

Adam BŁASZKOWSKI
Instytut Elektroniki
Politechniki Śląskiej

PRZETWORNIKI IMPEDANCJI Z PRZETWARZANIEM PRĄDU

Streszczenie. Monolityczne filtry aktywne projektowane są obecnie na zakres częstotliwości od 1 do 200 MHz. Wspólną cechą tych układów jest wykorzystanie prądu jako aktywnej zmiennej obwodu. Elementami syntezy wykorzystywanymi często przez projektantów są przetworniki impedancji. W artykule omówiono podstawowe właściwości prądowych układów analogowych i ich zastosowanie do budowy przetworników impedancji.

Current mode impedance converters

Summary. Recently, several types of monolithic active filters in the frequency range of 1 to 200 MHz have been reported. Considering current rather than voltage as the active circuit parameter is a common feature of such circuits. Filter designers often use impedance converters and inverters as active elements. This paper describes basic properties of current mode analogue circuits and their application in impedance converters and inverters.

Über die Übersetzerschaltungen in Stromtechnik

Zusammenfassung. Die monolithischen Aktivfilter werden gegenwärtig für den Frequenzbereich 1 bis 200 MHz gebaut. Das Hauptmerkmal dieser Schaltungen ist die Verwendung des Stromes als aktiver Netzwerkvariable. Als Aktivelemente werden oft die Übersetzerschaltungen angewandt. Im Vortrag werden die grundlegenden Eigenschaften der analogen Stromschaltungen und deren Anwendung in der Übersetzerschaltungstechnik vorgestellt.

1. WSTĘP

Zakres częstotliwości pracy typowych przetworników immitancji wykorzystujących napięcie jako aktywną zmienną obwodu nie przekracza kilku MHz, a typowe zastosowania mieszczą się w paśmie 1 Hz - 100 kHz. Zakres ten można znacznie poszerzyć wykorzystując prąd jako aktywną zmienną obwodu, związaną z przetwarzanym sygnałem.

Zastosowanie symetrycznych układów prądowych umożliwia realizację monolitycznych filtrów aktywnych z przetwornikami impedancji pracujących w zakresie 1 - 200 MHz [1,2,3]. Podstawowymi układami, z których budowane są przetworniki impedancji lub bezpośrednio filtry, są dokładne zwierciadła prądowe i specjalne wzmacniacze prądowe zwane konweyorami (ang. current conveyors). Układy konweytorów prądowych II generacji (ang. CCII) wykonane jako komplementarne, bipolarnie układy scalone zostały z powodzeniem zastosowane w praktyce [4]. Zaproponowano również operacyjny wzmacniacz prądowy (ang. OCA), układ bardziej uniwersalny od tradycyjnego wzmacniacza operacyjnego [5].

W klasie analogowych filtrów ciągłych generalnie preferowana jest metoda oparta na wzmacniaczach transkonduktancyjnych (ang. OTA) i pojemności. Powstają wówczas tzw. filtry transkonduktancyjno - pojemnościowe (g_m -C), ale ich zastosowania przemysłowe były do niedawna dość rzadkie [11].

Alternatywą dla układów z przełączanymi pojemnościami są układy z przełączaniem prądu (ang. SI). Podobnie jak w ciągłych układach prądowych zmienną aktywną jest tu prąd, a o dokładności decyduje dokładność odmierzenia czasu, a nie stosunek pojemności. Układy takie są zbudowane wyłącznie z tranzystorów MOS pracujących jako klucze i źródła prądowe, z równoczesnym pamiętaniem napięć na pojemnościach C_{gs} tranzystorów. Częstotliwości graniczne układów z przełączaniem prądu mogą sięgać 300 MHz. Podstawowym elementem stosowanym w technice przełączania prądu jest integrator.

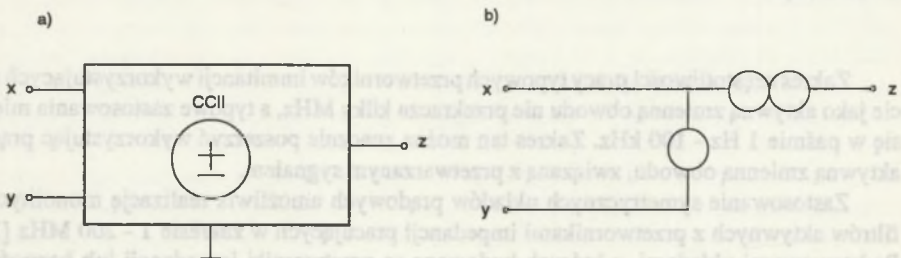
2. ELEMENTY AKTYWNE W TECHNICIE PRZETWARZANIA PRĄDU

2.1. Konweyor (wzmacniacz prądowy) II generacji (ang. current conveyor II, CCII) [7]

Wzmacniacz prądowy II generacji jest trójnikiem opisanym macierzą hybrydową

$$\begin{bmatrix} i_y \\ u_z \\ i_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_y \\ i_z \\ u_x \end{bmatrix}$$

