. Przedstawiono opis rezystancyjnych parametrycznych sieci wielozaciskowych macierzą admitancyjną, której wyrazy są funkcjami wymiernymi sygnału sterującego elementy parametryczne.

1. Wstęp

Współczesna elektronika dysponuje wieloma elementami rezystancyjnymi o parametrach sterowanych sygnałem zewnętrznym. Do grupy tej należą elementy pojedyncze takie, jak: fotorezystor, magnetorezystor, tranzystor polowy, waraktor oraz układy: modulatory, wzmacniacze o sterowanym współczynniku wzmacnienia i analogowe układy mnożące.

Elementy te z wyjątkiem mnożnika analogowego, posiadają silnie ograniczony obszar pracy, w którym zachowują liniowość parametrów, co utrudnia analizę i syntezę zawierających je obwodów elektrycznych. Zastosowanie jednak dodatkowo układów aktywnych znanych w teorii obwodów stacjonarnych pozwala tworzyć rezystancyjne elementy sterowane zbliżone do idealnych w określonym obszarze wartości prądów i napięć oraz sygnału sterującego. Na rys. 1a przedstawiona jest charakterystyka rezystora sterowanego o ograniczonym obszarze pracy (część zakreskowana) oraz utworzonego z udziałem układów aktywnych o rozszerzonym obszarze pracy ($i_g \times u_g$, rys. 1b), przy czym x jest sygnałem sterującym.

Obwody elektryczne zawierające rezystancje, aktywne elementy bezinercyjne oraz rezystancyjne elementy parametryczne opisują równania algebraiczne uzależniające prąd i napięcie od sygnału sterującego elementy parametryczne i można je nazwać rezystancyjnymi aktywnymi obwodami parametrycznymi (RAOP).



Rys. 1

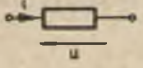
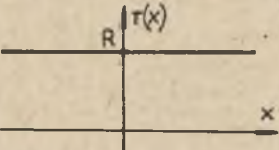
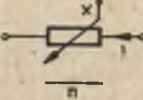
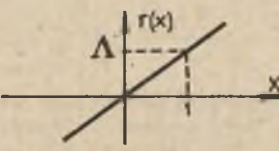
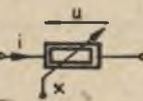
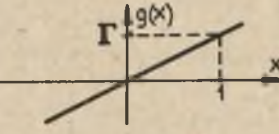
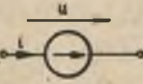
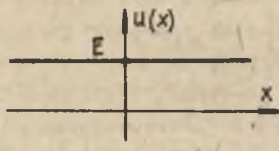
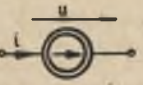
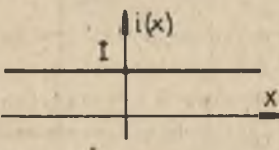
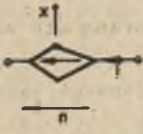
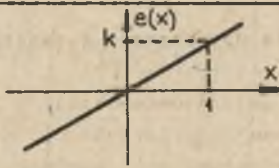
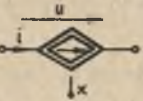
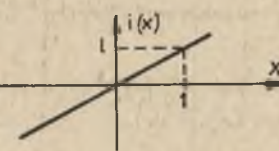
2. Elementy składowe RAOP

Ze względów teoretycznych oraz technicznych możliwości realizacji dla rezystancyjnych aktywnych obwodów parametrycznych można określić grupę elementów składowych zestawioną w tabelicy 1.


