

Jacek KONOPACKI

ALGORYTM WYZNACZANIA REZYSTANCJI DLA
WYBRANYCH PRZEKSZTAŁTNIKÓW DIODOWYCH

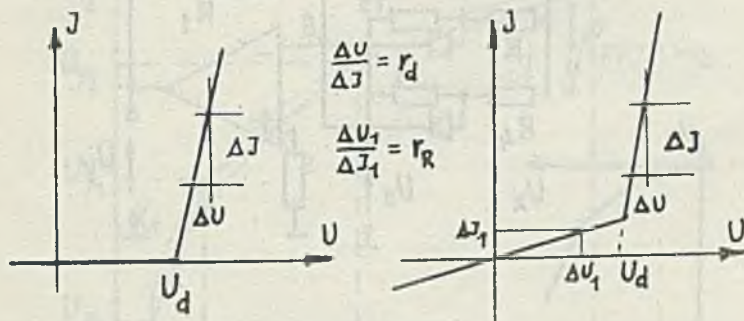
Streszczenie. W artykule przedstawiono algorytm wyznaczania rezystancji dla wybranych przekształtników diodowych oparty na metodzie iteracyjnej. Zaproponowano jednolity dla wszystkich rezystorów układu i dość szybki sposób dochodzenia do wartości szukanej rezystancji, rozbijając obliczenia na uproszczone i dokładniejsze.

1. WSTĘP

Zaprojektowanie przekształtnika diodowego zadanej funkcji $U_Y = F(U_X)$ wymaga przeprowadzenia między innymi:

- 1) wyboru struktury układu,
- 2) wyboru modelu elementu nieliniowego i aproksymacji zależności $U_Y = F(U_X)$,
- 3) obliczenia lub przyjęcia wartości wszystkich rezystancji układu.

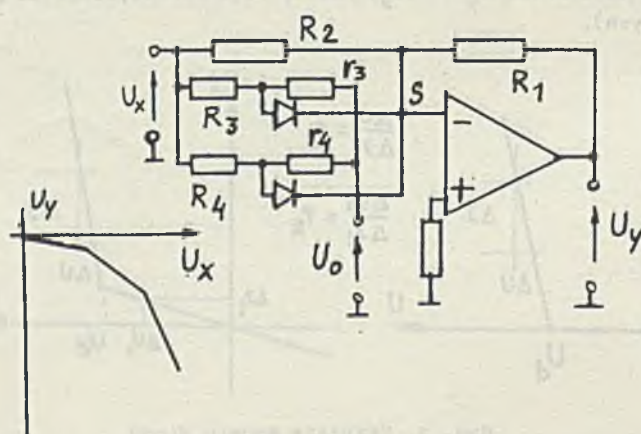
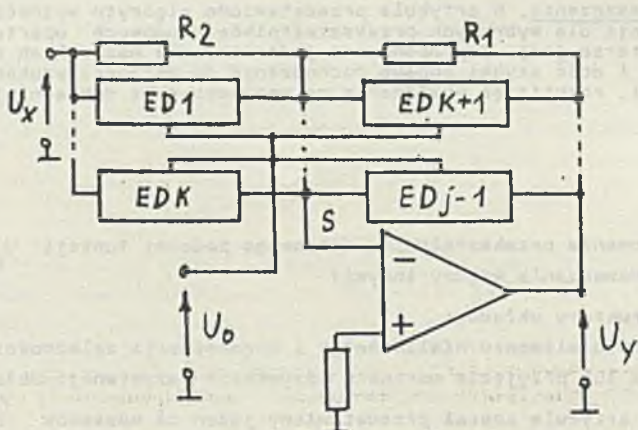
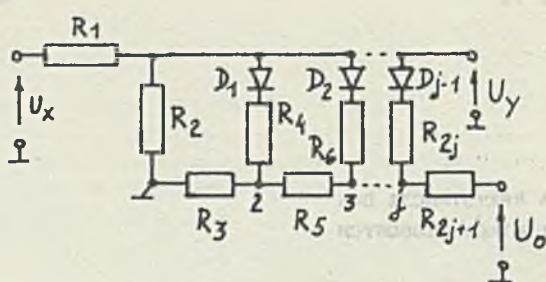
W niniejszym artykule został przedstawiony jeden ze sposobów obliczania rezystancji, przy założeniu że dioda ma charakterystykę odcinkowo-liniową (rys. 1b) (zależność $U_Y = F(U_X)$ należy więc aproksymować za pomocą odcinków prostych).