Jego symbol graficzny i nulutorowo-noratorowy schemat zastępczy przedstawia rys.1. Prąd wyjściowy i_z konwejora zależy tylko od prądu wejściowego wpływającego do zacisku x. Prąd ten może wpływać bezpośrednio do zacisku x lub też może być wywołany działaniem napięcia u_y na impedancję dołączoną do zacisku x. W konweyorze II generacji do wejścia y nie wpływa żaden prąd. Znak parametru h_{32} informuje, czy konweyor jest wzmacniaczem odwracającym



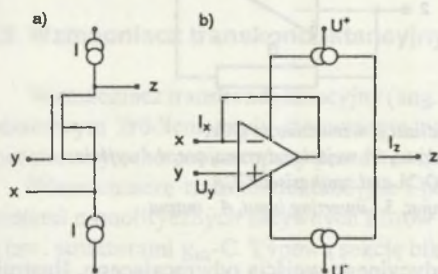
Rys. 1. Wzmacniacz prądowy (konweyor) II generacji

a) symbol graficzny b) nulutorowo-noratorowy schemat zastępczy

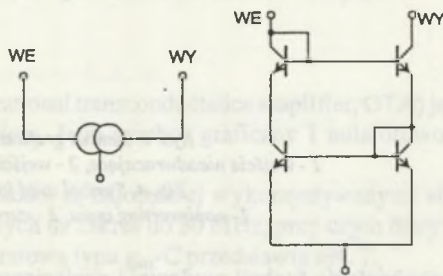
Fig. 1. Current conveyor II a) symbol of CCII b) nullator-norator representation

(CCII-), czy nieodwracającym (CCII+). Konwejer II generacji jest więc wtórnikiem prądowym o wzmacnieniu jednostkowym i dodatkowej właściwości polegającej na tym, że potencjał wejścia prądowego można ustalać za pomocą zacisku y o nieskończonej impedancji wejściowej.

Rys. 2a przedstawia jedną z najprostszych realizacji konwejera, w której tranzystor MOS działa jako wtórnik źródłowy dla obwodu bramka-źródło, a jako wtórnik prądowy między źródłem i drenem. Rys.2b przedstawia realizację z wykorzystaniem wzmacniacza operacyjnego i dwu luster prądowych. Symbol graficzny i schemat ideowy 4-tranzystorowego lustra prądowego przedstawia rys.3.



Rys. 2. Realizacje układowe konwejera CCII
Fig. 2. Implementations of CCII



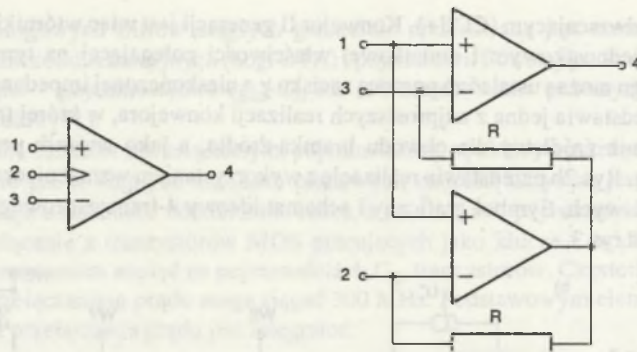
Rys. 3. Symbol i schemat lustra prądowego zbudowanego na 4 tranzystorach
Fig. 3. Symbol and 4 transistor current mirror

Prąd wyjściowy wzmacniacza operacyjnego jest mierzony w wyprowadzeniach zasilania i doprowadzony do zacisku wyjściowego z, gdzie jest sumowany. Układ z rys. 2b jest konwejorem CCII+, ponieważ prądy i_x i i_z mają ten sam zwrot (fazę). Konwejer CCII- można uzyskać dołączając na krzyż na wyjściu dwa dodatkowe lustra prądowe. Zacisk y układu z rys. 2b jest stabilny zwarcioowo, a zacisk x rozwarciowo. W odróżnieniu od układów napięciowych konwejer należy obciążać bardzo małymi rezystancjami, ideałem jest zwarcie wyjścia. Scalony konwejer CCII PA 630A [4] składa się z dwu wzmacniaczy buforujących o wzmacnieniu jednostkowym, zwierciadła prądowego i bloku wzmacniacza prądowego. Zrealizowany jest w komplementarnej technice bipolarnej i przenosi pasmo częstotliwości 18 MHz. Typowa impedancja wyjściowa wynosi 3 M Ω i po dołączeniu zewnętrznych tranzystorów polowych złączowych można ją zwiększyć do 100 M Ω . Parametry układu PA 630A są na tyle obiecujące, że ma on szerokie możliwości zastosowania w praktyce.

2.2. Operacyjny konwejer prądowy [5]

Operacyjny konwejer prądowy (ang. operational conveyor amplifier, OCA) jest elementem podobnym do tradycyjnego, napięciowego wzmacniacza operacyjnego, ale znacznie bardziej uniwersalny. Jego symbol graficzny i realizację na wzmacniaczach operacyjnych przedstawia rys. 4.

