ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1984

Seria: ELEKTRYKA z. 88 Nr kol. 779

Lesław TOPÓR-KAMIŃSKI

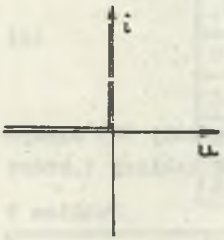
Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

DIODOWE ELEMENTY OSOBLIWE

Streszczenie. Opisano za pomocą formuł boolowskich idealne elementy diodowe jako dwójniki osobliwe. Pokazano zależności między nimi i generację nowych dwójników równoważnych. Przedstawiono realizację charakterystyk rzeczywistych diodowych elementów osobliwych.

1. Wstęp

Idealny element diodowy opisany na płaszczyźnie i-u charakterystyką przedstawioną na rys. 1 zachowuje się jak przerwa lub zwarcie w zależności od kierunku przyłożonego napięcia. Można go zatem zaliczyć do zbioru elementów osobliwych i opisywać metodą formuł boolowskich przedstawioną w pracach [5],[6]. Metoda ta wymaga wprowadzenia transformacji N zbioru liczb rzeczywistych R w zbiór dwuelementowy $\{0,1\}$ o następującej postaci:



Rys. 1

$$Nx = \tilde{x} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } x \in R \text{ i jest równe tylko } 0 \\ 1 & \text{gdy } x \in R \text{ i jest dowolne} \end{cases} \tag{1}$$

Wtedy dwójnik osobliwy można opisać formułą boolowską:

$$A\tilde{i} + B\tilde{u} = 0, \tag{2}$$

w której:

A, B - operatory logiczne o wartościach ze zbioru $\{0,1\}$,

$\tilde{i}$, $\tilde{u}$ - N transformacje prądu i napięcia,

".","+","=" - odpowiednio logiczne działania koniunkcji, alternatywy i równoważności.

Własności opisywanego przez formułę (2) dwójnika określone są jednoznacznie przez operatory A, B, gdyż prąd i napięcie mogą przyjmować tylko takie wartości, dla których formuła ta jest spełniona. Jak pokazano

w pracach [5] i [6], operatory te mogą być stałe i opisują wtedy takie elementy osobliwe, jak: nullator, norator, przerwę, zwarcie, idealne źródła autonomiczne oraz źródlatory. Obrazem ich wszystkich na płaszczyźnie i-u są odpowiednio usytuowane poziome lub pionowe linie proste oraz punkty, z wyjątkiem noratora, którego obrazem jest cała płaszczyzna. Jeżeli operatory A, B będą zależne od czasu, to opisują poprzez formułę (2) idealne komutatory elektryczne, które można nazwać elementami osobliwymi parametrycznymi.

2. Idealna dioda jako element osobliwy

Aby opisać idealną diodę jako element osobliwy należy wprowadzić nowy operator D, który będzie zależny od wartości obydwu zmiennych zaciskowych i, u, jakie mogą występować na zaciskach tej diody.

Operator D można zatem zdefiniować jako transformację zbioru RxR w zbiór dwuelementowy 0,1 :

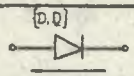
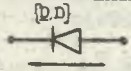
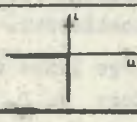
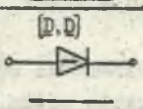
$$D_x(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{gdy} \quad x \geq 0, \quad y = 0 \\ 1 & \text{gdy} \quad x < 0, \quad y - \text{dowolne} \\ & \phantom{\text{gdy}} \quad x \geq 0, \quad y \neq 0 \end{cases} \qquad (3)$$
$$x \in R \quad y \in R$$

Należy także zdefiniować operator $\underline{D}_x$ przeciwny do operatora D_x względem zmiennej zaciskowej x, który opisuje zależność:

$$\underline{D}_x\, x,y = \begin{cases} 1 & \text{gdy} \quad x > 0, \quad y - \text{dowolne} \\ & \phantom{\text{gdy}} \quad x \leq 0, \quad y \neq 0 \\ 0 & \text{gdy} \quad x \leq 0, \quad y = 0 \end{cases} \qquad (4)$$
$$x \in R \quad x \in R$$

