

Lesław TOPÓR-KAMIŃSKI

KONWERTOR IMPEDANCYJNY STEROWANY

Streszczenie. Podano modele teoretyczne i praktyczne konwerterów impedancyjnych o sterowanych współczynnikach konwersacji KIS, budowanych na bazie analogowego układu mnożącego. Pokazano realizację dwójników parametrycznych oraz filtru o sterowanej transmitancji z zastosowaniem układów KIS.

1. Wstęp

Realizacja praktyczna obwodów parametrycznych jest najczęściej dokonywana na bazie elementów o regulowanych parametrach, np.: fotorezystor, magnetorezystor, tranzystor polowy, wektor itp.

Elementy te bezpośrednio zastosowane do parametryzacji obwodów upraszczają ich strukturę, lecz wprowadzają wiele własnych cech ujemnych, takich jak: nieliniowość, bezwładność czasowa, ograniczona wielkość i polaryzacja sygnałów przenoszonych i sterujących oraz duża wrażliwość na zmiany temperatury otoczenia.

Różnorodność indywidualnych cech poszczególnych elementów utrudnia budowę układów parametrycznych w oparciu o jednolite ogólne modele, tak jak postępuje się w układach stacjonarnych.

Trudności tych można uniknąć, wprowadzając do teorii obwodów aktywnych idealny analogowy układ mnożący jako źródło podwójnie sterowane [1], [2], [3]

Wprowadzenie analogowego układu mnożącego komplikuje wprawdzie strukturę obwodu ze względu na złożoną budowę wewnętrzną mnożnika, lecz uzasadnione jest w przypadku zastosowania układu mnożącego scalonego lub zbudowanego na bazie innych liniowych układów scalonych.

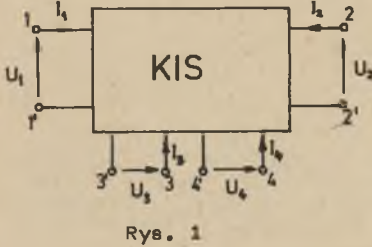
Analogowy układ mnożący pozwala realizować źródła podwójnie sterowane o zmiennych zaciskowych sterujących i wyjściowych zarówno napięciowych jak i prądowych [1]. Przy pomocy źródeł podwójnie sterowanych można budować takie układy, jak: impedancje sterowane, inwertyory sterowane, konwertery sterowane oraz filtry sterowane [1], [2], [3].

2. Definicja konwertora impedancyjnego sterowanego

Konwertor impedancyjny sterowany (KIS) jest w najogólniejszym przypadku obiektem o czterech parach zacisków (rys. 1). Rozpatrywany on jest mię-

dzy zaciskami 11' oraz 22' jako czwórnik o parametrach sterowanych zmiennymi zaciskowymi zacisków sterujących 33' oraz 44'.

Opisuje go macierz łańcuchowa (1), w której napięciowy współczynnik konwersji K_U jest funkcją jednej ze zmiennych zaciskowych zacisków 33', a prądowy współczynnik konwersji K_I jest funkcją prądu lub napięcia na zaciskach 44'.



Rys. 1

$$[A]_{KIS} = \begin{bmatrix} K_U(x_3) & 0 \\ 0 & K_I(x_4) \end{bmatrix} \quad (1)$$

W zależności od tego, który ze współczynników konwersji jest sterowany, rozróżnić można KIS mocy, prądowy i napięciowy (tablica 1).