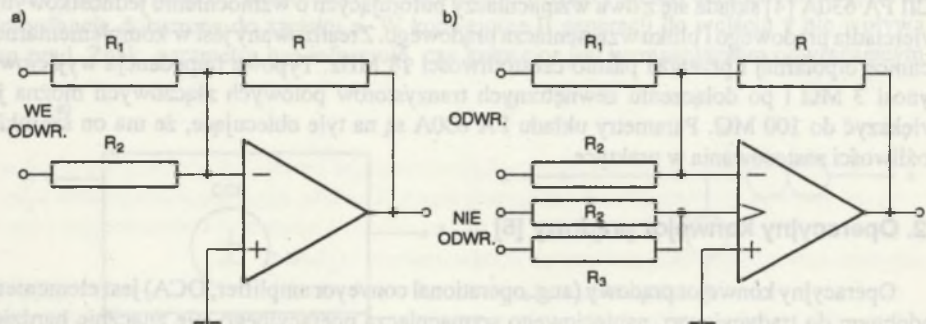
Operacyjny konwejer prądowy ma oprócz wejść odwracającego i nieodwracającego, występujących w tradycyjnym wzmacniaczu operacyjnym, trzecie wejście o niskiej impedancji i potencjałe równym potencjałowi wejścia nieodwracającego. Prąd wpływający do tego zacisku ma zmienianą polaryzację i dodawany jest do wejścia odwracającego. Następuje tu więc



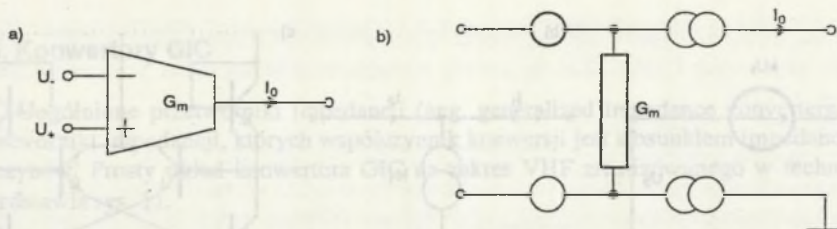
Rys. 4. Symbol graficzny i realizacja wzmacniacza OCA
 1 - wejście nieodwracające, 2 - wejście prądowe, 3 - wejście odwracające, 4 - wyjście
 Fig. 4. Symbol used for the OCA and synthesised OCA
 1 - noninverting input, 2 - current input, 3 - inverting input, 4 - output

rozdzielenie funkcji prądowej i napięciowej tradycyjnego wejścia odwracającego. Ilustruje to rys. 4, przy czym synteza wzmacniacza OCA na dwu tradycyjnych wzmacniaczach operacyjnych nie jest rozwiązaniem optymalnym. Działanie operacyjnego konweyora prądowego OCA zilustrujemy na przykładzie klasycznego sumatora analogowego przedstawionego na rys.5a. Zastąpienie wzmacniacza operacyjnego konweyorem OCA (rys. 5b) umożliwi łatwą realizację układu odejmującego - dodającego. Wejście prądowe ma potencjał masy pozornej i realizuje sumowanie prądów, a więc sumowanie napięć wejściowych bez odwracania znaku.

Konweytor OCA umożliwi łatwą realizację wielu układów, zapewnia osiągnięcie większego tłumienia sygnałów wspólnych i może znaleźć zastosowanie jako element filtrów aktywnych.



Rys. 5. a) Konwencjonalny sumator b) Sumator z wykorzystaniem operacyjnego konweyora prądowego OCA
 Fig. 5. a) Conventional summing amplifier b) OCA as a summing amplifier

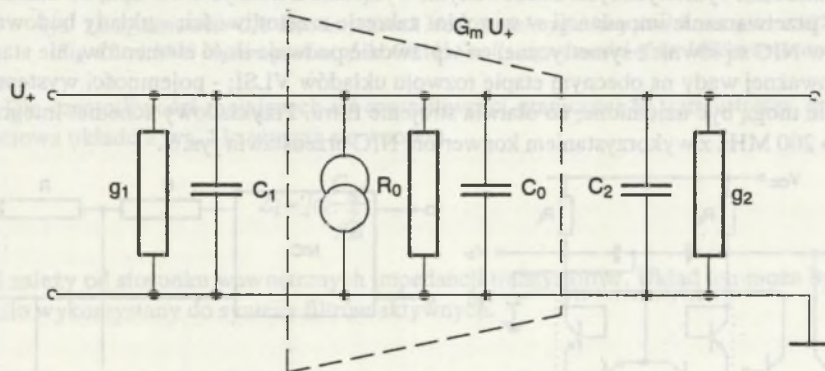


Rys.6 a) Symbol graficzny b) nulatorowo - noratorowy schemat zastępczy wzmacniacza transkonduktancyjnego
 Fig.6 a) Circuit symbol b) nullator - norator model of the operational transconductance amplifier

2.3. Wzmacniacz transkonduktancyjny

Wzmacniacz transkonduktancyjny (ang. operational transconductance amplifier, OTA) jest różnicowym źródłem prądu sterowanym napięciem. Jego symbol graficzny i nulatorowo - noratorowy schemat zastępczy przedstawia rys. 6.