Wprowadzając operator D i przeciwny do niego $\underline{D}$ do formuły (2) otrzymuje się cztery diodowe elementy osobliwe przedstawione w tablicy 1, które

Tablica 1

Lp.	Nazwa	Formuła opisująca	Obraz na pł. i,u	Symbol
1	Idealny element diodowy	$D_i(i,u)\tilde{i} + \underline{D}_u(i,u(\tilde{u} = 0$		
2	Idealny element diodowy odwrócony	$\underline{D}_i(i,u)\tilde{i} + D_u(i,u)\tilde{u} = 0$		
3	Idealny element diodowy ujemny	$D_i(i,u)\tilde{i} + D_u(i,u)\tilde{u} = 0$		
4	Idealny element diodowy ujemny odwrócony	$D_i(i,z)\tilde{i} + \underline{D}_u(i,u)\tilde{u} = 0$		

można zaliczyć do grupy dwójków osobliwych nieliniowych. Własności tych elementów zależą od jednoznacznego określenia zgodności dodatniego kierunku osi napięcia z przyporządkowanymi zaciskami, co zostało uwzględnione w symbolice za pomocą strzałki.

3. Rozszerzenie zbioru diodowych elementów osobliwych

Poszukiwanie diodowych dwójników osobliwych równoważnych do danych i połączonych w pewną sieć sprowadza się na podstawie pracy [4] do wykonania odpowiednich działań logicznych na opisujących je operatorach. I tak, jeżeli dane są dwa elementy osobliwe opisane parami operatorów $\{A_1, B_1\}$ oraz $\{A_2, B_2\}$, to ich połączenie szeregowe oraz równoległe opisują formuły:

$$(A_1 + A_2)\vec{i} + (B_1 \cdot B_2)\vec{u} = 0 \tag{5}$$

$$(A_1 \cdot A_2)\vec{i} + (B_1 + B_2)\vec{u} = 0. \tag{6}$$

Należy także dodatkowo uwzględnić reguły działań logicznych na operatorach D, $\underline{D}$, 0 oraz 1 przedstawione w tablicach 2 i 3.

Tablica 2

·	0	1	D	$\underline{D}$
0	0	0	0	0
1	0	1	D	$\underline{D}$
D	0	D	D	Θ
$\underline{D}$	0	$\underline{D}$	Θ	$\underline{D}$

Tablica 3

+	0	1	D	$\underline{D}$
0	0	1	D	$\underline{D}$
1	1	1	1	1
D	D	1	D	Λ
$\underline{D}$	$\underline{D}$	1	Λ	$\underline{D}$

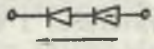
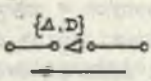
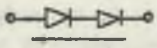
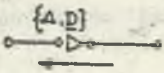
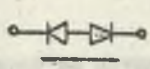
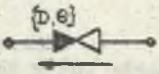
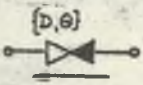
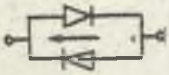
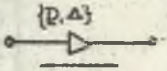
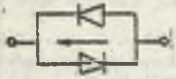
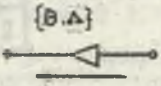
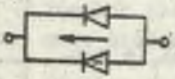
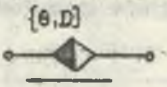
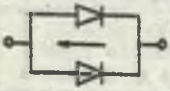
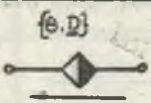
Operatory Θ i Λ definiowane są na podstawie relacji (3) i (4) jako następujące transformacje zbioru $\{R \times R\}$ w zbiór $\{0,1\}$:

$$\Theta_x(x,y) = D_x(x,y) \cdot \underline{D}_x(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } x - \text{dowolne}, \ y \neq 0 \\ 0 & \text{gdy } x - \text{dowolne}, \ y = 0 \end{cases} \tag{7}$$

$$\Lambda(x,y) = D_x(x,y) + \underline{D}_x(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } x \neq 0, \ y \neq 0 \\ 0 & \text{gdy } x = 0, \ y = 0 \end{cases} \tag{8}$$