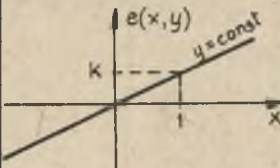
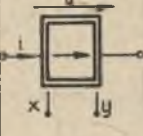
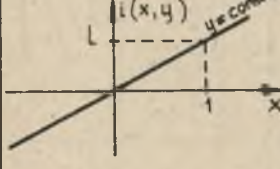
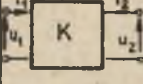
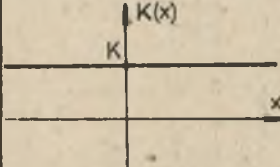
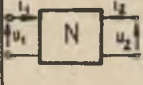
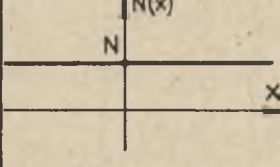
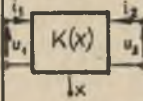
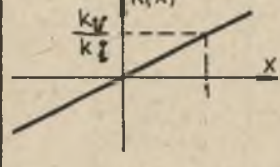
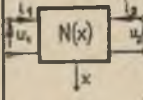
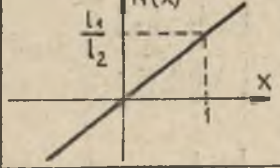
Wielkość x jest sygnałem sterującym parametry poszczególnych elementów i może być ona prądem lub napięciem na zacisku sterującym. Elementy zestawione w tabelicy 1 nie stanowią minimalnego zbioru elementów potrzebnych do budowy RAOP. Oznacza to, że każdy z nich może być utworzony przez odpowiednie połączenia niektórych z pozostałych. Poniżej podane zostaną tylko te zależności między elementami z tabelicy 1, które nie występują w stacjonarnych układach aktywnych:

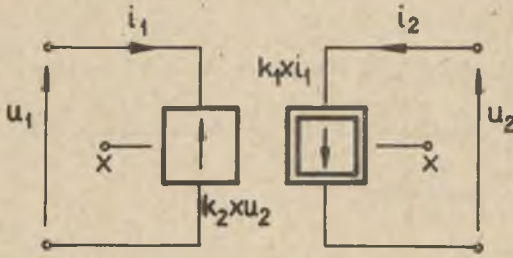
- Tworzenie konwertyorów sterowanych za pomocą źródeł podwójnie sterowanych (rys. 2) [3], [5].
- Tworzenie inwertyorów sterowanych za pomocą źródeł podwójnie sterowanych (rys. 3) [3].
- Tworzenie inwertyorów sterowanych za pomocą konwertyorów sterowanych i inwertyorów stacjonarnych (rys. 4).
- Tworzenie rezystancji (konduktancji) sterowanej za pomocą konwertyorów sterowanych (rys. 5) [5].
- Tworzenie rezystancji (konduktancji) sterowanej za pomocą inwertyorów sterowanych (rys. 6).
- Tworzenie źródeł sterowanych za pomocą rezystancji (konduktancji) sterowanych i źródeł autonomicznych (rys. 7).
- Tworzenie źródeł podwójnie sterowanych za pomocą rezystancji konduktancji sterowanych i źródeł sterowanych (rys. 8).

Tablica 1

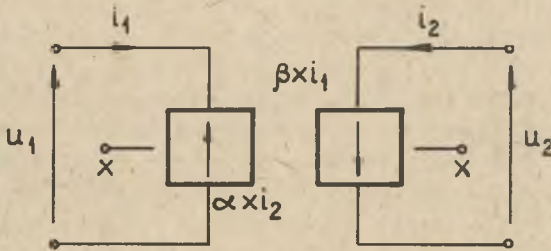
Lp.	Nazwa	Symbol	Schemat	Równanie opisujące	Funkcje zmiany parametru
1	Rezyst. stała	R		$u = Ri$	
2	Rezyst. sterowana			$u = xi$	
3	Kondukt. sterowana			$i = xu$	
4	Źródło napięciowe autonomiczne	E		$u = E$	
5	Źródło prądowe autonomiczne	I		$i = I$	
6	Źródło napięciowe sterowane	$E(x)$		$E(x) = kx$	
7	Źródło prądowe sterowane	$I(x)$		$I(x) = lx$	

cd. tablicy 1

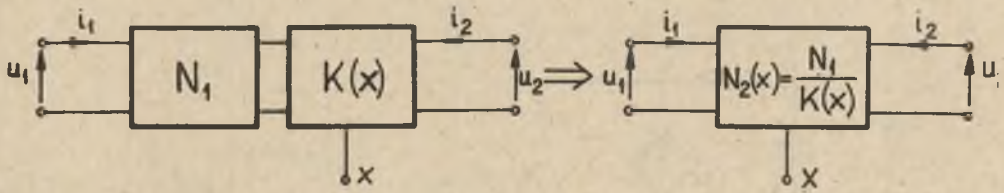
Lp.	Nazwa	Symbol	Schemat	Równanie opisujące	Funkcja zmiany parametru
8	Źródło napięciowe podwójnie sterowane	$E(x, y)$		$E(x, y) = kxy$	
9	Źródło prądowe podwójnie sterowane	$I(x, y)$		$I(x, y) = lxy$	
10	Konwertyer stacjonarny bezinercyjny	K		$u_1 = k_u u_2$ $i_1 = k_I i_2$ $K = \frac{k_u}{k_I}$	
11	Inwertyer stacjonarny bezinercyjny	N		$u_1 = 1_1 i_2$ $i_1 = 1_2 u_2$ $N = \frac{1_1}{1_2}$	
12	Konwertyer sterowany	$K(x)$		$u_1 = k_u(x) u_2$ $i_1 = k_I(x) i_2$ $K(x) = \frac{k_u(x)}{k_I(x)}$	
13	Inwertyer sterowany	$N(x)$		$u_1 = 1_1(x) i_2$ $i_1 = 1_2(x) u_2$ $N(x) = \frac{1_1(x)}{1_2(x)}$	