Rys. 1. Przyjęte modele diody

a) do obliczeń uproszczonych, b) do obliczeń dokładniejszych

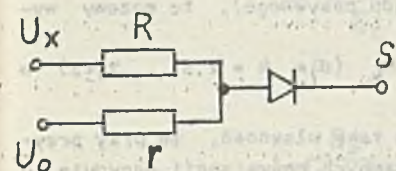
Algorytm ten stał się podstawą do napisania programu na maszynę cyfrową. Ponieważ trudno napisać program dokonujący doboru rezystancji dowolnego



Rys. 2. Wybrana układy przekształtników diodowych

a) układ pasywny, b) układ aktywny - schemat ogólny, c) przykładowa realizacja układu aktywnego

układu, więc ograniczono ich liczbę do jednego układu pasywnego (rys. 2a) i układów aktywnych zbudowanych w oparciu o ogólną strukturę przedstawioną na rys. 2b. Podstawą układu aktywnego jest wzmacniacz pracujący jako sumator. Do punktu sumującego S wzmacniacza (rys. 2b) podłączone są obwody nieliniowe, które składają się z tzw. "elementów diodowych" ED (rys.



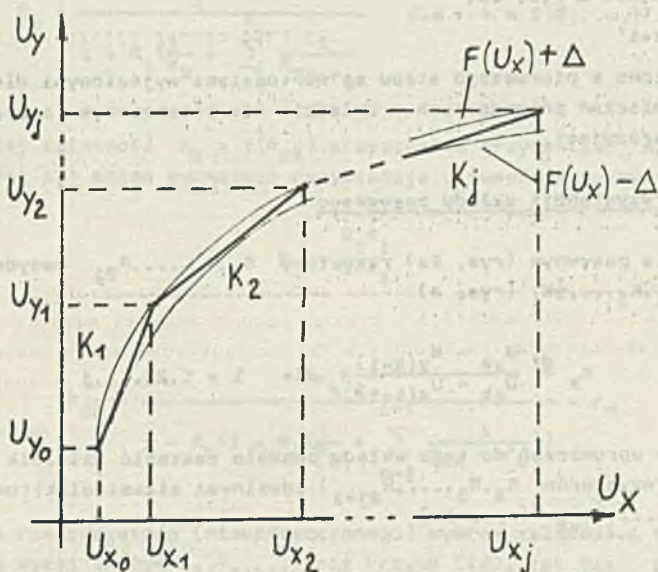
Rys. 3. "Element diodowy" ED

3). Liczba takich elementarnych komórek zależy od liczby punktów zełazania charakterystyki otrzymanej po aproksymacji zależności $U_y = F(U_x)$. "Elementy diodowe" mogą występować na wejściu wzmacniacza lub w sprzężeniu zwrotnym. Układy przekształtników diodowych powstałe na podstawie schematu z rys. 2b realizują funkcje rosnące albo malejące co najwyżej z jednym punktem przegięcia.

Przykładową realizację układu aktywnego przedstawia rys. 2c. Bardziej szczegółowe wiadomości na temat zaprezentowanych układów można znaleźć w literaturze [2], [3], [4].

2. DOBÓR REZYSTANCJI

Aproksymowaną za pomocą j odcinków funkcję (rys. 4) realizuje odpowiedni układ pasywny lub aktywny posiadający $j-1$ diod oraz $2j$ lub $2j+1$



Rys. 4. Aproksymacja liniowa funkcji $U_y = F(U_x)$ (Δ - błąd aproksymacji)

rezystorów. Jeżeli założymy, że po aproksymacji znamy nachylenie wszystkich odcinków i współrzędne (U_{xk}, U_{yk}) punktów załamania charakterystyki oraz przyjmiemy jako dane:

- parametry źródeł napięcia, wzmacniaczy operacyjnych i diod,
- rezystancję R_1 .

