

Lesław TOPÓR-KAMIŃSKI

Stanisław FRYCZ

Instytut Podstawowych Problemów
Elektroniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

ZASTOSOWANIE DIOD LAMBDA DO MODELOWANIA CHARAKTERYSTYK NIELINIOWYCH Z HISTEREZĄ

Streszczenie. Przeprowadzono analizę układu diody lambda jako rezystancyjnego obwodu parametrycznego. Opisano uniwersalny blok nieliniowy o funkcji przejścia typu lambda. Pokazano realizację układu nieliniowego opisanego charakterystyką w kształcie krzywej zamkniętej, w oparciu o który zbudowano i przebadano nieliniowe przesuwniki fazy.

1. Wprowadzenie

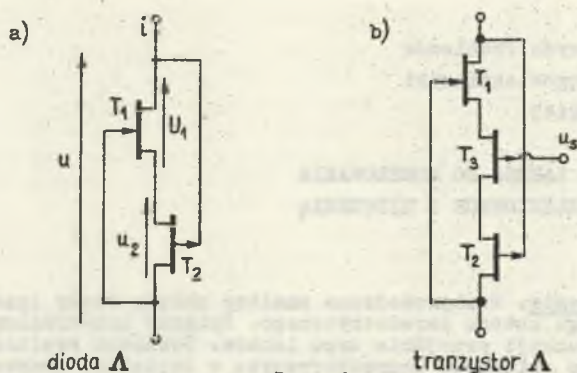
Wśród elementów elektronicznych stosowanych do modelowania układów o charakterystykach nieliniowych na uwagę zasługują tranzystory polowe, traktowane jako rezystory o sterowanej rezystancji. Stosować je można szczególnie tam, gdzie nie jest wymagana duża dokładność odwzorowania nieliniowości, a jedynie uzyskanie jej pewnych charakterystycznych kształtów. Najprostszymi tego typu układami są tak zwane diody i tranzystory lambda [1], [2], [3], posiadające fragmenty charakterystyki o ujemnej rezystancji dynamicznej. Elementy te w połączeniu z układami aktywnymi realizującymi operacje liniowe typu konwersji i sumowania pozwalają modelować bardziej złożone nieliniowości z wieloma odcinkami o ujemnym nachyleniu.

2. Analiza teoretyczna układu diody lambda

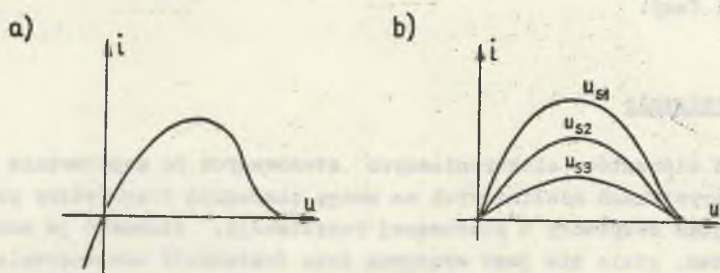
Układy diody i tranzystora lambda utworzone są wyłącznie z tranzystorów polowych złączowych o różnych typach konduktancji kanału i konfiguracjach połączeń przedstawionych na rys. 1. Ich charakterystyki prądowo-napięciowe mają kształt zbliżony do litery lambda, przy czym dla tranzystora zależą one dodatkowo od wartości napięcia u_g (rys. 2).

W celu przeprowadzenia analizy układów lambda wprowadzono uproszczony model tranzystora polowego złączowego zakładając, że jest on konduktancją sterowaną, o liniowej zmianie konduktancji w pewnym zakresie zmian napię-

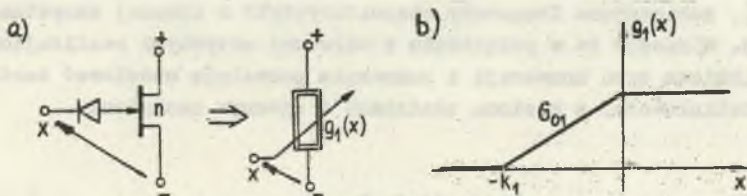
cia sterującego bramkę $u_g = x$. Na rysunkach 3 i 4 przedstawione są symbole zastępcze oraz uproszczone charakterystyki tranzystorów FET o kanale typu n oraz p.



