Marian PASKO, Krzysztof SZTYMELSKI

Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej. Zakład Elektrotechniki i Informatyki

CZTEROWĘZŁOWA STRUKTURA FILTRUJĄCA SYGNAŁ PRĄDOWY Z JEDNYM UOGÓLNIONYM KONWEJEREM PRĄDOWYM GCC

Streszczenie. Przetwarzanie analogowych sygnałów prądowych, ze względu na liczne zalety transmisji sygnału, nabiera w ostatnich latach wielkiego znaczenia. Zastosowanie w takiej transmisji elektronicznych wzmacniaczy analogowych, innych niż napięciowe wzmacniacze operacyjne OA, jest koniecznością kierowaną przede wszystkim szerokością pasma przenoszenia. Konieczne staje się opracowanie struktur pierwszego i drugiego rzędu (analogicznych do struktur opartych na OA) pozwalających na swobodne łączenia łańcuchowe. Niestety brak wzmocnienia wewnętrznego w konwejerach prądowych drugiej generacji CCII± i założenie braku indukcyjności L w układach, nie pozwala, przy braku odpowiednich sprzężeń dodatnich, na realizację filtrów prądowych wyższych rzędów o dobroci Q przekraczającej 0.5. Ze względu na to autorzy proponują nowe struktury filtrujące zawierające jeden uogólniony konwejer prądowy GCC.

FOUR–NODS STRUCTURE FILTERING CURRENT SIGNAL WITH ONE GENERALIZED CURRENT CONVEYOR GCC

Summary. Because of numerous advantages of signal transmittion analogue current signal processing has become very important lately. The application of such electronic analogue amplifiers others than operational ones, in transmittance is necessity connected mainly with bandwidth. It becomes necessary to work out the structures of the first and second order (parallel to the structures based on an OA) allowing for easy chain connections. Unfortunately the lack of internal gain in second generation current conveyors CCII \pm and the assumption of the lack of inductance L in systems do not allow for the realisation of current filters of higher orders having a Q factor exceeding 0.5 lacking suitable positive feedbacks. Using that solution the authors have proposed a new filtering structures with one Generalized Current Conveyor GCC.

1. WSTĘP

Niezwykle szybko rozwijająca się technika cyfrowa zaowocowała potężną gamą częstotliwościowych filtrów cyfrowych. Sądzono nawet, że prostota projektów i gotowe aplikacje oparte na układach cyfrowych sprawią, że filtry z zastosowaniem wzmacniaczy

analogowych powoli przestaną nurtować inżynierów. Nie stało się tak, gdyż dyskretyzacja niejednokrotnie niedopuszczalnie pogarsza jakość sygnału, więc także i informację z nim przenoszoną. Ponadto filtry analogowe muszą niejednokrotnie współpracować z układami cyfrowymi, a nawet "naprawiać" sygnał poddany obróbce cyfrowej. Układy analogowe współpracujące z układami cyfrowymi muszą pracować przy coraz niższych napięciach zasilających, z jednocześnie coraz większym (sięgającym nawet setek MHz) pasmem przenoszenia. Spełnienie takich wymagań stawało się coraz trudniejsze, a nawet niemożliwe, w grupie klasycznych wzmacniaczy napięciowych. Sygnałem filtrowanym najczęściej jest sygnał napięciowy, jednakże często konieczne staje się zaprojektowanie struktury, dla której ważne są parametry przenoszenia innych sygnałów elektrycznych, jak: moc czynna (filtry, dopasowane) lub natężenie prądu (filtry prądowe) [4, 13]. Szczególnie filtry prądowe stosowane są przy współpracy z układami cyfrowymi. Nowoczesne interfejsy komputerowe, a nawet popularne architektury sieciowe pracują już od lat w oparciu o sygnały prądowe. Dlatego właśnie ostatnimi czasy duże znaczenie zdobyły nowoczesne wzmacniacze analogowe przetwarzające sygnały prądowe. Charakteryzują się one między innymi:

- możliwością wzmacniania bardzo małych sygnałów,
- szerokim pasmem przenoszenia,
- małym poborem mocy czynnej,
- prostą wewnętrzną konstrukcją,
- dużą dynamiką,
- wzmocnieniem nie uzależnionym od napięcia zasilania układu.