W formułach boolowskich typu (2) operatory Θ i Λ występując wraz z operatorami D, $\underline{D}$, 0 i 1 posiadają własności operatorów 0 i 1 i mogą być przez nie zastępowane z wyjątkiem dwójnika osobliwego opisanego parą operatorów $\{\Theta_i, \Theta_u\}$.

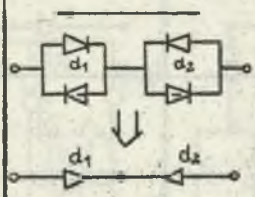
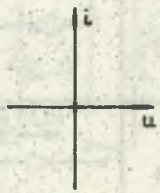
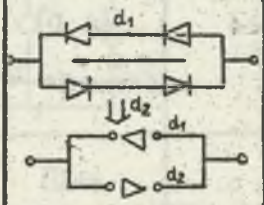
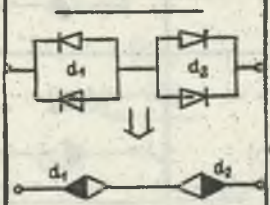
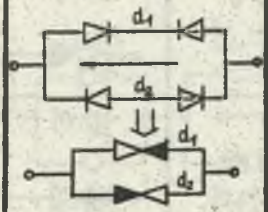
Tablica 4

Lp.	Układ połączeń	Formuła opisująca	Obraz na pł. i-u	Proponowana nazwa	Proponowany symbol
1		$\Lambda\tilde{i} + D\tilde{u} = 0$		Przerwa dodatnia	
2		$\Lambda\tilde{i} + \underline{D}\tilde{u} = 0$		Przerwa ujemna	
3		$\underline{D}\tilde{i} + \Theta u = 0$		—	
4		$D\tilde{i} + \Theta\tilde{u} = 0$		—	
5		$D\tilde{i} + \Lambda\tilde{u} = 0$		Zwarcie dodatnie	
6		$D\tilde{i} + \Lambda\tilde{u} = 0$		Zwarcie ujemne	
7		$\Theta\tilde{i} + D\tilde{u} = 0$		—	
8		$\Theta i + \underline{D}\tilde{u} = 0$		—	

Korzystając z powyższych zasad można otrzymać szereg nowych grup elementów osobliwych w wyniku różnych połączeń w sieć elementów diodowych po-

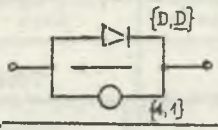
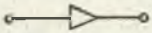
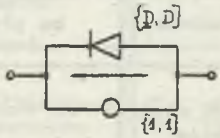
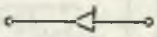
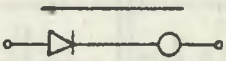
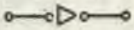
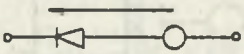
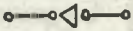
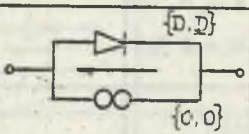
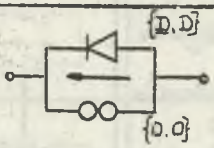
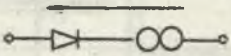
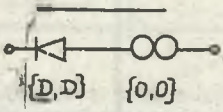
danych w tablicy 1. Do pierwszej grupy można zaliczyć zwarcie utworzone przez odwrotne połączenie równoległe oraz przerwę utworzoną przez odwrotne połączenie szeregowe dwóch diod dodatnich lub ujemnych. Drugą grupę stanowią dwójniki osobliwe utworzone z dwóch różnych diodowych elementów osobliwych przedstawione w tablicy 2. Z klasycznych elementów osobliwych, bezpośrednio za pomocą idealnych diod można zamodelować jedynie nullator (tablica 5, punkty 1 i 2), natomiast odpowiednikiem norratora może być nowy element osobliwy, który ma własności przerwy lub zwarcia w zależności od układu zewnętrznego (tablica 5, punkty 3 i 4).