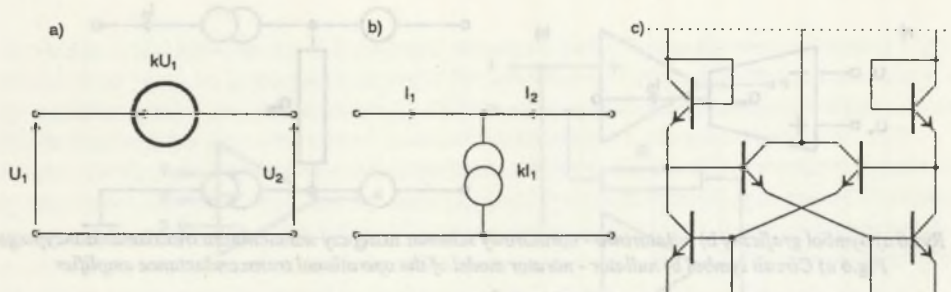
Wzmacniacze transkonduktancyjne i pojemności są najczęściej wykorzystywanymi elementami monolitycznych aktywnych filtrów ciągłych na zakres do 30 MHz, przy czym filtry te są tzw. strukturami g_m -C. Typową sekcję bikwadratową typu g_m -C przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Typowa sekcja bikwadratowa g_m -C
 Fig. 7. Typical section of the biquadratic g_m -C filter

2.4. Konwertyory ujemnoimpedancyjne

Konwertyory ujemnoimpedancyjne (ang. negative impedance converters, NIC) to jedne z najstarszych elementów aktywnych stosowanych w syntezie filtrów aktywnych. Zaliczane są do grupy tzw. przetworników impedancji i były często stosowane w początkowym okresie rozwoju filtrów aktywnych, we wczesnych latach 50. Obecnie konwertyory ujemnoimpedancyjne są wykorzystywane w syntezie monolitycznych filtrów aktywnych na zakres od 1 do 200 MHz [1,2]. Stanowią one elementy zyratorów lub służą do kompensacji strat integratorów. Na rys. 8

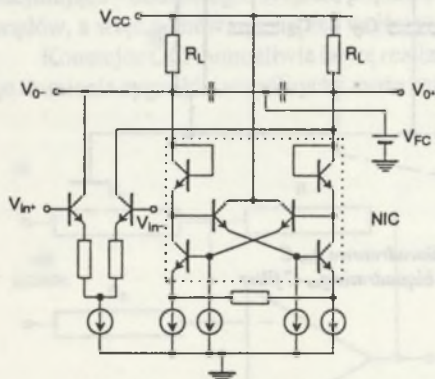


Rys. 8. Schematy zastępcze konwertora NIC

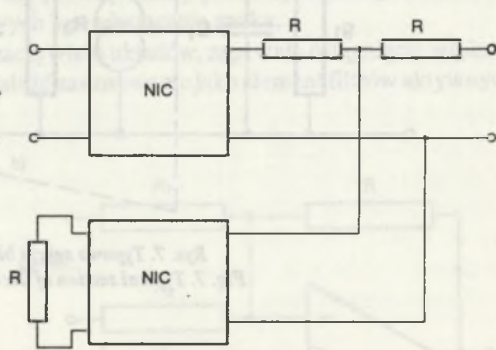
a) z inwersją napięcia (UNIC) b) i inwersją prądu (INIC) c) Realizacja konwertora NIC na zakres VHF
 Fig. 8. Equivalent circuits of a) voltage - and b) current - type NIC c) Circuit diagram of VHF NIC

przedstawiono schemat zastępczy konwertora NIC z inwersją napięcia i prądu oraz schemat ideowy konwertora NIC na zakres VHF [1].

Współczesne konwertory NIC na zakres VHF charakteryzują się następującymi cechami [1]: - są układami symetrycznymi zbudowanymi wyłącznie z tranzystorów npn, co umożliwia dokładne przetwarzanie impedancji w szerokim zakresie częstotliwości; - układy budowane z elementów NIC są również symetryczne, co wprawdzie podwaja ilość elementów, nie stanowi jednak poważnej wady na obecnym etapie rozwoju układów VLSI; - pojemności występujące w układzie mogą być uziemione, co ułatwia strojenie filtra. Przykładowy schemat integratora na pasmo 200 MHz z wykorzystaniem konwertora NIC przedstawia rys. 9.



Rys. 9. Integrator z konwerterem ujemnoimpedancyjnym
 Fig. 9. NIC - integrator



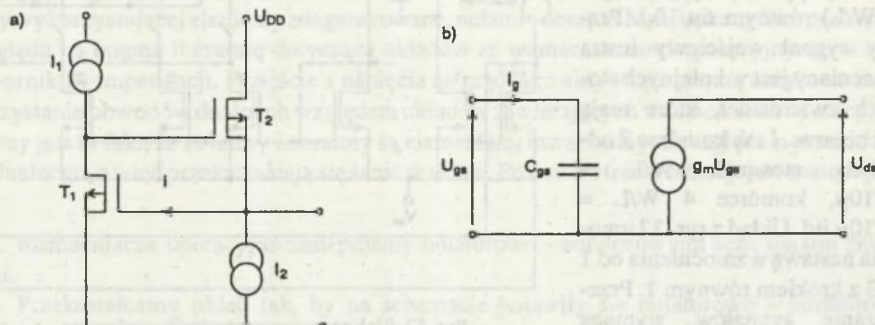
Rys. 10. Żyrator z konwerterem ujemnoimpedancyjnym
 Fig. 10. NIC-based gyrator

Konwertor NIC przedstawiony na rys. 9 może zostać również wykorzystany do realizacji żyrotora. Żyrator z konwerterem NIC przedstawiony jest na rys. 10.