- wartość $ra \stackrel{df}{=} \sum_{n=1}^j R_{2n+1}$ (tylko dla układu pasywnego), to możemy wyznaczyć wszystkie pozostałe rezystancje R_k (dla $k = 2, 3, \dots, 2j+1$) w sposób jednoznaczny.

Przedstawione na rys. 2a, b, c układy mają taką własność, że przy przyjętym modelu diody (rys. 1b) każda z wyznaczonych rezystancji decyduje o nachyleniu jednego odcinka (albo punkcie włączenia jednej diody). Wybrano więc do obliczeń metodę polegającą na zmianie wartości wyznaczonej rezystancji i badaniu czy nachylenie (albo napięcie na diodzie) ma wartość żądaną.

Czas obliczeń zależy w znacznym stopniu od przyjętych początkowo wartości rezystancji oraz sposobu dochodzenia do wartości szukanej. Rozbito więc obliczenia na dwa etapy: uproszczone i dokładniejsze. Pierwsze polegają na dokładnym rozwiązaniu obwodu uproszczonego uzyskanego przez wprowadzenie:

- wzmacniacza idealnego (dla układu aktywnego),
- idealnych źródeł napięcia,
- diody o modelu z rys. 1a,
- $R_{2k} \gg R_{2k+1}$.

Wyniki uzyskane z pierwszego etapu są wartościami wyjściowymi dla dokładniejszych obliczeń prowadzonych w układzie nieuproszczonym i opartych na metodzie iteracyjnej.

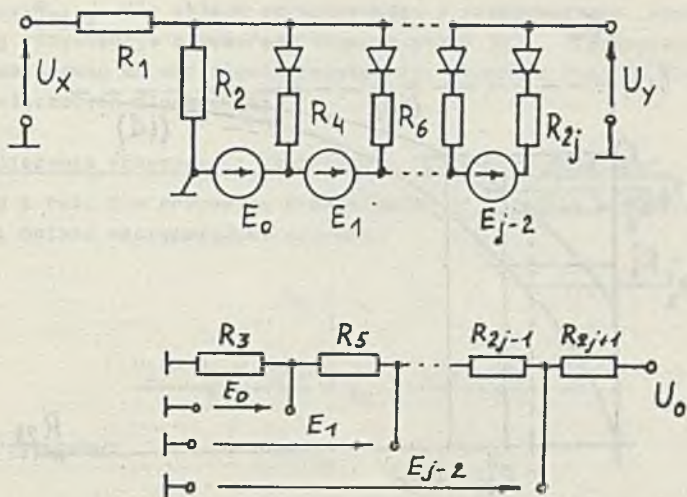
2.1. Doбір rezystancji układu pasywnego

W układzie pasywnym (rys. 2a) rezystory R_2, R_4, \dots, R_{2j} decydują o nachyleniu K_1, K_2, \dots, K_j (rys. 4)

$$K_k \stackrel{df}{=} \frac{U_{yk} - U_{y(k-1)}}{U_{xk} - U_{x(k-1)}} \quad \text{dla } k = 1, 2, \dots, j$$

Wprowadzenie uproszczeń do tego układu pozwala zastąpić dzielnik napięcia (złożony z rezystorów $R_3, R_5, \dots, R_{2j+1}$) idealnymi siłami elektromotorycznymi E_0, E_1, \dots, E_{j-2} (rys. 5a)

$$E_k = U_{y(k+1)} - U_d \quad \text{dla } k = 0, 1, \dots, j-2.$$



Rys. 5. Rozbicie układu z rys. 2a na dwa układy niezależne

gdzie $U_{y(k+1)}$ - rzędne punktów załamania charakterystyki (rys. 4). Dla układu z rys. 5a związek między nachyleniem K_k i rezystancją R_{2k} (przy założeniu $E_0 = E_1 = \dots = E_{j-2} = 0$, $U_d = 0$ i $k-1$ diodach włączonych) ma postać:

$$K_k = \frac{1}{1 + R_1 \left(\frac{1}{R_2} + \sum_{n=2}^k \frac{1}{R_{2n+r_d}} \right)} \quad \text{dla } k = 1, 2, \dots, j$$