Do wzmacniaczy takich zaliczyć można między innymi konwejer prądowy CC, konwejer prądowy drugiej generacji CCII±, wzmacniacz operacyjny ze sprzężeniem prądowym CFA lub prądowy wzmacniacz operacyjny COA [7, 11, 12]. Autorzy proponują uogólnienie konwejera prądowego drugiej generacji o dowolne rzeczywiste wzmocnienia napięciowe β i prądowe α . Wzmacniacz taki nazwany został uogólnionym konwejerem prądowym (generalized current conveyor) GCC [2, 6, 10].

2. UOGÓLNIONY KONWEJER PRĄDOWY GCC

Uogólniony konwejer prądowy GCC jest uniwersalnym szerokopasmowym wzmacniaczem analogowym pozwalającym na – alternatywne w stosunku do układów w oparciu o klasyczne wzmacniacze operacyjne OA – podejście do filtracji sygnałów, ze szczególnym uwzględnieniem filtracji sygnałów prądowych. Układ ten ma trzy zaciski oznaczane najczęściej literami XYZ, a jego macierz przedstawia się wzorem (1):

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ U_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_Y \\ I_X \\ U_Z \end{bmatrix},$$
(1)

gdzie współczynniki: α i $\beta \in \pm \Re$.

Idealny schemat zastępczy GCC w oparciu o źródło prądu sterowane prądem CCCS i źródło napięcia sterowane napięciem VCVS przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Uogólniony konwejer prądowy GCC Fig. 1. Generalized current conveyor GCC

To właśnie uogólnienie współczynników α i β odróżnia ten wzmacniacz od opisywanego dość szeroko w literaturze, a nawet produkowanego seryjnie, konwejera prądowego drugiej generacji CCII± – dla którego współczynnik β jest równy 1, natomiast współczynnik α może przyjmować wartość 1 lub –1 [6, 8, 9, 10, 11, 12].

Jak można zauważyć, struktura wewnętrzna GCC jest zupełnie odmienna od struktury wewnętrznej idealnego wzmacniacza operacyjnego OA. Powoduje to konieczność opracowania nowych implementacji analogowych funkcji przejścia, które dla realizacji filtrów prądowych ograniczają się do bezindukcyjnych struktur realizujących transmitancje prądowo–prądowe (zwane dalej transmitancjami prądowymi) $K_i(s)$. Stopień komplikacji struktur powinien być mały, a co za tym idzie – liczba wzmacniaczy i dołączonych elementów pasywnych RC powinna być jak najmniejsza. Struktury takie powinny realizować transmitancje prądowe pierwszego i drugiego rzędu, tak by było możliwe łańcuchowe łączenie w filtry rzędu dowolnego. Założenia takie narzucają wysoką impedancję na wejściu i (lub) niską impedancję na wyjściu struktury. Odpowiedzią na powyższe założenia może być pełny dziesięcioadmitancyjny, czterowęzłowy układ z jednym GCC.

3. PEŁNY CZTEROWĘZŁOWY UKŁAD Z JEDNYM GCC

Istotną grupę zastosowań konwejerów prądowych stanowią układy zawierające jeden konwejer pracujący z wieloma dołączonymi admitancjami zewnętrznymi. Maksymalna liczba admitancji łączących poszczególne zaciski uogólnionego konwejera prądowego GCC między sobą i punktem odniesienia to 6. Aby zwiększyć możliwości symulacyjne układu z jednym GCC, rozszerza się go o dodatkowy węzeł wejściowy W, połączony z zaciskami konwejera i węzłem odniesienia dodatkowymi czterema admitancjami. Pełny czterowęzłowy układ aktywny z jednym GCC obudowany jest więc dziesięcioma admitancjami i przedstawiono go na rys. 2.