Idea ta nie jest nowa, może być jednak z powodzeniem wykorzystana do budowy monolitycznych, ciągłych filtrów aktywnych na zakres od 1 do 200 MHz [2].

2.5. Konwertyory GIC

Uogólnione przetworniki impedancji (ang. generalized impedance converters, GIC) to przetworniki impedancji, których współczynnik konwersji jest stosunkiem impedancji lub ich iloczynów. Prosty układ konwertora GIC na zakres VHF zrealizowanego w technice MOS przedstawia rys. 11.



Rys. 11. a) Konwertyor GIC na tranzystorach MOS b) Małosygnalowy model tranzystora MOS
Fig. 11. a) MOS implementation of the GIC b) Small - signal model of the MOS transistor

Dla częstotliwości mniejszych od częstotliwości granicznej f_T tranzystorów impedancja wejściowa układu z rys. 11a wyraża się wzorem

$$Z_i = j\omega \frac{C_{gs}}{g_m}$$

czyli zależy od stosunku wewnętrznych impedancji tranzystorów. Układ ten może być bezpośrednio wykorzystany do syntezy filtrów aktywnych.

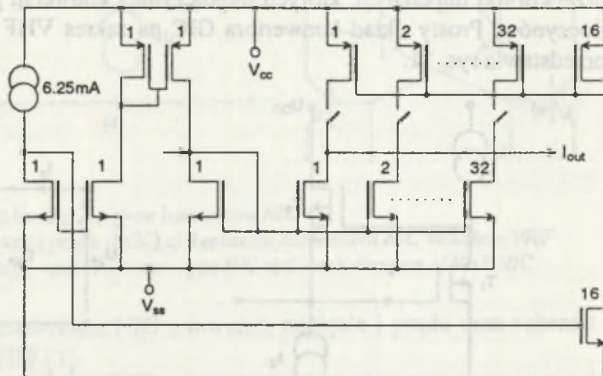
2.6. Technika przełączania prądu

Technika przełączania prądu (ang. switched current, SI) stanowi atrakcyjną alternatywę dla układów z przełączanymi pojemnościami (SC). Obwody SI można uważać za układy przetwarzające ładunki $Q=I \times t$, podczas gdy układy SC przetwarzają wielkość $Q=C \times U$. Dzięki temu zmienną roboczą nie jest tu napięcie, lecz prąd, a o dokładności decyduje nie stosunek pojemności, ale czas. Układy SI bazują głównie na integratorze SI o dużej szerokości pasma, sięgającej 300 MHz. Podstawowymi elementami układów z przełączaniem prądu są:

- klucze;
- niesterowane i sterowane źródła prądowe;
- rezystory;
- tranzystory MOS.

Wzmacnianie prądu jako zmiennej roboczej realizowane jest za pomocą szerokopasmowych lusterek prądowych CMOS. Zasadę zmiany wzmocnienia bloku lusterek prądowych MOS ilustruje rys. 12 [13].

Tranzystory oznaczone symbolem 1 stanowią jednostkowe komórki układu o stosunku szerokości kanału do jego długości (W/L) równym $6\mu/10\mu$. Prądowy sygnał wejściowy lustro wzmacniany jest w kolejnych stopniach zwierciadeł, które mają wagi binarne. I tak komórce 2 odpowiada stosunek $W/L = 12\mu/10\mu$, komórce 4 $W/L = 24\mu/10\mu$ itd. Układ z rys. 12 umożliwia nastawę wzmocnienia od 1 do 63 z krokiem równym 1. Przetwarzanie sygnałów wymaga czterech podstawowych operacji: zmiany znaku, sumowania, skalo-

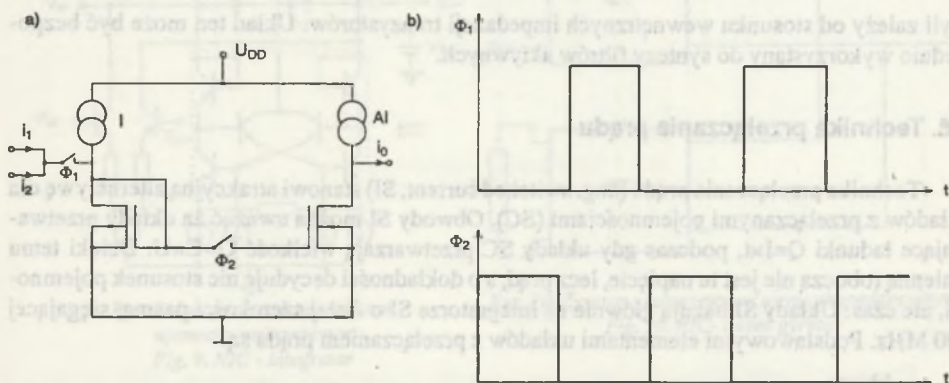


Rys. 12. Blok nastawy wzmocnienia prądowego
Fig. 12. Current amplification programming block

wania i opóźnień w czasie. Podstawowa komórka SI przedstawiona na rys. 13, sterowana nie nakładającymi się przebiegami zegara dwufazowego, realizuje zależność

$$i_0(n) = -A[i_1(n-1) + i_2(n-1)]$$

Można ją więc wykorzystać do realizacji przetwarzania sygnałów.