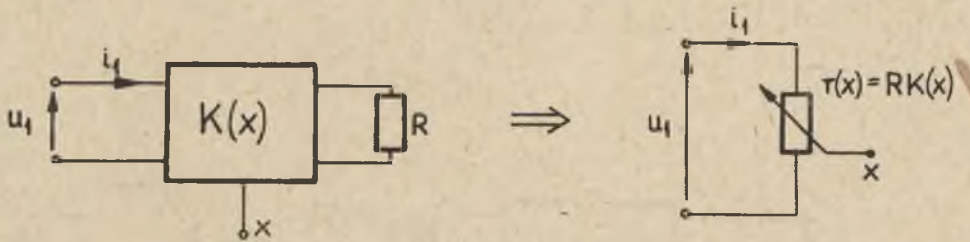
Rys. 2



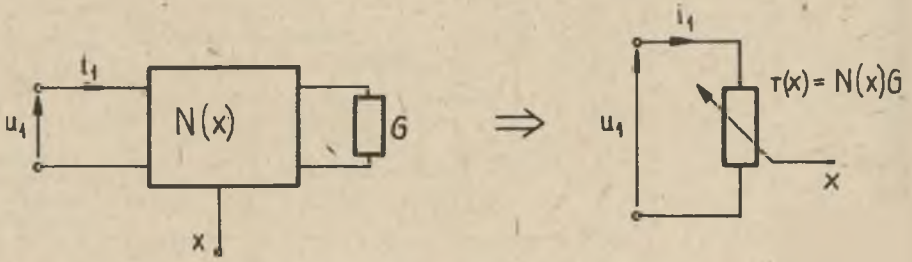
Rys. 3



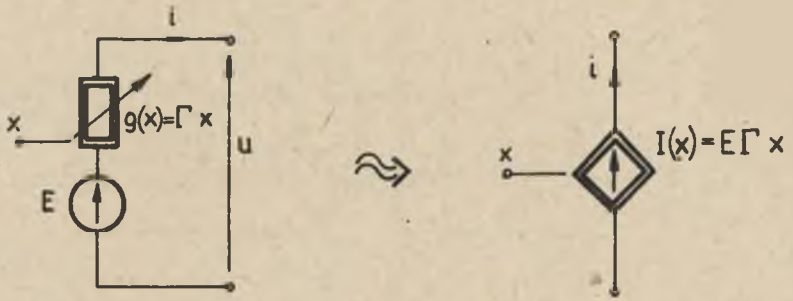
Rys. 4



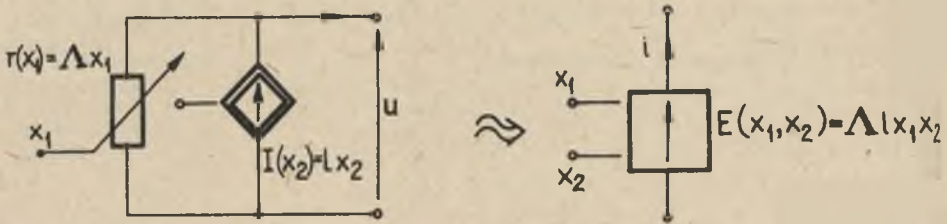
Rys. 5



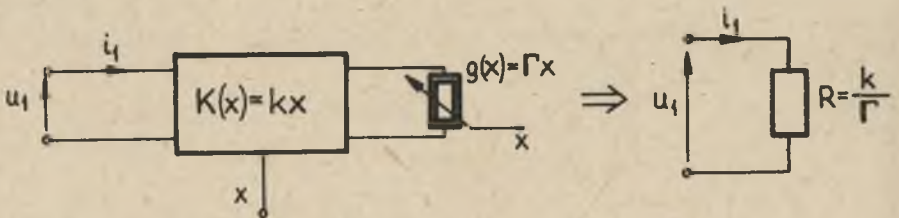
Rys. 6



Rys. 7



Rys. 8



Rys. 9

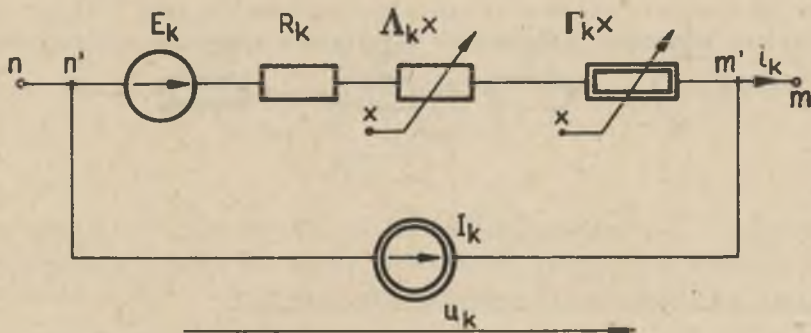
Układy podane w punktach f) i g) można uważać za odpowiadające źródłom sterowanym, tylko dla pewnych wartości rezystancji obciążenia R_0 ($R_0 \gg \Delta r(x)$ dla źródła napięciowego oraz $R_0 \ll \Delta r(x)$ dla źródła prądowego).

h) Tworzenie elementów stacjonarnych z elementów sterowanych poprzez ustalenie wartości sygnału $x = \text{const.}$

i) Tworzenie elementów stacjonarnych przez odpowiednie łączenie elementów sterowanych (rys. 9).

3. Elementy podstawowe i generujące

Do zbioru elementów podstawowych (ZEP) należą elementy pozwalające w łatwy sposób opisywać i analizować układy RAOP. Będą to elementy przedstawione w tabelicy 1 (punkty 1 do 5). Za zbiór elementów generujących (ZEG) można uważać każdy zbiór wystarczający do realizacji danej klasy układów RAOP. Dobór