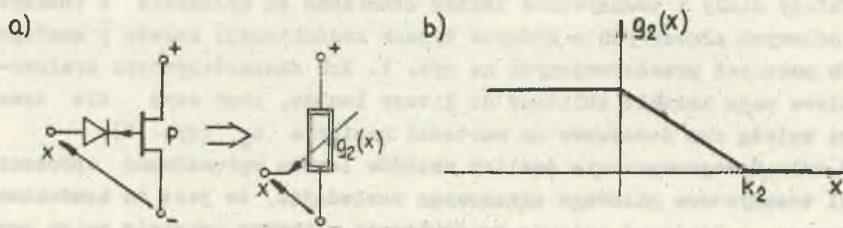
Rys. 1



Rys. 2



Rys. 3



Rys. 4

Charakterystyki te opisane są funkcjami $g_2(x)$ dla tranzystora typu p i $g_1(x)$ dla typu n.

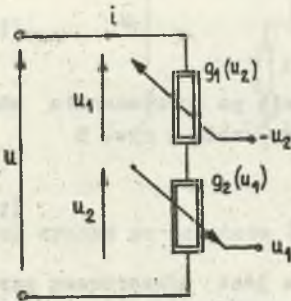
$$g_1(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x < -k \\ G_{01} \left(1 + \frac{x}{k_1}\right) & \text{dla } -k_1 \leq x \leq 0 \\ G_{01} & \text{dla } 0 < x \end{cases} \quad (1)$$

$$g_2(x) = \begin{cases} G_{02} & \text{dla } x < 0 \\ G_{02} \left(1 - \frac{x}{k_2}\right) & \text{dla } 0 \leq x \leq k_2 \\ 0 & \text{dla } k_2 < x \end{cases} \quad (2)$$

Parametry G_0 i k można wprowadzić jako:

G_0 - największa konduktancja statyczna kanału,

k - napięcie odcięcia kanału u_p .



Rys. 5

Schemat zastępczy diody lambda z rys.1a przedstawiony jest na rys. 5. W układzie tym przyjmuje się następujące zależności opisujące poszczególne konduktancje sterowane

$$g_1(u_2) = G_{01} + G_{01} \frac{u_2}{k_1} \quad (3)$$

$$g_2(u_1) = G_{02} - G_{02} \frac{u_1}{k_2} \quad (4)$$

Zależność między prądem i napięciem wyraża się relacją:

$$i = u \frac{g_1(-u_2)g_2(u_1)}{g_1(-u_2) + g_2(u_1)} \quad (5)$$

Branka tranzystora polowego T_1 (rys. 1) sterowana jest ujemnym napięciem, stąd " u_2 " w relacji (5) ma znak ujemny. Po wstawieniu wyrażeń (3) i (4) do równania (5) oraz zakładając, że zachodzi identyczność parametrów tranzystorów T_1 i T_2 , czyli:

$$G_{01} = G_{02} = G_0 \quad (6)$$

$$k_1 = k_2 = k, \quad (7)$$

otrzymano zależność:

$$i = G_0 \frac{\frac{1}{k} u_1 u_2 + 1 - \frac{1}{k}(u_2 + u_1)}{2 - \frac{1}{k}(u_2 + u_1)} \quad (8)$$

Uwzględniając równania wynikające z praw Kirchhoffa:

$$u_1 + u_2 = u \quad (9)$$

oraz

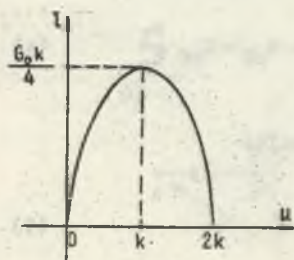
$$g_1(-u_2) \cdot u_1 = g_2(u_1) \cdot u_2 \quad (10)$$

otrzymuje się zależność:

$$u_1 = u_2 = \frac{u}{2} \quad (11)$$

Podstawiając wzór (11) do relacji (8) otrzymuje się po uproszczeniu charakterystykę prądowo-napięciową (12) modelu diody lambda z rys. 5

$$i = \frac{G_0}{4} u \left(2 - \frac{u}{k} \right) \quad (12)$$



Rys. 6

Charakterystyka ta jest odwzorowaną parabolą o miejscach zerowych $[0, 2k]$ i ekstremum