Tablica 1

Lp	Macierz łańcuchowa	Nazwa KIS	Schemat blokowy	Lp	Macierz łańcuchowa	Nazwa KIS	Schemat blokowy
1	$K_U(U_3)$ 0 0 $K_I(U_3)$	Mocowy sterowany napięciami		8	1 0 0 $K_I(I_4)$	Prądowy sterowany prądem	
2	$K_U(U_3)$ 0 0 $K_I(I_4)$	Mocowy sterowany napięciem i prądem		9	$K_U(U_3)$ 0 0 K_I	Mocowo - napięciowy sterowany napięciem	
3	$K_U(I_3)$ 0 0 $K_I(U_4)$	Mocowy sterowany prądem i napięciem		10	$K_U(I_3)$ 0 0 K_I	Mocowo - napięciowy sterowany prądem	
4	$K_U(I_3)$ 0 0 $K_I(I_4)$	Mocowy sterowany prądami		11	K_U 0 0 $K_I(U_3)$	Mocowo - prądowy sterowany napięciem	
5	$K_U(U_3)$ 0 0 1	Napięciowy sterowany napięciem		12	K_U 0 0 $K_I(I_4)$	Mocowo - prądowy sterowany prądem	
6	$K_U(I_3)$ 0 0 1	Napięciowy sterowany prądem		13	$K_U(U)$ 0 0 $K_I(I)$	Mocowo - transform. sterowany napięciem	
7	1 0 0 $K_I(U_3)$	Prądowy sterowany napięciem		14	$K_U(I)$ 0 0 $K_I(I)$	Mocowo - transform. sterowany prądem	

W punkcie 13 i 14 tablicy 1 przedstawione są konwertyory, których współczynniki konwersji sterowane są tą samą zmienną zaciskową.

Jeżeli w przypadkach tych zajdzie:

$$K_U(x) = \frac{1}{K_I(x)} = m(x)$$

dla każdej wartości zmiennej zaciskowej x , to obiekty to można nazwać idealnymi transformatorami sterowanymi o sterowanej przekładni $m(x)$.

3. Realizacja konwertyorów impedancyjnych sterowanych z wykorzystaniem źródeł podwójnie sterowanych

W tablicach 2, 3 i 4 pokazano schematy ideowe konwertyorów impedancyjnych sterowanych napięciowych, prądowych i mocowych, zrealizowanych na bazie źródeł podwójnie sterowanych. W kolumnie drugiej podano zależności współczynników konwersji poszczególnych KIS w funkcji zmiennych zaciskowych sterujących.

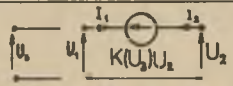
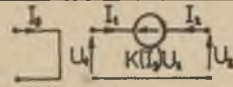

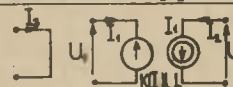
Przez zmianę zacisków 11' z zaciskami 22' otrzymuje się konwertyory sterowane o współczynnikach konwersji podanych w kolumnie trzeciej tablic 2, 3 i 4. Występujące w nich wielkości $k(U)$ oraz $k(I)$ są zależne od budowy źródeł podwójnie sterowanych i najczęściej mają postać:

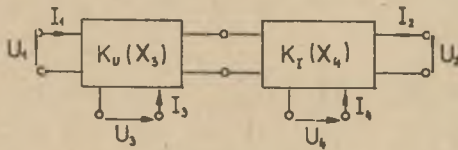
$$k(U) = \alpha U \quad \text{lub} \quad k(I) = \beta I,$$

gdzie:

α, β - wielkości stałe.

Tablica 2

KIS napięciowy			
Lp	Schemat	$K_U = A_n$	$K_U = B_n$
1		$K(U_2) + 1$	$\frac{1}{K(U_2) + 1}$
2		$K(I_2) + 1$	$\frac{1}{K(I_2) + 1}$
3		$K(U_2)$	$\frac{1}{K(U_2)}$
4		$K(I_2)$	$\frac{1}{K(I_2)}$



Rys. 2

Konwertor impedancyjny sterowany mocowy można także utworzyć przez łańcuchowe połączenie KIS napięciowego i KIS prądowego niezależnie od kolejności ich łączenia (rys. 2).