Rys. 13. a) Komórka SI I generacji b) Dwufazowy zegar o nie nakładających się przebiegach
Fig. 13. a) First generation switched-current cell b) Two phase non-overlapping clocks

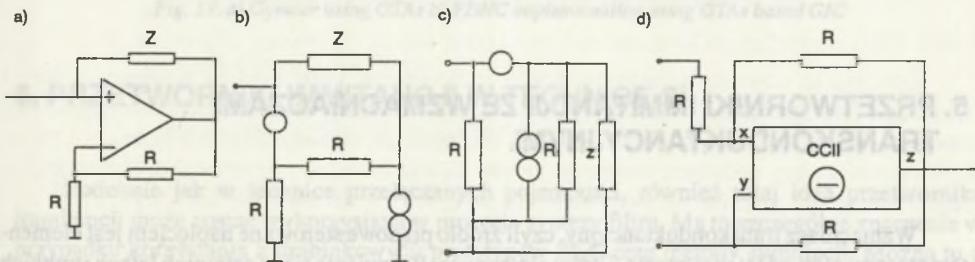
3. TRANSFORMACJA OBWODU NAPIĘCIOWEGO NA PRĄDOWY [10,11]

Przekształcenie obwodu napięciowego zawierającego wzmacniacze operacyjne na obwód prądowy zawierający elementy CCII lub wzmacniacze transkonduktancyjne można zrealizować korzystając z ogólnych zasad podobieństwa obwodów elektrycznych [10] i wynikającej z nich metody wykorzystującej elementy zdegenerowane, nulator i norator. Ma to szczególne znaczenie ze względu na bogatą literaturę dotyczącą układów ze wzmacniaczami operacyjnymi, w tym przetworników impedancji. Przejście z napięcia na prąd jako aktywną zmienną układu narzuca wykorzystanie obwodów dualnych względem układów zawierających wzmacniacze operacyjne. Pomocny jest tu fakt, że nulatory i noratory są elementami inwariantnymi względem przekształcenia dualnego, a więc przekształcają się same w siebie. Procedura transformacji jest następująca [11]:

1. Wzmacniacze operacyjne zastępujemy nulatorowo - noratorowymi schematami zastępczymi.
2. Przekształcamy układ tak, by na schemacie pojawiły się nulatorowo - noratorowe schematy zastępcze docelowych elementów aktywnych, w naszym przypadku konwejerów CCII lub wzmacniaczy OTA.
3. Dokonujemy przekształcenia dualnego struktury obwodu z konwersją/inwersją elementów (warunkiem jest tu planarność obwodu).
4. Przekształcamy układ zgodnie z punktem 2.
5. Nulatorowo - noratorowe schematy zastępcze zastępujemy symbolami elementów CCII lub OTA.

Zilustrujemy to na przykładzie konwertora ujemnoimpedancyjnego UNIC zbudowanego na wzmacniaczu operacyjnym.

Rys. 14 przedstawia kolejne kroki procedury transformacji. Jest oczywiste, że metoda ta stwarza możliwość uzyskiwania układów przetworników impedancji z przetwarzaniem prądu na podstawie ich napięciowych odpowiedników zbudowanych na wzmacniaczach operacyjnych.



Rys. 14. Procedura przekształcania schematu konwertora UNIC zbudowanego na wzmacniaczu operacyjnym na schemat konwertora z konwejerem CCII

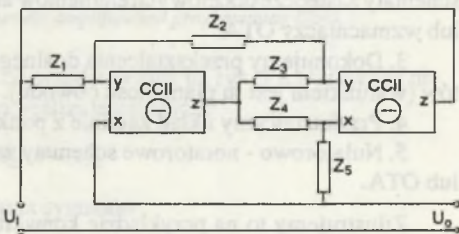
Fig. 14. Transformation procedure of voltage - mode UNIC circuit using VOA to the current - mode circuit using CCII conveyor

4. PRZETWORNIKI IMMITANCJI Z KONWEJORAMI CCII

Konwejor CCII ma strukturę ułatwiającą zastosowanie w układach przetwarzających impedancję. Sam układ CCII można również uważać za szczególny przypadek trójwrotowego przetwornika immitancji [6]. Wykorzystując ten element można w prosty sposób zrealizować podstawowe typy przetworników immitancji. Jeden układ konwejora CCII umożliwi realizację uziemionego konwertora NIC, a dwa - układu nieziemionego [7,8]. Układ przedstawiony na rys. 15 spełnia funkcję nieziemionego konwertora GIC o impedancji wejściowej na zaciskach 1 i 2 równej