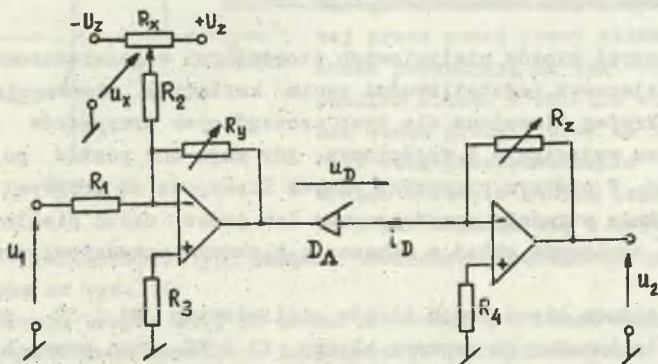
$$i_m = \frac{1}{4} G_0 k, \quad (13)$$

która dla prądów $i > 0$ jest dość dobrym przybliżeniem (rys. 6) wyznaczonej pomiarowo charakterystyki rzeczywistej diody lambda.

Jak wynika z przeprowadzonej przybliżonej analizy pracy diody lambda, największa konduktancja statyczna G_0 tranzystorów polowych ma wpływ tylko na prąd maksymalny diody, natomiast napięcie odcięcia kanału U_p wpływa zarówno na prąd maksymalny, jak i na szerokość całej charakterystyki.

3. Uniwersalny blok nieliniowy typu lambda

Wykorzystując przeanalizowany w punkcie 2 układ diody lambda, zrealizowano za pomocą dwóch wzmacniaczy operacyjnych czwórnik, którego charakterystyka napięciowo-napięciowa ma kształt typu lambda (rys. 7). Parametry tej charakterystyki zależą od zastosowanej diody lambda, czyli od G_0 i u_p oraz od wartości napięcia U_x i rezystorów R_y, R_z .



Rys. 7

Jak wynika ze schematu (rys. 7) napięcie na diodzie lambda ma wartość:

$$U_D = \frac{R_y}{R_1} (u_1 + u_x) \quad \text{dla } R_1 = R_2 \quad (14)$$

Natomiast prąd i_D zgodnie z relacją (12) i rys. 6 ma postać:

$$i_D = \begin{cases} 0 & \text{dla } u_D \leq 0 \\ \frac{1}{4} \cdot \frac{G_0}{K} u_D (2k - u_D) & \text{dla } 0 \leq u_D \leq 2k \\ 0 & \text{dla } u_D \geq 2k \end{cases} \quad (15)$$

Zatem uwzględniając wyrażenia (14) i (15) napięcie wyjściowe wynosi:

$$u_2 = i_D R_z = \frac{1}{4} \cdot \frac{G_0}{K} \cdot \frac{R_y R_z}{R_1} (u_1 + u_x) \left[2k - \frac{R_y}{R_1} (u_1 + u_x) \right] \quad (16)$$

Wyznaczając miejsca zerowe u_1' i u_1'' oraz ekstremum u_{2m} równania (16) otrzymuje się zależności kształtu charakterystyki napięciowo-napięciowej od parametrów układu.

$$u_1 = u_x \quad (17)$$

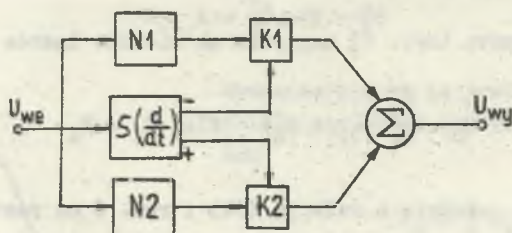
$$u_1 = 2k \frac{R_1}{R_y} u_x \quad (18)$$

$$u_{2m} = \frac{1}{4} k G_0 R_z \quad (19)$$

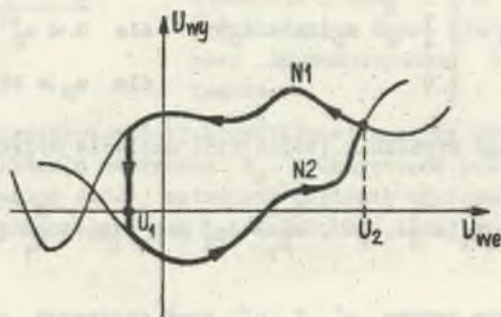
4. Układy nieliniowe z histerezą jako przykład zastosowania uniwersalnego bloku nieliniowego typu lambda

Charakterystyki bloków nieliniowych stosowanych w generatorach funkcyjnych lub powielaczach częstotliwości swoim kształtem odzwierciedlają w przybliżeniu krzywe Lissajous dla tych szczególnych przypadków fazy między przebiegiem wejściowym i wyjściowym, gdy mają one postać pojedynczej linii otwartej. W ogólnym przypadku krzywe Lissajous są krzywymi zamkniętymi, co istotnie utrudnia zamodelowanie ich przez układ nieliniowy. Aby tego dokonać, zbudowano układ o schemacie blokowym przedstawionym na rysunku 8.