Tablica 3

LP	KIS prądowy		
	Schemat	$K_z = A_{21}$	$K_z = B_{21}$
1		$K(I_4) + 1$	$\frac{1}{K(I_4) + 1}$
2		$K(I_4) + 1$	$\frac{1}{K(I_4) + 1}$
3		$K(U_4)$	$\frac{1}{K(U_4)}$
4		$K(I_4)$	$\frac{1}{K(I_4)}$

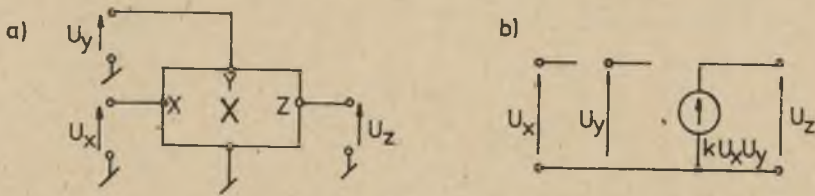
Tablica 4

LP	KIS mocy				
	Schemat	$K_s = A_{11}$	$K_s = A_{21}$	$K_s = B_{11}$	$K_s = B_{21}$
1		$K(U_3)$	$\frac{1}{K(U_4)}$	$\frac{1}{K(U_3)}$	$K(U_4)$
2		$K(U_3)$	$\frac{1}{K(I_4)}$	$\frac{1}{K(U_3)}$	$K(I_4)$
3		$K(I_3)$	$\frac{1}{K(U_4)}$	$\frac{1}{K(I_3)}$	$K(U_4)$
4		$K(I_3)$	$\frac{1}{K(I_4)}$	$\frac{1}{K(I_3)}$	$K(I_4)$

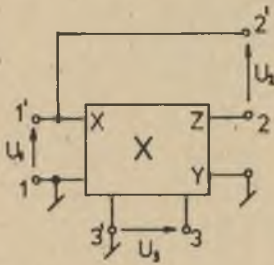
4. Układy rzeczywiste KIS

Konwertory impedancyjne sterowane rzeczywiste można zrealizować według schematów podanych w tablicach: 2, 3 i 4 przy pomocy wzmacniaczy operacyjnych oraz analogowego układu mnożącego.

Układ ten, przedstawiony schematycznie na rys. 2, można uważać za równoważny od źródła napięciowego podwójnie sterowanego napięciami [1] (rys. 3) o współczynniku proporcjonalności $k = \text{const}$ zależnym od konstrukcji wewnętrznej mnożnika.



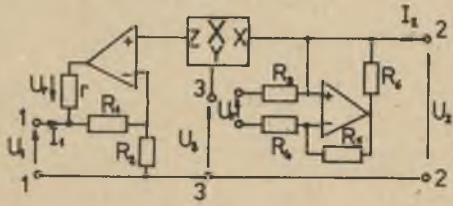
Rys. 3



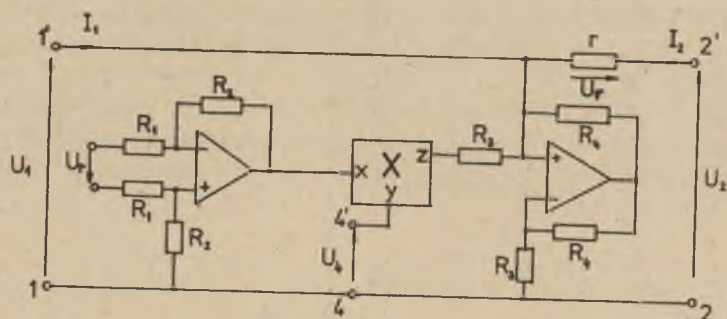
Rys. 4

Na rysunkach 4 i 5 przedstawione są układy rzeczywiste konwertorów sterowanych napięciowych, odpowiadające schematom w tabelicy 2 punkty 1 i 3, natomiast na rysunkach 6 i 7 konwertory sterowane prądowe, odpowiadające schematom w tabelicy 3 punkty 1 i 3.