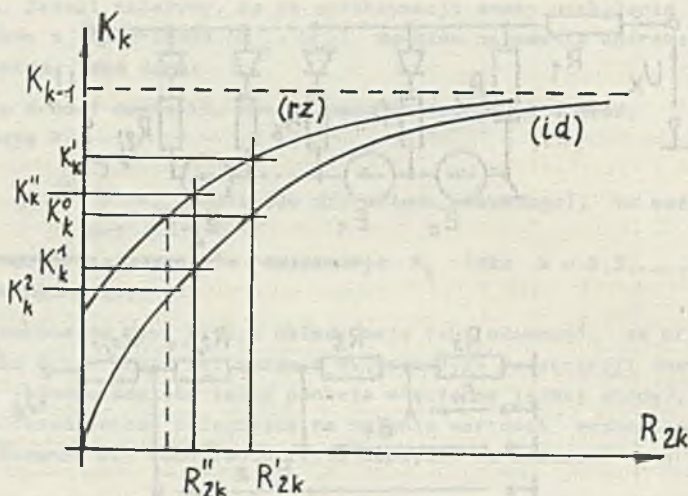
Podaną wyżej zależność $K_k = f(R_{2k})$ przedstawia krzywa (id) na rys. 6. Z zależności tej można wyznaczyć rezystancje o numerach parzystych

$$R_2 = \frac{K_1 R_1}{1 - K_1} \quad (1)$$

oraz

$$R_{2k} = \frac{K_k R_1}{1 - K_k \left(1 + R_1 \left(\frac{1}{R_2} + \sum_{n=2}^{k-1} \frac{1}{R_{2n+r_d}} \right) \right)} - r_d \quad (2)$$

Dla układu rzeczywistego (nieuproszczonego) wykres zależności $K_k = f(R_{2k})$ leży nieco wyżej (wpływ R_3, R_5, \dots) niż krzywa (id), tak jak przedstawia to rys. 6.



Rys. 6. Wykres zależności $K_k = f(R_{2k})$ dla układu z rys. 2a uproszczonego (id) i rzeczywistego (rz)

Wzajemne położenie krzywych (id) i (rz) można wykorzystać do dokładniejszego obliczenia rezystancji R_{2k} (dla $k = 1, 2, \dots, j$). W pierwszym kroku (z krzywej (id) na rys. 6) liczymy wartość R_{2k}' odpowiadającą wzmacnieniu K_k^0 . Dokonując analizy obwodu wyznaczamy K_k^1 odpowiadające R_{2k}' dla obwodu rzeczywistego (z krzywej (rz)). Różnicę $K_k^0 - K_k^1 = \Delta_1'$ dodajemy do tej wartości wzmacnienia, dla której obliczyliśmy ostatnio R , czyli do K_k^0 . Uzyskana nowa wartość K_k^1 służy do obliczenia R_{2k}'' (z krzywej (id)), ta zaś określa K_k^2 . Nową wartość błędu $\Delta_1'' = K_k^1 - K_k^2$ dodajemy tym razem do K_k^1 ($K_k^2 = K_k^1 + \Delta_1''$). Tak postępujemy dopóki obliczona rezystancja nie zapewni żądanej dokładności nachylenia.

Rezystancję $R_3, R_5, \dots, R_{2j+1}$ obliczamy osobno. Najpierw z układu uproszczonego (rys. 5b) liczymy

$$R_{2k+1} = \frac{r_s E_{k-1}}{U_0} - \sum_{n=1}^{k-1} R_{2n+1} \quad \text{dla } k = 1, 2, \dots, j-1 \quad (3)$$

$$R_{2j+1} = r_s - \sum_{n=1}^{j-1} R_{2n+1} \quad (4)$$

Następnie wykorzystując opisany wyżej sposób (podany przy obliczaniu R_{2k}) do zależności napięcia w węzłach $2, 3, \dots, j$ (rys. 2a) od rezystancji

$R_3, R_5, \dots, R_{2j+1}$ dla układu uproszczonego i rzeczywistego wyznaczamy dokładniej rezystancje o numerach nieparzystych [5]. Identyczny algorytm można zastosować do określania rezystancji układu z rys. 2a, lecz o przeciwnie włączonych diodach [5].