W literaturze znane są propozycje pełnego czterowęzłowego układu aktywnego z jednym konwejerem drugiej generacji CCII±. Układ taki obudowany jest wtedy dziewięcioma admitancjami, gdyż dla idealnego CCII± $\beta = 1$, czyli U_X = U_Y i przez admitancję łączącą węzły X i Y nie płynie prąd [11].

Założenia związane z filtracją sygnałów prądowych, takie jak dobroć układu filtrującego, a także zabezpieczenie przed wzmacnianiem szumów występujących w układach rzeczywistych narzucają pewne modyfikacje układu z rys. 2.



Rys. 2. Pełny czterowęzłowy układ aktywny z jednym GCC Fig. 2. Full four–nods active circuit with one GCC

4. UKŁAD AKTYWNY Z JEDNYM GCC BEZ DODATNICH SPRZĘŻEŃ ZWROTNYCH

Należy założyć, że rzeczywiste układy filtrujące wykonane na bazie uogólnionego konwejera prądowego GCC będą musiały pracować w bardzo szerokim paśmie częstotliwości. Niestety, sprawia to, że układy takie narażone są bardzo na przenoszenie szumów pojawiających się na wejściu układu. Dodatnie sprzężenia zwrotne zwiększają ryzyko wzmacniania szumów pojawiających się w filtrowanym sygnale. Zjawisko takie można często zaobserwować w rzeczywistych układach opartych na konwejerze prądowym drugiej generacji CCII±. Brak wzmocnienia wewnętrznego ($\beta i |\alpha| = 1$) oraz indukcyjności L wśród dołączanych admitancji nie pozwala na wyeliminowanie (przy jednym CCII±) dodatnich sprzężeń zwrotnych. Eliminacji takiej nie można dokonać, ponieważ dobroć układu filtrującego nie mogłaby wtedy przekroczyć Q = 0.5, a co za tym następuje - nie pozwalałoby to na realizację filtrów według zadanych matematycznych aproksymacji, takich jak aproksymacje Butterwortha (Q = 0.707) lub Czebyszewa (Q = 1.41) [4, 13]. Problem ten nie występuje w układach opartych na jednym GCC, gdzie eliminacja dodatnich sprzężeń zwrotnych jest możliwa. Na rys. 3 pokazano czterowęzłowy układ aktywny z jednym GCC bez dodatnich sprzężeń zwrotnych [6].



Rys. 3. Czterowęzłowy układ aktywny z jednym GCC bez dodatnich sprzężeń zwrotnych Fig. 3. Four-nods active circuit with one GCC without positive feedback

Czterowezłowa struktura filtrujaca...

-

W układzie z rys. 3 węzeł Z traktowany jest jako wyjście układu, więc admitancja Y_7 stanowi obciążenie struktury. Ponadto wyjście układu oznaczone jako OUT jest to idealne, bezimpedancyjne wyjście prądowe umożliwiające łańcuchowe łączenie struktur w układ wyższego rzędu.

5. FILTRY PRĄDOWE W UKŁADZIE AKTYWNYM Z JEDNYM GCC

Transmitancja prądowa K_i układu pokazanego na rys. 3 przedstawia się równaniem (2).

$$K_{I} = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \alpha \frac{Y_{1}Y_{5} + Y_{1}Y_{3}(1-\beta) + Y_{2}Y_{3}(1-\beta) + Y_{3}Y_{5}(1-\beta) - \beta(Y_{1}Y_{4} + Y_{2}Y_{4} + Y_{1}Y_{5} + Y_{2}Y_{5} + Y_{4}Y_{5})}{Y_{1}Y_{3}(\beta-1) + Y_{2}Y_{3}(\beta-1) + Y_{1}Y_{5}(\beta-1) + Y_{3}Y_{5}(\beta-1) - Y_{1}Y_{2} - Y_{1}Y_{6} - Y_{2}Y_{6} - Y_{5}Y_{6}}.$$
(2)