Układ ten składa się z dwóch bloków nieliniowych N1 i N2 przyłączonych do wyjścia sumującego poprzez klucze K1 i K2. Stan pracy kluczy zależy od znaku pochodnej przebiegu wejściowego U_{we} wykrywanego przez

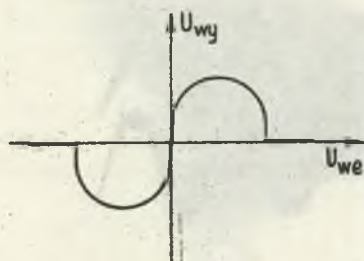


Rys. 8



Rys. 9

układ $\text{Sgn} \left(\frac{d}{dt} \right)$. Kształt wytworzonych w tym układzie charakterystyk przedstawiony jest na rys. 9. Stanowią one krzywą zamkniętą złożoną z części nieliniowości układu N1 i części nieliniowości układu N2. Szerokość tej krzywej zawiera się między wartościami: minimalną U_1 i maksymalną U_2 sygnału wejściowego, dla których pochodna tego sygnału zmienia swój znak.

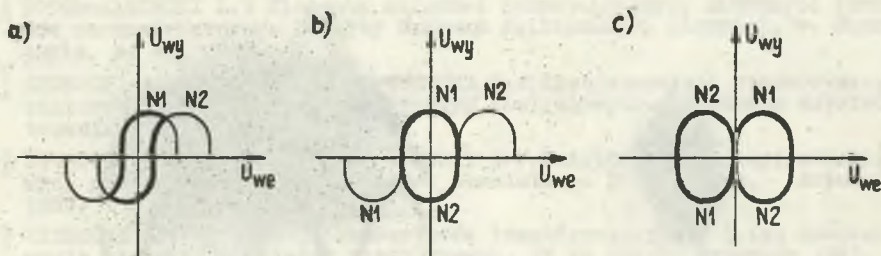


Rys. 10

Przejście punktu pracy z jednej krzywej na drugą odbywa się płynnie w punktach ich przecięcia oraz skokowo w pionie dla innych wartości U_{we} . Kierunek obiegu tak utworzonej krzywej zamkniętej przez punkt pracy zależy od znaku pochodnej; na jaki reagują załączeniem klucze i zmienia się przy zmianie stanu pracy kluczy na przeciwny.

W celu przeprowadzenia badań zbudowano układ, w którym każdy z członów N1 i N2 składał się z dwóch uniwersalnych bloków nieliniowych typu lambda, tworzących charakterystykę typu "S" przedstawioną na rys. 10.

Tak utworzone krzywe N1 i N2 można przesuwac i obracać względem układu współrzędnych tworząc określone konfiguracje pętli Lissajous. Przebadano trzy przypadki pracy układu: dwa jako przesuwnika fazy dla różnych kątów bez zmiany częstotliwości sygnału wyjściowego (rys. 11a,b) oraz jako podwajacza częstotliwości z przesunięciem fazy sygnału wyjściowego o około 90° (rys. 11c), przy czym w drugim przypadku dokonano inwersji krzywej N2 względem osi U_{we} .