2.2. Obliczenie rezystancji zawartych w "elemente diodowym"

Układ z rys. 3 w przypadku przewodzącej diody można przedstawić jak na rys. 7 i opisać następującymi wzorami:

$$I_R = I_x + I_r$$

$$\frac{U_x - U_d - I_x r_d}{R} = I_x + \frac{I_x r_d + U_d - U_o}{r}$$

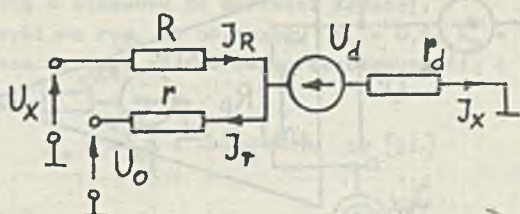
stąd otrzymujemy:

$$I_x = \frac{rU_x - U_d(R+r) + U_o R}{Rr + Rr_d + rr_d} \quad \text{przy } U_x > U_p \quad (5)$$

$$I_x = 0 \quad \text{przy } U_x < U_p$$

gdzie U_p wartość napięcia U_x , przy którym dioda zaczyna przewodzić

$$U_p = U_d - U_o \frac{R}{r} + U_d \left(1 + \frac{R}{r}\right) \quad (6)$$



Rys. 7. Układ z rys. 3 dla diody przewodzącej

Ponieważ podobnie jak w przypadku obwodu pasywnego należy wyznaczyć rezystancje, przekształćmy wzory (5), (6) do postaci:

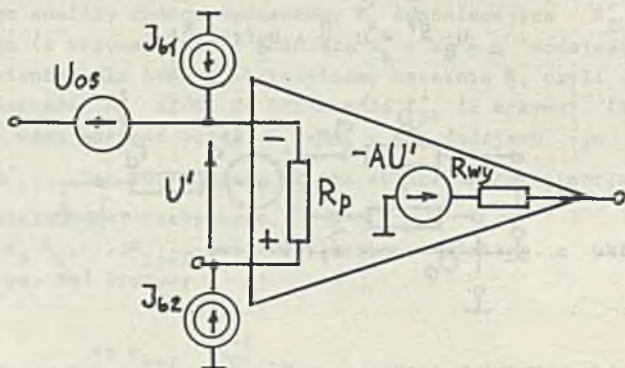
$$A = \frac{R}{r} = \frac{U_p - U_d}{U_d - U_o} \quad (7)$$

$$R = \frac{U_x - U_d(A+1) + U_o A}{I_x} - (A+1)r_d \quad (8)$$

$$r = \frac{R}{A} \quad (9)$$

Zależności (7), (8), (9) są dogodniejsze do obliczenia R i r , przy założeniu że wzmacniacz jest idealny oraz dioda ma charakterystykę z rys. 1a. Podobnie jak dla obwodu pasywnego otrzymane z uproszczonych obliczeń wyniki służą jako wartości wyjściowe do dalszych operacji mających na celu zwiększenie dokładności. Przyjęto następujący sposób dokładniejszego wyznaczania rezystancji "elementu diodowego" (rys. 3):

- 1) wyznaczamy wartości R i r z zależności (7), (8), (9),
- 2) przyjmujemy dokładniejszy model wzmacniacza (np. taki jak na rys. 8),
- 3) dobieramy dokładniej wartość r , korzystając z zależności napięcia na nieprzewodzącej diodzie od r dla układu uproszczonego i rzeczywistego (podobnie jak dla układu pasywnego),
- 4) wyznaczamy A dla nowo obliczonej wartości r ,
- 5) zastępujemy rezystancję r_R przez r_d i siłę elektromotoryczną o wartości U_d ,
- 6) obliczamy dokładniejszą wartość R , korzystając z zależności nachylenia odpowiedniego odcinka od rezystancji R w układzie idealnym i rzeczywistym (po każdej zmianie R modyfikujemy r , aby stosunek A był stały).