Jak łatwo można zauważyć, w równaniu (2) nie występuje admitancja Y_7 stanowiąca obciążenie struktury, natomiast wzmocnienie α stanowi wzmocnienie całkowite układu. Odpowiedni dobór admitancji pozwala na realizację założonego w obliczeniach filtru prądowego. Za admitancje od Y_1 do Y_6 można podstawiać konduktację G, susceptancję operatorową sC, połączenia równoległe konduktancji i susceptancji operatorowej G + sC, a także zero (czyli przerwę w gałęzi). Wzmocnienia α i β należy zakładać z rzeczywistego przedziału narzuconego przez realizację praktyczną uogólnionego konwejera GCC.

6. FILTRY PRĄDOWE PIERWSZEGO RZĘDU Z JEDNYM GCC

Filtry rzędu pierwszego mają najczęściej niewystarczające parametry (tłumienie w paśmie zaporowym) dla realizacji założonych celów filtracji. Jednakże struktury filtrujące rzędu pierwszego są niezbędne jako elementarne struktury stosowane w realizacji filtrów wyższych rzędów nieparzystych. Strukturami rzędu pierwszego mogą być jedynie struktury dolnoprzepustowe LP, górnoprzepustowe HP oraz wszechprzepustowe AP (przesuwniki fazy). Dla realizacji filtrów pasmowoprzepustowych BP i pamowozaporowych BS struktury elementarne to struktury rzędu drugiego [4, 13]. Do konstrukcji filtrów prądowych pierwszego rzędu należy zastosować układy pozwalające na realizację następujących transmitancji prądowych:

			Tabela 1
Rodzaj	LP	HP	AP
K _i (s)	$\frac{K_0}{As+1}$	$\frac{K_0 As}{As+1}$	$\frac{K_0(As-1)}{As+1}$

gdzie: K₀ jest to wzmocnienie całkowite filtru.

Do aktywnej realizacji takich transmitancji prądowych można zastosować układ aktywny z jednym GCC przedstawiony na rys. 4.



Rys. 4. Czteroadmitancyjny układ aktywny z jednym GCC Fig. 4. Four-admittant active circuit with one GCC

Transmitancja prądowa takiego układu przedstawia się następująco:

$$K_{i} = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \alpha \frac{Y_{2}Y_{3} - Y_{1}Y_{4}\beta + Y_{1}Y_{3}(1-\beta)}{Y_{2}Y_{3} + Y_{1}Y_{2} + Y_{1}Y_{3}(1-\beta)}.$$
(3)

Zakładając $\alpha = \beta = 1$ (konwejer prądowy drugiej generacji) otrzymuje się:

$$K_{i} = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{Y_{2}Y_{3} - Y_{1}Y_{4}}{Y_{2}Y_{3} + Y_{1}Y_{2}}.$$
(4)

Z powyższej zależności wynika, że przy odpowiednim doborze admitancji za pomocą takiego układu można zrealizować dowolną strukturę rzędu pierwszego filtrującą sygnały prądowe. Przykładowo, dla realizacji filtru górnoprzepustowego HP należy założyć: $Y_1 = G_1, Y_2 = G_2, Y_3 = sC_3, Y_4 = 0,$



Rys. 5. Aktywny HP filtr prądowy pierwszego rzędu Fig. 5. Active first-order HP current filter

$$K_i(s) = \frac{sC_3G_2}{sC_3G_2 + G_1G_2},$$
(5)

a po odpowiednich przekształceniach:

$$K_i(s) = \frac{s\left(\frac{C_3}{G_1}\right)}{s\left(\frac{C_3}{G_1}\right) + 1} .$$
(6)

Można zauważyć, że filtr o takiej strukturze nie jest wrażliwy na zmiany rezystancji R2.