elementów zbioru generującego do danej podklasy RAOP można dokonać wyrażając elementy podstawowe opisujące tę podklasę przez dowolne inne elementy generujące zgodnie z zasadami podanymi w punkcie 2. Zbiór elementów podstawowych pozwala budować sieci RAOP złożone w najogólniejszym przypadku z gałęzi zwanych gałęziami normalnymi o zasilaniu mieszanym (rys. 10).



Rys. 10

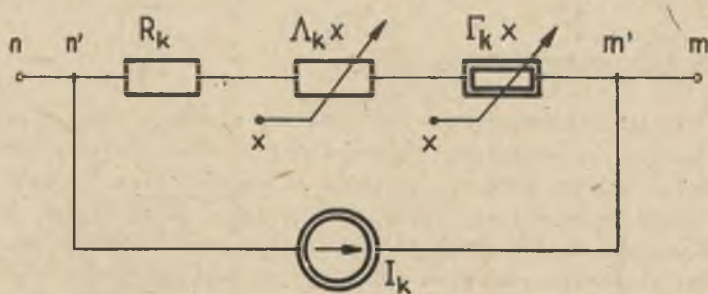
Równanie opisujące k-tą gałąź ma postać:

$$u_k = E_k + r_k I_k - r_k i_k \quad (1)$$

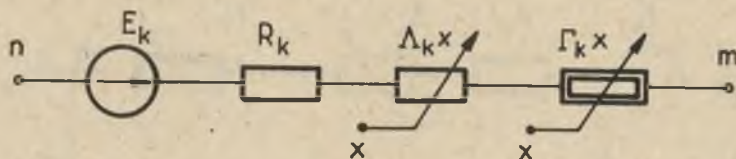
przy czym rezystancja całkowita k-tej gałęzi wynosi:

$$r_k(x) = R_k + x \Lambda_k + \frac{1}{x \Gamma_k} \quad (2)$$

Za sieć normalną RAOP w dalszych rozważaniach będzie uważana sieć złożona z gałęzi normalnych opisanych równaniem (1). Za gałąź normalną będzie uważana każda gałąź typu (1), także nie posiadająca pewnych elementów pokazanych na rys. 10, lecz nie będąca samym źródłem autonomicznym. Każdą gałąź normalną o zasilaniu mieszanym można zastąpić gałęzią normalną o zasilaniu prądowym (rys. 11) lub gałęzią normalną o zasilaniu napięciowym (rys. 12).