$$Z_{12} = \frac{Z_1 Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4}$$

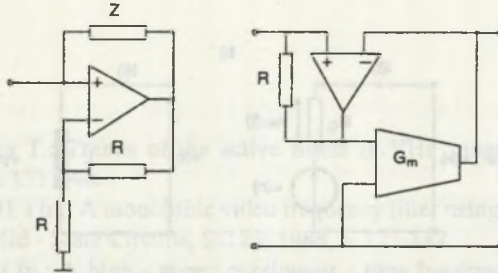
Zauważmy, że układ z rys. 15 zawiera tylko 2 elementy CCII, a więc umożliwia "oszczędną" symulację elementów nieziemionych (inne metody wymagają zastosowania 4 elementów aktywnych). Zrealizowane w ten sposób układy cechują się szczególnie dużą szybkością narastania sygnału wyjściowego i wynikającymi stąd dobrymi właściwościami dynamicznymi, a także dobrą powtarzalnością i szerokim pasmem częstotliwości [9]. Biorąc pod uwagę właściwości konwejora CCII należy stwierdzić, że jest to element bardziej uniwersalny od tradycyjnego wzmacniacza operacyjnego. Umożliwia on realizację wszystkich typów przetworników immitancji. Przejście od struktury ze wzmacniaczami operacyjnymi do struktury z konwejorami CCII ułatwia opisana w punkcie 3 metoda transformacji schematu z wykorzystaniem nulatorowo - notatorowych schematów zastępczych.



Rys. 15. Nieziemiony układ konwertora GIC
Fig. 15. Fully floating GIC

5. PRZETWORNIKI IMMITANCJI ZE WZMACNIACZAMI TRANSKONDUKTANCYJNYMI

Wzmacniacz transkonduktancyjny, czyli źródło prądowe sterowane napięciem jest elementem stosowanym od lat w syntezie filtrów aktywnych. Pojawienie się w ostatnich latach szybkich wzmacniaczy transkonduktancyjnych (OTA) pozwoliło na rozszerzenie zastosowań filtrów aktywnych na pasmo częstotliwości wizyjnych [12]. Metoda transformacji obwodu napięciowego na prądowy opisana w punkcie 3 nadaje się również do tworzenia układów przetworników ze wzmacniaczami OTA na podstawie znanych schematów ze wzmacniaczami operacyjnymi.

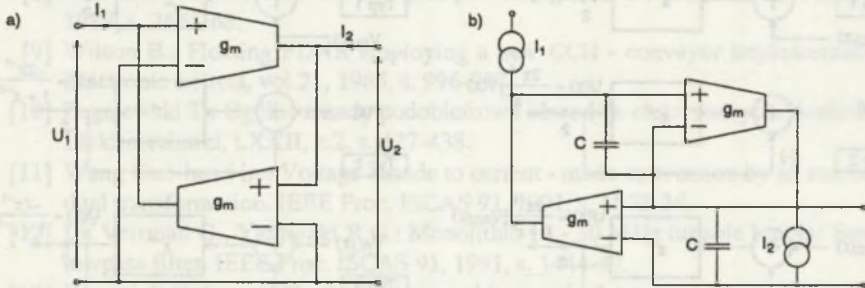


Rys. 16. Procedura przekształcania schematu konwertera UNIC zbudowanego na wzmacniaczu operacyjnym na konwerter ze wzmacniaczem transkonduktancyjnym

Fig. 16. Transformation procedure of voltage - mode NIC circuit using VOA to the current - mode circuit using OTA

Tok postępowania jest taki sam jak dla układów CCII, jedynie przekształcenie układu nulatorowo-noratorowego musi prowadzić do schematu wzmacniacza OTA z rys. 6b. Prześledźmy to na przykładzie konwertera NIC przedstawionym na rys. 16.

Wzmacniacze transkonduktancyjne stosowane są tradycyjnie jako elementy żyratorów. Interesujące własności ma również zbudowany z nich konwerter GIC służący do realizacji elementu FDNC. Układy te są przedstawione na rys. 17.

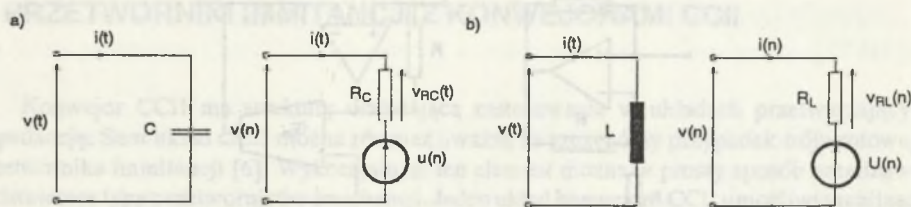


Rys. 17. a) Żyrator ze wzmacniaczami transkonduktancyjnymi b) Realizacja elementu FDNC za pomocą przetwornika GIC na wzmacniaczach transkonduktancyjnych

Fig. 17. a) Gyration using OTAs b) FDNC implementation using OTAs based GIC

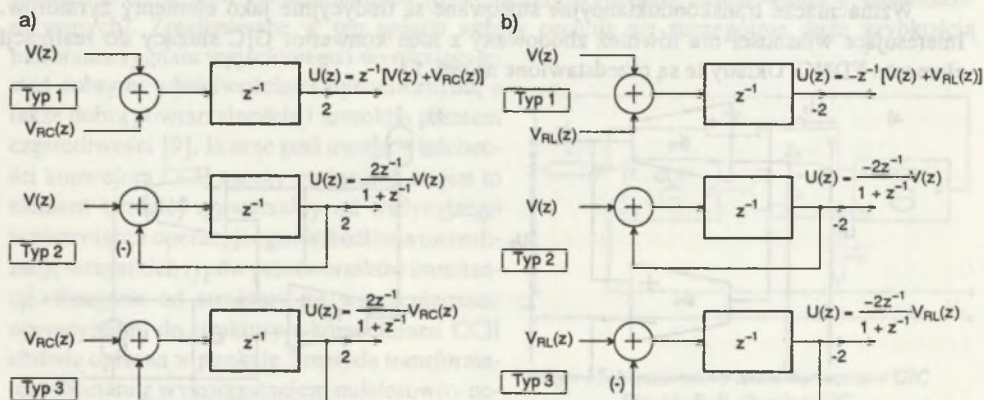
6. PRZETWORNIKI IMMITANCJI W TECHNICIE SI