7. FILTRY PRĄDOWE DRUGIEGO RZĘDU Z JEDNYM GCC

Aby zaprojektować aktywne filtry drugiego rzędu, należy zastosować układy pozwalające na realizację następujących transmitancji prądowych [4, 13]:

			Tabela 2
Rodzaj	LP	НР	BP
K _i (s)	$\frac{K_0}{As^2 + Bs + 1}$	$\frac{K_0 A s^2}{A s^2 + B s + 1}$	$\frac{K_0Bs}{As^2 + Bs + 1}$
Rodzaj	BS	AP	
K _i (s)	$\frac{K_0(As^2+1)}{As^2+Bs+1}$	$\frac{K_0(As^2-Bs+1)}{As^2+Bs+1}$	

gdzie: K₀ jest to wzmocnienie całkowite filtru.

Dokonuje się tego przez odpowiedni dobór admitancji. W celu realizacji filtru LP drugiego rzędu można np. założyć:

 $Y_1 = G_1, Y_2 = G_2, Y_3 = 0, Y_4 = G_4, Y_5 = sC_5, Y_6 = sC_6.$ Dodatkowym założeniem jest:

$$G_4 = \frac{G_1(1-\beta) - G_2\beta}{\beta} \,. \tag{7}$$

Uzyskuje się wtedy strukturę przedstawioną na rys. 6



Rys. 6. Aktywny LP filtr prądowy drugiego rzędu Fig. 6. Active second-order LP current filter

Transmitancja prądowa układu pokazanego na rys. 6 przedstawia się następująco:

$$K_{i}(s) = \frac{\alpha \left(\frac{G_{1}^{2}(1-\beta) + G_{1}G_{2}(1-2\beta) - G_{2}^{2}\beta}{G_{1}G_{2}}\right)}{\left(\frac{C_{5}C_{6}}{G_{1}G_{2}}\right)s^{2} + \left(\frac{C_{5}G_{1} + C_{6}G_{1} + C_{6}G_{2} - C_{5}G_{1}\beta}{G_{1}G_{2}}\right)s + 1}.$$
(8)

Porównując równanie (8) z równaniem filtru LP przedstawionym w tabeli 2, można założyć, że realizacji filtru drugiego rzędu jest możliwa.

Innym sposobem na uzyskanie wymaganej transmitancji filtru może być założenie wybranych admitancji Y jako równoległe połączenia rezystora i kondensatora. Jeżeli realizowany filtr ma być filtrem HP, można np. założyć:

$$Y_1 = G_1, Y_2 = G_2 + sC_2, Y_3 = sC_3, Y_4 = sC_4,$$

 $Y_5 = 0, Y_6 = 0$

Dodatkowym założeniem jest:

$$C_4 = \frac{C_3 \left(G_2 + G_1 (1 - \beta) \right)}{G_1 \beta} \,. \tag{9}$$

Uzyskuje się wtedy strukturę przedstawioną na rys. 7.



Rys. 7. Aktywny HP filtr prądowy drugiego rzędu Fig. 7. Active second-order HP current filter

Transmitancja prądowa układu pokazanego na rys. 7 przedstawia się następująco:

$$K_{i}(s) = \frac{\alpha \left(\frac{C_{2}C_{3}}{G_{1}G_{2}}\right)s^{2}}{\left(\frac{C_{2}C_{3}}{G_{1}G_{2}}\right)s^{2} + \left(\frac{C_{2}G_{1} + C_{3}G_{1}(1-\beta) + C_{3}G_{2}}{G_{1}G_{2}}\right)s + 1}.$$
(10)

Porównując równanie (10) z równaniem filtru HP przedstawionym w tabeli 2, można założyć, że realizacji filtru drugiego rzędu jest możliwa.