Tablica 5

Lp.	Układ połączeń	Formuły opisujące	Własności	Obraz na płasz. i-u
1		d_1: $\{D, \Lambda\}$ d_2: $\{\underline{D}, \Lambda\}$ $\Lambda\vec{i} + \Lambda\vec{u} = 0$	Nullator $\{\Lambda, \Lambda\} \triangleq \{1, 1\}$	
2		d_1: $\{\Lambda, D\}$, d_2: $\{\Lambda, \underline{D}\}$ $\Lambda\vec{i} + \Lambda\vec{u} = 0$	 $i = 0$ $u = 0$	
3		d_1: $\{\ominus, D\}$, d_2: $\{\ominus, \underline{D}\}$ $\ominus\vec{i} + \ominus\vec{u} = 0$	$\{0, 0\}$ i - dowolne $u = 0$ lub u - dowolne $i = 0$	
4		d_1: $\{D, \ominus\}$ d_2: $\{\underline{D}, 0\}$ $\ominus\vec{i} + \ominus\vec{u} = 0$		

Korzystając z równoważności $\Lambda \hat{=} 1$ oraz $0 \hat{=} 0$, można wykazać podstawowe związki między diodowymi elementami osobliwymi a nullatorem i noratorem. Przedstawione one są w tablicy 6.

Tablica 6

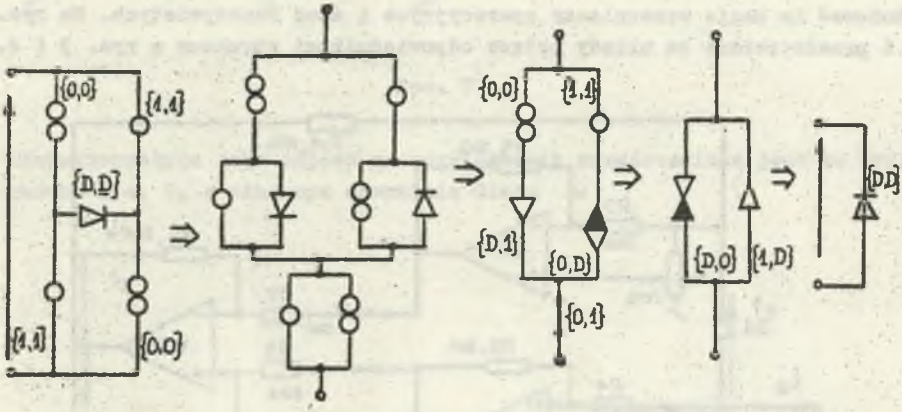
Lp.	Układ połączeń	Formuły opisujące	Odpowiednik
1		$(D \cdot 1)\vec{i} + (\underline{D} + 1)\vec{u} = 0$ $D\,\vec{i} + 1\,\vec{u} = 0$	$\{D, \Lambda\}$ 
2		$(\underline{D} \cdot 1)\vec{i} + (D + 1)\vec{u} = 0$ $\underline{D}\,\vec{i} + 1\,\vec{u} = 0$	$\{\underline{D}, \Lambda\}$ 
3		$(D + 1)\vec{i} + (\underline{D} \cdot 1)\vec{u} = 0$ $1\,\vec{i} + \underline{D}\,\vec{u} = 0$	$\{\Lambda, \underline{D}\}$ 
4		$(\underline{D} + 1)\vec{i} + (D \cdot 1)\vec{u} = 0$ $1\,\vec{i} + D\,\vec{u} = 0$	$\{\Lambda, D\}$ 
5		$(D \cdot 0)\vec{i} + (\underline{D} + 0)\vec{u} = 0$ $0\,\vec{i} + \underline{D}\,\vec{u} = 0$	$\{\Theta, \underline{D}\}$
6		$(\underline{D} \cdot 0)\vec{i} + (D + 0)\vec{u} = 0$ $0\,\vec{i} + D\,\vec{u} = 0$	$\{\Theta, D\}$
7		$(D + 0)\vec{i} + (\underline{D} \cdot 0)\vec{u} = 0$ $D\,\vec{i} + 0\,\vec{u} = 0$	$\{D, \Theta\}$
8		$(\underline{D} + 0)\vec{i} + (D \cdot 0)\vec{i} = 0$ $\underline{D}\,\vec{i} + 0\,\vec{u} = 0$	$\{\underline{D}, \Theta\}$