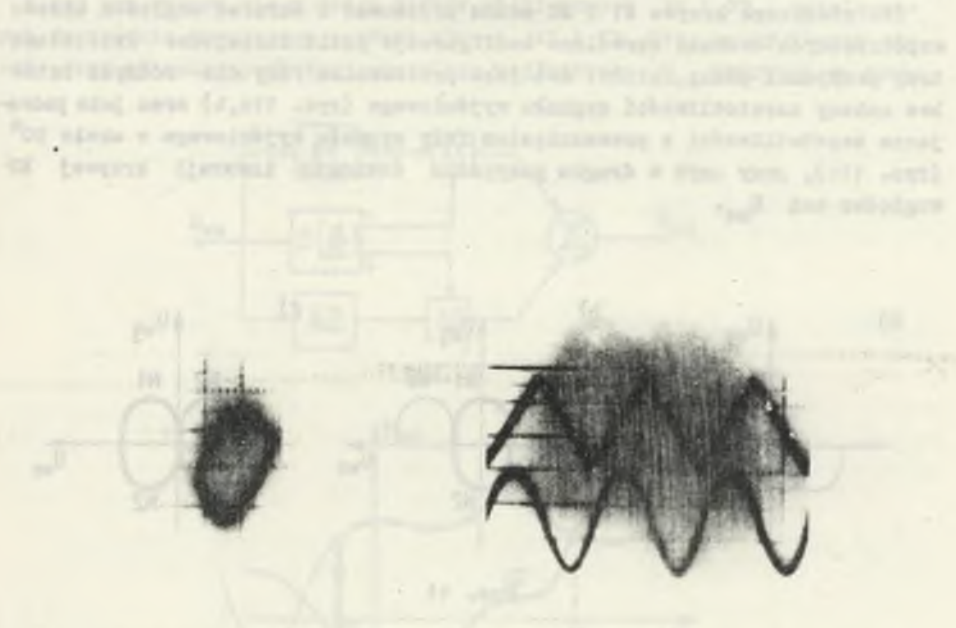
Rys. 11

Na rysunkach 12, 13 i 14 przedstawiono charakterystyki badanych układów sfotografowane na ekranie oscyloskopu oraz odpowiadające im przebiegi czasowe sygnałów wejściowych i wyjściowych. We wszystkich przypadkach na wejście podawany był sygnał o przebiegu trójkątnym, którego pochodna zmie-

nia znak skokowo, co pozwala wyraźnie określić momenty przełączenia klu-
czy K1 i K2 przez blok $Sgn(\frac{d}{dt})$ w układzie z rys. 8.



Rys. 12



Rys. 13



Rys. 14

LITERATURA

- [1] KANO G., IWASA H., TERAMOTO I.: The lambda diode: a versatile negative-resistance device. Electronics, vol. 48, No. 13, June 1975.
- [2] GRABOWSKI W.: Diody i tranzystory lambda - nowe elementy polowe o ujemnej rezystancji. Elektronika, Nr 2, 1976.
- [3] GRABOWSKI W.: Zastosowanie diod i tranzystorów lambda. Elektronika, Nr 2, 1977.
- [4] LEVENSTEIN H.: Theory of Networks of Linearly Variable Resistances. Procc IEEE, February 1958.
- [5] WEISS L.J.: Tranzystor polowy jako opór o wartości zmiennej liniowo w czasie. Elektronika, Nr 5, 1973.
- [6] TOPÓR-KAMIŃSKI L.: Elementy składowe rezystancyjnych aktywnych obwodów parametrycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Elektryka, z. 68, 1980.
- [7] CICHOCKI A., FILIPOWICZ S., OSOWSKI S.: Zastosowanie transformacji liniowych w syntezy charakterystyk nieliniowych. Archiwum Elektrotechniki, z. 4, 1978.
- [8] CICHOCKI A., FILIPOWICZ S., OSOWSKI S.: Modelowanie funkcji nieliniowych przy użyciu bloków wartości absolutnej. IV KK TOiUE, Drzonków 1981.
- [9] CICHOCKI A.: Realizacja konwerterów transformacyjnych i ich zastosowanie w syntezy układów nieliniowych. IV KK TOiUE, Drzonków 1981.
- [10] CHUNG Yu Wu, CHING Yuan Wu: The New General Realization Theory of FET-like Integrated Voltage-Controlled Negative Differential Resistance Devices, IEEE, CAS-28, No 5, May 1981, pp. 382-390.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Michał Tadeusiewicz

ПРИМЕНЕНИЕ ДИОДОВ ЛАМБДА К МОДЕЛИРОВКЕ НЕЛИНЕЙНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК С ГИСТЕРЕЗИСОМ

Резюме

Представлен анализ системы диода лямбда как параметрическую цепь по сопротивлению. Описан универсальный нелинейный блок с переходной функцией типа лямбда. Показана реализация нелинейной системы, характеристика которой имеет вид замкнутой кривой. На базе этой системы построены и исследованы нелинейные сдвигатели фазы.

THE USE OF LAMBDA DIODES FOR MODELING OF
NONLINEAR CHARACTERISTICS WITH HISTERESIS

Summary

The analysis of lambda diode as the time-varying resistance element was presented. The universal nonlinear block having the lambda type transfer function was described.

The realization of the nonlinear network having the characteristic of the shape of closed curve was shown. The nonlinear phase shifters were realized and examined using such network.