8. PODSUMOWANIE

Pasmo przenoszenia analogowego filtru aktywnego jest przede wszystkim uwarunkowane pasmem przenoszenia zastosowanych w filtrze elementów aktywnych. Niestety, w klasycznych wzmacniaczach operacyjnych OA pasmo przenoszenia jest dość waskie. Ponadto struktury opracowane dla OA to struktury filtrów napieciowych nie nadających sie do transmisji sygnałów prądowych stosowanych coraz częściej przy transmisji informacji. Zastosowanie w transmisji analogowych sygnałów pradowych nowoczesnych elektronicznych wzmacniaczy analogowych jest wiec konjecznościa. Staje sie niezbedne opracowanie dla tych wzmacniaczy struktur pierwszego i drugiego rzędu (analogicznych do struktur opartych na wzmacniaczach operacyjnych OA), pozwalających na swobodne łaczenia łańcuchowe w struktury wyższych rzędów [3, 5]. Wzmacniacze, takie jak konwejery prądowe drugiej generacji CCII± wzbogacone w układach o elementy RC, wydają się być idealne do transmisji sygnałów pradowych. Niestety, brak wzmocnienia wewnetrznego w CCII± i założenie braku indukcyjności L w układach nie pozwala, przy braku odpowiednich dodatnich sprzężeń zwrotnych, na realizację filtrów prądowych wyższych rzędów, o dobroci Q przekraczającej 0.5 i prostej konstrukcji (z jednym konwejerem). Dodatnie sprzężenia zwrotne powodują natomiast wzmacnianie w układzie szumów. Nie należy jednak porzucać prac projektowych i poszukiwań odpowiednich układów zawierających, np. wzmacniacze elektroniczne innych typów, takie jak czterozaciskowy nullor nieuziemiony FTFN, prądowy wzmacniacz operacyjny COA, konwejer wielozaciskowy MTCCII, czy też zaproponowany w artykule uogólniony konwejer prądowy GCC [1, 6, 7, 11, 12]. Układy takie niejednokrotnie opracowane teoretycznie i zaproponowane już kilkadziesiat lat temu nie doczekały się jeszcze masowej produkcji. Nie można zapominać, że cały świat zdominowany jest sygnałami analogowymi i nie wolno lekceważyć elektroniki analogowei. Należy jednak dołożyć starań w poszukiwaniu układów analogowych pozwalajacych na swobodna współprace z nowoczesnymi i powszechnie stosowanymi układami techniki cyfrowej.

LITERATURA

- 1. Cajka J., Vroba K., Olsak M.: *Two-ports working under voltage and current regimes (in Cze:ch)*. Slaboproudy Obzor 59 (2002), No. 2-3, Czech Republic 2002.
- 2. Carlosena A., Moschytz G. S.: Design of variable-gain current conveyors. "IEEE Trans. CAS-I", No. 1, 1994.
- 3. Chang C. M.: Current-mode lowpass, bandpass and highpass biquads using two CCIIs. "Electronics Letters" 1993, No. 23.
- 4. Chen W.: The Circuits and Filters Handbook. CRC Press, 1995.
- 5. Fliege N.: A new class of second order RC-active filters with two operational amplifiers. Patent P 23 17 644.5, Germany 1973.
- 6. Pasko M., Sztymelski K.: Current filters designed using a controlled current conveyor CCC. AMTEE'03, Czech Republic 2003, s. 49-57.
- 7. Pasko M., Topor-Kaminski L.: Full n-Terminal OTA with n-CCII. "Acta Techn." CSAV 47, Czech Republic 2002, s. 177-187.
- 8. Smith K., Sedra A.: A second generation current conveyor and its applications. "IEEE Trans. CT-17", 1970.
- 9. Smith K., Sedra A.: The current conveyor a new circuit building block. "EEE Proc." 1968 Vol. 54.
- Topór-Kamiński L.: Bezinercyjne elementy osobliwe jako modele elektrycznych układów aktywnych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Elektryka z. 145, Gliwice 1996.

- 11. Topór-Kamiński L.: Wzmacniacze elektroniczne w układach aktywnych. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2000.
- 12. Topór-Kamiński L., Holajn P.: Wielozaciskowy konwejer prądowy. Wyd. Pol. Śl., Monografia nr 26, Gliwice 2001.
- 13. Williams A. B.: *Electronic Filter Design Handbook*. McGraw-Hill, New York 1981.

Recenzent: Dr hab. inż. Konrad Skowronek, prof. Politechniki Poznańskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 kwietnia 2004 r.