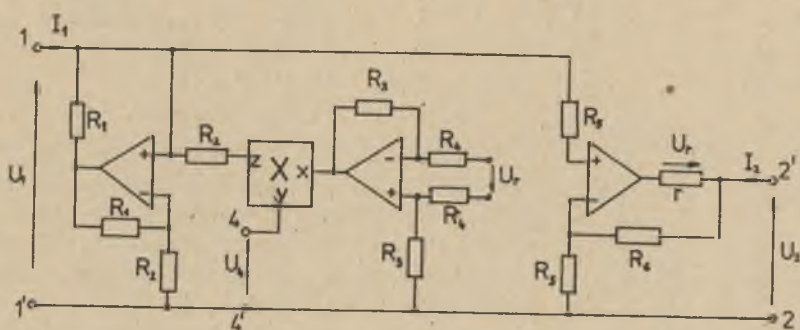
Układ rzeczywistego KIS mocowego według schematu pierwszego w tabelicy 4 przedstawiony jest na rys. 8. Aby otrzymać konwertory o współczynnikach sterowanych prądem należy do zacisków 33' lub 44' na rysunkach 4, 5, 6 i 7 dołączyć źródła napięciowe sterowane prądem.



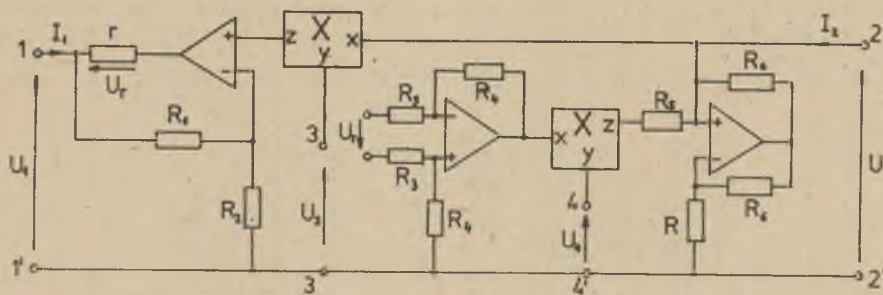
Rys. 5



Rys. 6



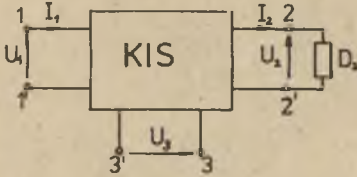
Rys. 7



Rys. 8

5. Dwójniki parametryczne z konwertyorami impedancyjnymi sterowanymi

Dwójnik parametryczny zrealizować można przy pomocy KIS prądowego lub napięciowego w układzie podanym na rys. 9. Widziany jest on od strony zacisków 11' KIS.



Rys. 9

Dwójnik D_2 dołączony do zacisków 22' jest dowolnym dwójnikiem stacjonarnym. Poniżej rozpatrzone zostaną przypadki gdy:

$D_2 = Z$ - jest dwójnikiem aktywnym typu impedancyjnego dowolnego rzędu n , dla którego zachodzi następująca relacja wiążąca napięcie z prądem:

$$u_2 = \sum_{k=0}^n z_k \frac{d^k i_2}{dt^k} \quad (2)$$

oraz gdy:

$D_2 = Y$ - jest dwójnikiem aktywnym typu admitancyjnego dowolnego rzędu n , który opisuje relacja:

$$i_2 = \sum_{k=0}^n y_k \frac{d^k u_2}{dt^k} \quad (3)$$

gdzie: u_2 , i_2 są funkcjami czasu t .

Dla KIS napięciowego prąd i napięcie na zaciskach 11' (rys. 8) związane są z prądem i napięciem zacisków 22' relacjami:

$$i_2 = i_1, \quad u_2 = K_U u_1 \quad (4)$$

gdzie:

$$K_U = F_U(u_3) = K_U(t) - \text{bowiem } u_3 = u_3(t).$$

Wstawiając powyższe relacje do równań (2) i (3) otrzymuje się równania opisujące dwójnik parametryczny $D_1(t)$:

$$u_1 = \frac{1}{K_U} \sum_{k=0}^n z_k \frac{d^k i_1}{dt^k} \quad (5)$$

dla $D_2 = Z$, oraz

$$i_1 = \sum_{k=0}^n y_k \frac{d^k K_U u_1}{dt^k} = \sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^k y_k \binom{k}{l} \frac{d^l K_U}{dt^l} \frac{d^{k-l} u_1}{dt^{k-l}} \quad (6)$$

dla $D_2 = Y$, gdzie: $\binom{k}{l} = \frac{k!}{l!(k-l)!}$

Dla KIS prądowego zachodzą następujące relacje wiążące prądy i napięcia zacisków 11' i 22':

$$i_2 = K_I i_1, \quad u_2 = u_1, \quad (7)$$

gdzie: $K_I = F_I(u_3) = K_I(t)$, gdzie $u_3 = u_3(t)$.