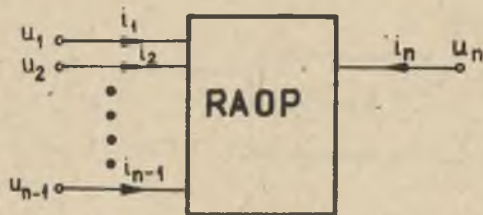
Rys. 11



Rys. 12

4. Macierz admitancyjna nieokreślona opisująca RAOP

Każdy układ wielozaciskowy należący do klasy RAOP można rozpatrywać jako wielobiegunnik przedstawiony na rys. 13. Wielobiegunnik ten posiada $n-1$



Rys. 13

zaczisków głównych oraz jeden zacisk sterujący n , dla którego $u_n = x$ lub $i_n = x$. Z zaciskami głównymi związane są prądy i_k oraz napięcia u_k w ogólnym przypadku zależne od zmiennej zaciskowej x zacisku sterującego n . Napięcia u_k określone są względem zacisku odniesienia nie należącego do wielobiegunnika.

Jeżeli wielobiegunnik jest zbudowany z gałęzi tak, jak na rys. 12, to jest rezystancyjnym układem parametrycznym, zależnym od sygnału sterującego x . Zatem wszystkie prądy i potencjały zacisków głównych $i_k(x)$ oraz $u_k(x)$ spełniają relacje:

$$\sum_{k=1}^{n-1} i_k(x) = 0 \quad (3)$$

oraz

$$\left. \begin{aligned} i_1(x) &= i_{01}(x) + \sum_{k=1}^{n-1} u_{1k}(x) y_{1k}(x) \\ i_2(x) &= i_{02}(x) + \sum_{k=1}^{n-1} u_{2k}(x) y_{2k}(x) \\ &\dots\dots\dots \\ i_{n-1}(x) &= i_{0(n-1)}(x) + \sum_{k=1}^{n-1} u_{(n-1)k}(x) y_{(n-1)k}(x) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

gdzie $i_{ok}(x)$ jest prądem płynącym przez k -ty zacisk w przypadku, gdy wszystkie pozostałe są zwarte z zaciskiem odniesienia. Spełniają one relację:

$$\sum_{k=1}^{n-1} i_{ok}(x) = 0 \quad (5)$$

Z relacji (4) i (5) wynika, że dla wielobiegunnika nie posiadającego źródeł autonomicznych, ani źródeł sterowanych zewnętrznym sygnałem x spełnione jest:

$$i_{01}(x) = i_{02}(x) = \dots = i_{ok}(x) = \dots = i_{0(n-1)}(x) = 0 \quad (6)$$

Wielobiegunnik RAOP można wtedy nazwać niegenerującym.

W równaniach (4) występują wielkości:

$$y_{lk}(x) = \frac{i_l(x) - i_{0l}(x)}{u_k(x)} \quad (7)$$

przy założeniu: $u_m(x) = 0$ ($m = 1, 2, \dots, k, \dots, n-1$) dla $m \neq k$.

Wielkości typu (7) nazywane będą:

a) parametryczną konduktancją wewnętrzną wielobiegunnika RAOP zależną od parametru x , dla $l = k$,

b) parametryczną konduktancją przejściową wielobiegownika RAOP zależną od parametru x dla $l \neq k$.

Układ równań (4) opisujący wielobiegownik z rys. 13 można zapisać w postaci macierzowej:

$$[i(x)] = [i_o(x)] + [y(x)] [z(x)] \quad (8)$$

gdzie

$[i(x)]$ - macierz kolumnowa prądów zacisków głównych,

$[i_o(x)]$ - macierz kolumnowa składowych prądów zacisków głównych,

$[u(x)]$ - macierz kolumnowa napięć zacisków głównych wielobiegownika względem dowolnego zacisku zewnętrznego

oraz:

$$[y(x)] = \begin{bmatrix} y_{11}(x) & y_{12}(x) & \dots & y_{1(n-1)}(x) \\ y_{21}(x) & y_{22}(x) & \dots & y_{2(n-1)}(x) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{(n-1)1}(x) & y_{(n-1)2}(x) & \dots & y_{(n-1)(n-1)}(x) \end{bmatrix}$$

jest macierzą o elementach typu (7) nazwaną macierzą admittancejną nieokreśloną lub pełną wielobiegownika RAOP. Wyrazy tej macierzy są funkcjami sygnału sterującego x . Dla stałej wartości $x = \text{const.}$ macierz (9) opisuje wielobiegownik rezystancyjny stacjonarny.