4. Teoretyczne modele diody ujemnej

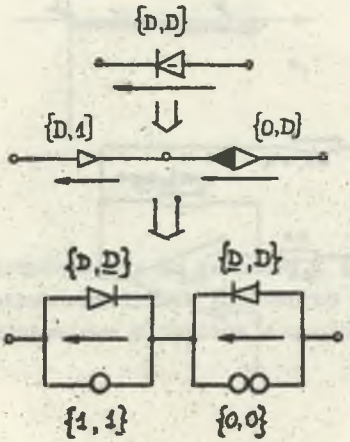
W podstawowym układzie teoretycznym pozwalającym symulować diodę ujemną stosuje się nullatorowo-nolatorowy model konwertora ujemnoimpedancyjnego oraz diodę dodatnią. Przedstawiono to na rys. 2 wraz z kolejnymi układami równoważnymi. Transformację trójkąt - gwiazda (rys. 2a i b) przeprowadzono według zasad przedstawionych w pracy [5].

Syntezę modelu diody ujemnej można także przeprowadzić bezpośrednio w oparciu o relacje (5) i (6) oraz tablice 2 i 3. Przykładowy ciąg przekształceń operatorów opisujących diodę ujemną może być następujący:

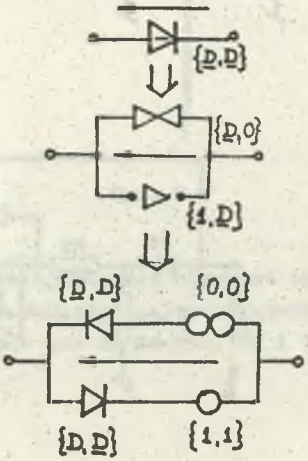
$$\{D,\ D\} \Rightarrow \{D + 0,\ 1 \cdot D\}. \tag{9}$$



Rys. 2



Rys. 3



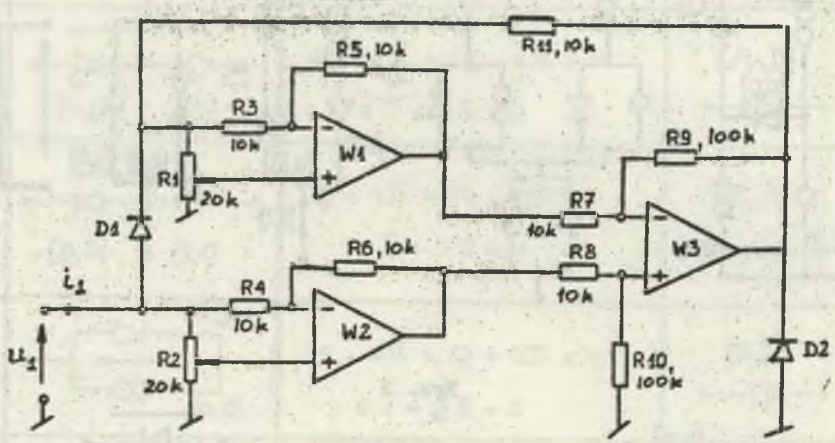
Rys. 4

Operatory (9) opisują szeregowe połączenie dwójników $\{D,1\}$ i $\{0,D\}$, z których każdy można przedstawić na podstawie tablicy 5 jako połączenie równoległe nullatorów, noratorów i diod dodatnich. Ciąg odpowiadających im dwójników osobliwych prowadzący do modelu szeregowo-równoległego przedstawiony jest na rys. 3.