Podobnie jak w technice przełączanych pojemności, również tutaj idea przetwornika immitancji może zostać wykorzystana w procesie syntezy filtra. Ma to szczególne znaczenie w przypadku korzystania z drabinkowych prototypów RLC oraz metody symulacji. Można tu z powodzeniem wykorzystać ideę falowych filtrów cyfrowych [14]. Można również skorzystać z możliwości symulacji obwodu pasywnego zastępując impedancje zależne od częstotliwości ich modelami stowarzyszonymi [15]. Model stowarzyszony - to graficzna reprezentacja algorytmu całkowania realizowanego przez indukcyjność lub pojemność w czasie ciągłym. Stowarzyszone modele pojemności i indukcyjności przedstawione są na rys.18.



Rys. 18. Stowarzyszone modele pojemności a) i indukcyjności b)
Fig. 18. Companion models of capacitors a) and inductors b)

Modele te można zasymulować za pomocą jednego ze schematów blokowych przedstawionych na rys. 19, zwanych schematami symulacji impedancji. Na schematach występują różne zmienne wejściowe, mają one jednak tę samą zmienną wyjściową.



Rys. 19. Schematy symulacji impedancji kondensatora a) i indukcyjności b)
Fig. 19. Impedance simulation diagrams of capacitors a) and inductors b)

Zmienna ta odpowiada napięciu źródła w stowarzyszonym modelu elementu. Obwód stowarzyszony reprezentuje wówczas inny schemat blokowy, zwany schematem symulacji topologii obwodu. Schemat ten jest zależny od topologii obwodu stowarzyszonego. Oba te schematy stanowią podstawę realizacji układu SI symulującego przetwornik immittancji z odpowiednim obciążeniem lub bezpośrednio filtr drabinkowy LC [16].

LITERATURA

- [1] Yanagisawa T.: Trends of the active filters in VHF range. IEEE Proc. ISCAS 91, 1991, s. 1737-40.
- [2] Hagiwara H. i in.: A monolithic video frequency filter using NIC - based gyrators. IEEE J. Solid - State Circuits, SC 23, 1988, s. 175-182.
- [3] Ismail M. i in.: A high - speed continuous - time bandpass VHS filter in MOS technology. IEEE Proc. ISCAS 91, 1991, s. 1761-64.
- [4] Wadsworth D.C.: The performance and applications of a new current conveyor integrated circuit. IEEE Proc. ISCAS 90, 1990, s. 287-90.
- [5] Bowers D.F., Brown J.E.C.: The operational conveyor amplifier - a new circuit design block. IEEE Proc. ISCAS 90, 1990, s. 295-298.
- [6] Dostal T., Pospisil J.: Current and voltage conveyors - a family of three - port immittance converters. IEEE Proc. ISCAS 82, 1982, s. 419-422.
- [7] Sedra A., Smith K.C.: A second generation current conveyor and its applications. IEEE Trans. on CT, CT-17, 1970, s. 132-134.
- [8] Wilson B. i in.: Current mode signal processing circuits. IEEE Proc. ISCAS 88, 1988, s. 2665-68.
- [9] Wilson B.: Floating FDNR employing a new CCII - conveyor implementation. Electronic Letters, vol.21, 1985, s. 996-997.
- [10] Zagajewski T.: Ogólne zasady podobieństwa obwodów elektrycznych. Archiwum Elektrotechniki, t.XXII, z.2, s. 427-438.
- [11] Wang Guo-hua i in.: Voltage - mode to current - mode conversion by an extended dual transformation. IEEE Proc. ISCAS 91, 1991, s. 1833-36.
- [12] De Veirman G., Yamasaki R.G.: Monolithic 10 - 30 MHz tunable bipolar Bessel lowpass filter. IEEE Proc. ISCAS 91, 1991, s. 1444-47.
- [13] Bergisi A.G. i in.: Digitally programmable switched - current filters. IEEE Proc. ISCAS 90, 1990, s. 3176 - 81.
- [14] Fettweis A.: Design of orthogonal and related digital filters by network - theory approach. AEU, t.44, z. 2, 1990, s. 65-74.
- [15] Martins J., Moises P.: A new method of realization of digital filters. IEEE Proc. ISCAS 90, 1990, s. 117-120.
- [16] Błaszowski A.: Filtr aktywny z przetwornikami impedancji w technice SI. Raport z prac badawczych Instytutu Elektroniki Pol. Śląskiej, Gliwice 1993.

Wpłynęło do Redakcji w czerwcu 1994 r.