Rys. 8. Schemat zastępczy wzmacniacza

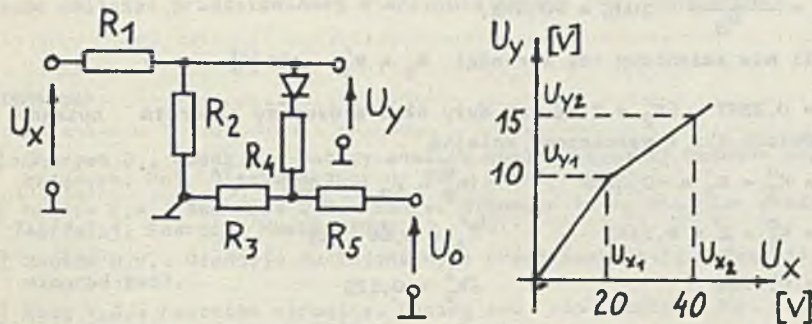
U_{os} - napięcia niezrównoważenia, I_b - prądy polaryzacji, A - wzmacnienie różnicowe, R_p - rezystancja wejściowa różnicowa, R_{wy} - rezystancja wyjściowa

Przeprowadzona w punkcie 6 modyfikacja jest niezbędna ze względu na konieczność utrzymania tego samego napięcia, przy którym dioda zaczyna przewodzić.

3. PRZYKŁAD

Wyznaczmy wartość rezystancji R_2, R_3, R_4, R_5 i ich tolerancje dla układu z rys. 9a tak, by uzyskać charakterystykę pokazaną na rys. 9b z dokładnością $\pm 1,5\%$.

Dane: $R_1 = 10 \text{ [k}\Omega\text{]}$ $r_d = 100[\Omega]$ $U_o = 25 \text{ [V]} \pm 1\%$
 $r_s = 1 \text{ [k}\Omega\text{]}$ $r_R = 10 \text{ [M}\Omega\text{]}$ $U_d = 0,6 \text{ [V]}$



Rys. 9. Prosty przekształtnik diodowy (a) i jego charakterystyka (b)

Rozwiązanie

Ponieważ cały układ ma być obarczony błędem $\pm 1,5\%$, przyjmujemy że obliczenia wartości nominalnych rezystancji zostaną przerwane, gdy nachylenie odcinków i punkt przejścia diody w stan przewodzenia zostaną wyznaczone z dokładnością $\pm 0,15\%$ w stosunku do wartości żądanej.

Z charakterystyki na rys. 9b obliczamy $K_1 = 0,5$, $K_2 = 0,25$. Następnie wyznaczamy wartości szukane ze wzorów uproszczonych (1) ÷ (4)

$$R_2 = \frac{K_1 R_1}{1 - K_1} = \frac{0,5 \cdot 10}{0,5} = 10 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

$$R'_4 = \frac{K_2 R_1}{1 - K_2 (1 + R_1/R_2)} - r_d = \frac{0,25 \cdot 10}{1 - 0,25(1 + 10/10)} - 0,1 = 4,9 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

$$R'_3 = \frac{(U_{y1} - U_d) r_s}{U_o} = \frac{10 - 0,6}{25} \cdot 1 = 0,376 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

$$R'_5 = r_s - R_3 = 0,624 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

Obliczone wartości wstawiamy do układu nieuproszczonego i liczymy:

$$1^{\circ} K'_1 = 0,4977 \quad \delta K'_1 = \frac{K'_1 - K_1}{K_1} \cdot 100\% = -0,06\%, \quad \text{czyli} \quad R_2 = R'_2 = 10 \text{ [k}\Omega\text{]} \\ \text{zapewnia żądaną dokładność,}$$

2^o spadek napięcia na nieprzewodzącej diodzie przy $U_{x1} = 20 \text{ [V]}$ (załama-
nie się charakterystyki)

$$U'_d = 0,5996 \text{ [V]}$$

$$\delta U_d = \frac{U'_d - U_d}{U_d} \cdot 100\% = -0,07\%,$$

$$\text{czyli nie zmieniamy też wartości} \quad R_3 = R'_3 = 376 \text{ [\Omega]}$$