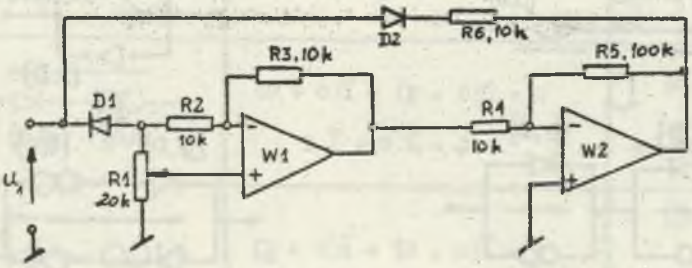
Natomiast na rys. 4 przedstawiona jest synteza modelu równoległo-szeregowego diody ujemnej.

5. Układy rzeczywiste symulujące diodę ujemną

Rzeczywiste układy o własnościach zbliżonych do diody ujemnej można zbudować na bazie wzmacniaczy operacyjnych i diod rzeczywistych. Na rys.5 i 6 przedstawione są układy będące odpowiednikami struktur z rys. 3 i 4.

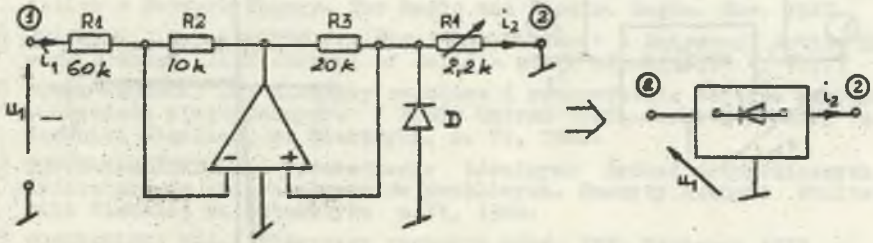


Rys. 5



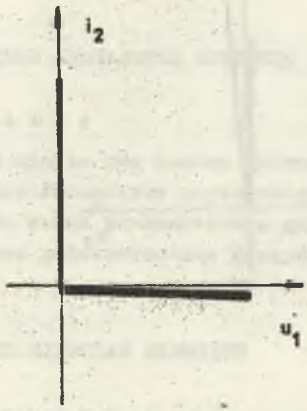
Rys. 6

Własności diody ujemnej może także posiadać czwórnik jako zależność między jego napięciem wejściowym u_1 i prądem jego zacisków wyjściowych i_2. Przykład takiego czwórnika przedstawia rys. 7.

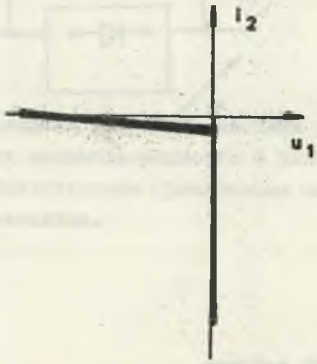


Rys. 7

Charakterystyka jego zdjęta na oscyloskopie przedstawiona jest na rys. 8 oraz na rys. 9, z włączoną odwrotnie diodą D.