Uwzględniając (7) w równaniach (2) i (3) otrzymuje się:

$$u_1 = \sum_{k=0}^n z_k \frac{d^k [K_I i_1]}{dt^k} = \sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^k z_k \binom{k}{l} \frac{d^l K_I}{dt^l} \frac{d^{k-l} i_1}{dt^{k-l}} \quad (8)$$

dla $D_2 = Z$

oraz:

$$i_1 = \frac{1}{K_I} \sum_{k=0}^n y_k \frac{d^k u_1}{dt^k} \quad (9)$$

dla $D_2 = Y$.

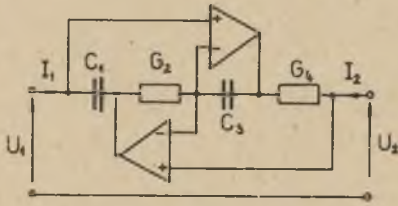
Powyższe relacje wskazują na dogodność parametryzacji dwójnika typu impedancyjnego przy użyciu KIS napięciowego oraz dwójnika typu admitancyjnego przy użyciu KIS prądowego. W pozostałych przypadkach w symulowanym dwójniku parametrycznym występuje zjawisko generacji dodatkowych składników rzędów niższych od najwyższego rzędu dwójnika D_2 .

Składniki te zależą od rodzaju funkcji sterującej $K = f(t)$. W szczególnym przypadku, gdy $K = f(t) = At + B$ jest liniową funkcją czasu, wszystkie dodatkowo wygenerowane składniki dwójnika parametrycznego są stałe. Zjawisko to jest korzystne w przypadku zastosowania rozpatrywanych układów w urządzeniach wobulowanych przebiegiem piłowym. Parametryzacja idealnych elementów typu rezystancji i konduktancji nie wywołuje generacji dodatkowych składników niezależnie od typu funkcji $K = f(t)$.

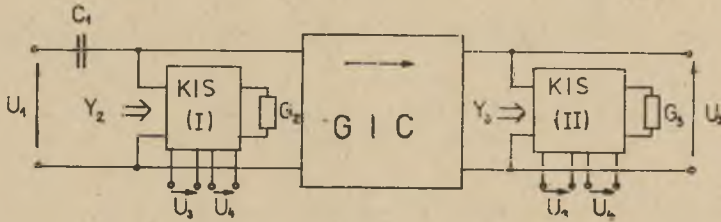
6. Filtr sterowany

Zastosowanie konwertyorów impedancyjnych sterowanych w układach aktywnych stacjonarnych pozwala na budowę czwórników o transmitancjach zmiennych sygnałem zewnętrznym. Przykładem takiego układu jest filtr pasmowy z

rys. 11, zrealizowany na bazie uogólnionego konwertyora impedancyjnego GIC [4]. Uogólniony konwertyor impedancyjny opisuje macierz łańcuchowa (10), a realizowany jest najczęściej z dwóch wzmacniaczy operacyjnych według schematu z rys. 10.



Rys. 10



Rys. 11

$$[A]_{GIC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & K s^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

gdzie:

- s - pulsacja zespolona,
- K - stała rzeczywista.

Przedstawiony filtr posiada transmitancję:

$$H(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{sC_1}{Y_3 K s^2 + sC_1 + Y_2} \quad (11)$$