5. Elementy macierzy admittancejnej nieokreślonej jako funkcje wymierne sygnału sterującego

Niechaj wielobiegownik RAOP będzie siecią zbudowaną z gałęzi w sposób podany na rys. 12, lecz dla uproszczenia niech $E_k = 0$. Zatem gałęzie których rezystancję opisuje relacja (2) będą mieć postać podaną na rys. 14. Dla tak zbudowanego wielobiegownika wyrazy macierzy nieokreślonej (9) będą powstawały z funkcji (2) opisujących pojedynczą gałąź poprzez działania dodawania, odejmowania, mnożenia i dzielenia, będą zatem funkcjami wymiernymi sygnału sterującego x i można je wyrazić wzorem:

$$y_{lk}(x) = \frac{L(x)}{M(x)} = \frac{a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n}{b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_mx^m} \quad (10)$$

6. Zakończenie

Elementy sterowane, przedstawione w tablicy 1, mogą być w sieci RAOP elementami liniowymi lub nieliniowymi w zależności od identyfikacji sygnału sterującego x . Jeżeli sygnał x jest zmienną zaciskową zewnętrzną (układ nieautonomiczny), sieć RAOP jest siecią liniową. Jeżeli sygnał x jest funkcją zmiennej zaciskowej wewnętrznej układu (układ autonomiczny), sieć RAOP staje się nieliniowa. W ogólnym przypadku sieć RAOP może się składać z wielu wyodrębnionych podsieci, z których pewne mogą być autonomiczne, a inne nieautonomiczne.

W klasie układów RAOP można realizować takie zadania, jak:

- syntezę rezystancyjnych dwójników i czwórników nieliniowych [1], [4],
- makromodelowanie i symulację układów elektronicznych [6],
- modelowanie układów o nowych własnościach [7].

Możliwości te znacznie rozszerzają się przez wprowadzenie układów aktywnych sterowanych: konwertora i invertora [3], [5].

LITERATURA

- [1] Levenstein H.: Theory of networks of linearly variable resistance. Proc IEEE, vol. 46, February, 1958.
- [2] Weiss L.J.: Tranzystor polowy jako opór o wartości zmiennej liniowo w czasie. Elektronika, 5, 1973.
- [3] Topór-Kamiński L.: Analogowy układ mnożący jako element teorii obwodów. ZN Pol. Śl. Elektryka, z. 54, 1976.
- [4] Malik M.R., Jackson G.L., Young Sookim: Theory and Applications of Resistor, Linear Controlled Resistor, Linear Controlled Conductor Networks. IEEE Trans. on CTS, April 1976.
- [5] Topór-Kamiński L.: Konwertor impedancyjny sterowany. ZN Pol. Śl. Elektryka, z. 60, 1978.
- [6] Filipkowski A., Korzec Z.: Makromodelowanie układów scalonych. II Krajowa Konferencja Teoria Obwodów i Układy Elektroniczne, 1978.
- [7] Topór-Kamiński L.: Uogólniony rotator sterowany. ZN Pol. Śl. Elektryka z. 62, 1979.

Przyjęto do druku w maju 1979 r.

СОСТАВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Резюме

В статье описан класс электрических цепей, содержащих активные сопротивления, безинерционные активные элементы, а также параметрические элементы активного сопротивления. Представлено собрание элементов, образующих этот класс цепей, а также зависимости между ними. С помощью матрицы адмитанса, элементы

которой являются рациональными функциями сигнала, управляющего параметрическими элементами, дано описание параметрических многополюсных сетей активного сопротивления.

THE COMPONENTS OF RESISTIVE ACTIVE TIME-VARYING NETWORKS

S u m m a r y

The class of networks composed of resistances, active noninertial elements and time-varying resistances was described. The basic set of elements and the relations among them were presented. The analysis of time-varying resistive multipole networks with the use of admittance matrix, which parameters are rational functions of the signal controlling time-varying elements was shown.