3^o $K'_2 = 0,2557$ $\delta K'_2 = 2,3\%$ za duży błąd stosujemy algorytm opisany w
rozdziale 2.1 i wyznaczamy kolejno

$$\Delta'_1 = K_2^0 - K'_2 = -0,0057 \quad (K_2^0 = K_2 = 0,25)$$

$$K_2^1 = K_2^0 + \Delta'_1 = 0,2443 \quad R_4 = 4,68 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

$$K_2^2 = 0,2503 \quad \delta K_2^2 = 0,12\%$$

$$\text{ostatecznie przyjmujemy} \quad R_4 = R_4^* = 4,68 \text{ [k}\Omega\text{]},$$

4^o $R_5 = R'_5 = 624 \text{ [\Omega]}$ (bo wartość R_3 nie uległa zmianie),

5^o dopuszczalne tolerancje rezystancji można wyznaczyć po uprzednim obli-
czeniu współczynników wrażliwości elementów układu z rys. 9a (dla dio-
dy przewodzącej) na napięcie wyjściowe $S_{R_1}^U$ oraz $S_{U_0}^U$ [1]; wielkości
te podstawiamy do wzoru:

$$\delta u_y = \sum_{i=1}^5 |S_{R_i}^U \cdot \delta R_i| + |S_{U_0}^U \cdot 1\%| = 1,5\%.$$

z którego liczymy δR_1 . Ostatecznie otrzymamy:

$$R_1 = 10 \text{ [k}\Omega\text{]} \pm 0,5\%,$$

$$R_2 = 10 \text{ [k}\Omega\text{]} \pm 1\%$$

$$R_3 = 376 \text{ [\Omega]} \pm 1,2\%$$

$$R_4 = 4,68 \text{ [k}\Omega\text{]} \pm 1,5\%$$

$$R_5 = 624 \text{ [\Omega]} \pm 1,2\%$$

Nie wszystkie podane wyżej wielkości są znormalizowane, dlatego następnym
krokiem powinno być dobranie znormalizowanych rezystancji i tolerancji [5].

4. PODSUMOWANIE

Na zakończenie należy zaznaczyć, że opisany algorytm zapewnia azybsze dochodzenie do szukanej wartości rezystancji, gdy rezystancja wateczna diody r_R jest duzo wiekksza od pozostałych rezystancji układu i wzmacnienie z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego jest bardzo duze. Ponieważ parametry obecnie produkowanych diod i wzmacniaczy operacyjnych pozwalają spełnić wymienione wyżej warunki, więc zastosowanie do obliczeń przedstawionej w artykule metody jest uzasadnione.

LITERATURA

- [1] Chocjan J., Lasek L.: Metody analizy wrażliwościowej układów elektronicznych. Pol. Śląska skrypt nr 937, Gliwice 1980.
- [2] Masłow A.A., Sacharow O.N.: Sintez diodnych funkcjonalnych preobrazowatelej. Energia, Moskwa 1976.
- [3] Smołow B.V.: Diodnyje funkcjonalnyje preobrazowatieli. Energia, Leningrad 1967.
- [4] Wong Y.J.: Function circuits. Design and application. Mc Graw-Hill Book Company, New York 1975.
- [5] Konopacki J.: Algorytm i program syntezy przekształtnika diodowego funkcji $y = f(x)$. Instytut Elektroniki 1979, (praca dyplomowa).

Recenzent: Doc. dr inż. Maria Jastrzębska

Wpłynęło do Redakcji: marzec 1983 r.

АЛГОРИТМ ДЛ Я В Ы Ч И С Л Е Н И Я С Т О И М О С Т И Р Е З И С Т О Р О В
Н Е К О Т О Р Ы Х Д И О Д Н Ы Х Ф У Н К Ц И О Н А Л Ы Н Ы Х П Р Е О Б Р А З О В А Т Е Л Е Й

Р е з ю м е

В статье представлен итеррационный алгоритм для вычисления стоимости резисторов некоторых диодных функциональных преобразователей. Предлагаемый метод является очень производительный и удобный из-за разложения вычислений на упрощенные и подробные.

THE ALGORITHM FOR COMPUTING THE RESISTANCE VALUES
OF THE SELECTED DIODE FUNCTION GENERATORS

Summary

The paper describes an algorithm for computing the resistance values of the selected diode function generators. The method is based on the use of simplified and strict calculus that provides fast and unified evaluation of the resistors values in the circuit.