Poprzez sterowanie napięciami U_3 i U_4 współczynników konwersji konwertyorów mocy KIS(I) oraz KIS(II) można zmieniać admitancje Y_2 i Y_3 , a tym samym zmieniać częstotliwość środkową filtru oraz jego dobroć. Aby zrealizować niezależne przestrajanie tych dwóch parametrów należy użyć konwertyory impedancyjne sterowane o macierzach łańcuchowych (12), (13):

$$[A]_{(I)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k(U_4)} & 0 \\ 0 & k(U_3) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[A]_{II} = \begin{bmatrix} k(U_4) & 0 \\ 0 & k(U_3) \end{bmatrix} \quad (13)$$

w których:

$$k(U_3) = \alpha U_3$$

$$k(U_4) = \beta U_4$$

Dla takiego doboru współczynników konwersji admitancje wejściowe konwerterów sterowanych wynoszą:

$$Y_2 = \alpha \beta U_3 U_4 G_2 \quad (14)$$

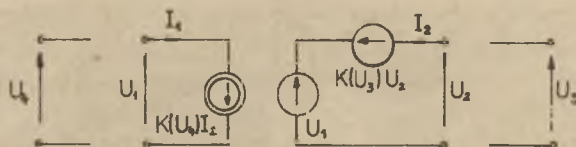
$$Y_3 = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{U_4}{U_3} G_3. \quad (15)$$

Zatem częstotliwość środkową i dobroć filtra określają relacje:

$$\omega_0 = \omega_0(U_3) = \sqrt{\frac{Y_2}{KY_3}} = U_3 \alpha \sqrt{\frac{G_2}{KG_3}} \quad (16)$$

$$Q = Q(U_4) = \frac{KY_2 Y_3}{C_1} = U_4 \beta \sqrt{\frac{KG_2 G_3}{C_1}}. \quad (17)$$

Jako KIS (I) może być zastosowany układ z tablicy 4 punkt 1, natomiast KIS (II) może być zrealizowany zgodnie z zasadą podaną na rys. 2 według schematu z rys. 11, przy założeniu $k(U_3) = \alpha U_3 = 1$.



Rys. 12

Jeżeli nie zachodzi konieczność sterowania dobrocią Q a jedynie częstotliwością środkową ω_0 , to w filtrze z rys. 10 można zastosować KIS(I) i KIS(II) o macierzach łańcuchowych (18) i (19).

$$[A]_{(I)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & k(u_3) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$[A]_{(II)} = \begin{bmatrix} k(u_3) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

W tym przypadku częstotliwość środkowa ω_0 jest także opisana relacją (16), a dobroć Q ma wartość stałą. Filtr taki o stałej bezwzględnej szerokości pasma przepuszczania i sterowanej częstotliwości środkowej może być zastosowany do automatyzacji pomiaru składowych harmonicznym widma badanych sygnałów.

7. Wnioski

Konwertyor impedancyjny sterowany, zbudowany na bazie analogowego układu mnożącego, pozwala parametryzować zadany dwójnik poprzez sterowanie prądem lub napięciem, przy czym otrzymany efekt w obu przypadkach jest zasadniczo różny. Dwójniki sterowane pozwalają z kolei budować układy o transmitancjach, których własności są zmieniane sygnałami zewnętrznymi.

LITERATURA

- [1] Topór-Kamiński L.: Analogowy układ mnożący jako element teorii obwodów. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Elektryka z. 54, 1976.
- [2] Bruton L.T.: Electronically Tunable Analog Active Filters. IEEE Trans. Circuit Theory, May 1972.
- [3] Tietze U., Schenk Ch.: Analogmultiplizierer mit Stromverteilungssteuerung. Elektronik 20, 1971.
- [4] Bruton L.T.: Biquadratic Sections using Generalized Impedance Converters. The Radio and Electronic Engineer, Vol. 41, No 11, November 1971.

Przyjęto do druku w czerwcu 1977 r.

УПРАВЛЯЕМЫЙ КОНВЕРТОР ИМПЕДАНСА

Резюме

Передано теоретические и практические модели конверторов импеданса с управляемыми коэффициентами конверсии построенных с применением аналогового умножителя. Указано осуществление параметрических двухполюсников, а также фильтра с управляемой передаточной функцией с применением управляемых конверторов.

CONTROLLED IMPEDANCE CONVERTOR

Summary

Theoretical and practical models of the impedance convertors with controlled non-unity conversion ratio, built on the basis of analog multiplier, were shown. Realization of the time varying one ports and the filter with controlled transfer function with the use of controlled impedance convertors was shown.