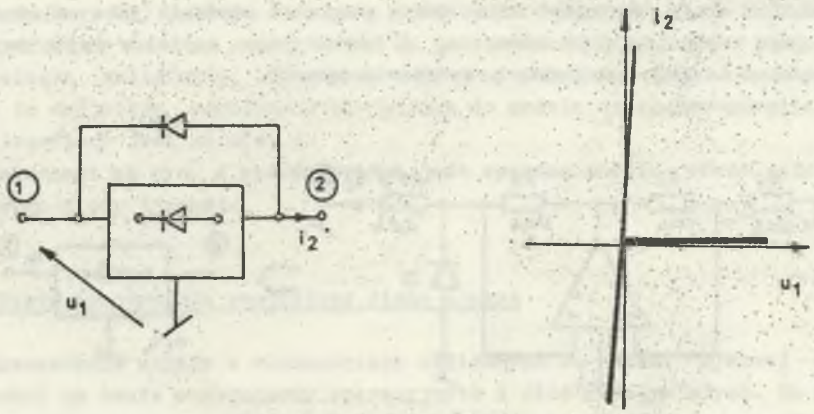


Rys. 8

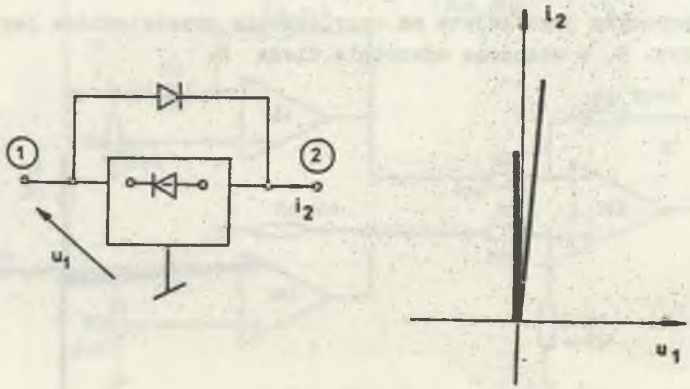


Rys. 9

Przyłączenie do zacisków 1 i 2 diody dodatniej pozwala otrzymać układy o charakterystykach zbliżonych do tych, jakie posiadają elementy osobliwe przedstawione w tablicy 4 punkt 5 i 7. Pokazane one są na rys. 10 i 11.



Rys. 10



Rys. 11

6. Uwagi końcowe

Celem niniejszej pracy było pokazanie możliwości opisu prostych układów nieliniowych za pomocą formuł boolowskich i wprowadzenia ich do grupy elementów osobliwych. Rozszerzenie metody na obiekty o bardziej złożonych charakterystykach wymaga wprowadzenia dodatkowych transformacji zbioru $\{R \times R\} \to \{0,1\}$, zależności między nimi oraz powiązania z opisem takich elementów osobliwych, jak źródła autonomiczne i źródlatory [6].

LITERATURA

[1] CARLIN H.J., YOULA D.C.: Network synthesis with negative resistors. Proc. IRE 49, 1961.

[2] CARLIN H.J.: Singular network elements. IEEE Trans. CT Mar. 19, 1964.

[3] DAVIES A.C.: The significance of Nullators, Norators and Nullors in Active - Network Theory. The Radio and Electr. Engin. Nov. 1967.

[4] HUIJSING J.H., DEKORTE J.: Monlithic Nullor - A Universal Active Network Element. IEEE Journal of Solid - state circuits No 1, 1977.

[5] TOPÓR-KAMIŃSKI L.: Elementy osobliwe i rozszerzenie pojęcia komutacji w obwodach elektrycznych. V SPETO Ustroń 1981, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Elektryka, z. 79, 1982.

[6] TOPÓR-KAMIŃSKI L.: Wprowadzenie idealnych źródeł autonomicznych i źródlatora do zbioru elementów osobliwych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. Automatyka z.71, 1984.

[7] POGORZELSKI W.A.: Klasyczny rachunek zdań. PWN, Warszawa 1975.

[8] MAJEWSKI W.: Układy logiczne. WNT, Warszawa 1976.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Michał Tadeusiewicz

Wpłynęło do redakcji: 5.V.1983 r.

ДИОДНЫЕ АНОМАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Р е з ю м е

В статье при помощи булевых формул описываются идеальные диодные элементы как аномальные двухполюсники. Показаны их взаимозависимости а также генерация новых эквивалентных двухполюсников. Представлена реализация характеристик действительных диодных аномальных элементов.

DIODE SINGULAR ELEMENTS

S u m m a r y

Ideal diode elements were described by Boolean formulas as singular one-ports.

The dependences among them and the generation of new equivalent one-ports were shown. The realization of the characteristics of the real singular diode elements was described.