

Prototypowe dwuwymiarowe filtry żyratorowo-pojemnościowe

Streszczenie. Niniejsze opracowanie przedstawia koncepcję zunifikowanego opisu struktury obwodu dla dwuwymiarowej filtracji. Wprowadzono sposób podziału obwodu o parametryzowanej strukturze oraz dużej elastyczności w zakresie wyrażania topologii, rzędu układu filtrującego oraz liczby zmiennych niezależnych, wyznaczającej wymiar struktury. Opisano sposób realizacji analizy symbolicznej tego typu struktur z uwzględnieniem możliwości jej zaimplementowania w formie oprogramowania komputerowego klasy CAD/EDA. Przedstawiono także koncepcję syntezy obwodu w oparciu o wyniki analizy symbolicznej, która stanowiłaby etap wyjściowy do zrealizowania projektowanego układu w postaci scalonej. Omówiony został również przegląd potencjalnych zastosowań takiej metodologii projektowania w kontekście realizacji układów klasy System on Chip (SoC). Na koniec przedstawiono możliwe uogólnienie podanej metodologii projektowania na układy wielowrotników wielowymiarowych.

Abstract. The following paper presents a method of unified description for circuits' structure for two-dimensional filtration. The structure may be parameterized by altering the number of used operators giving making the description flexible and easy to use. VHDL-AMS language was proposed for expressing the structure. Additionally CAD/EDA class software was elaborated for performing symbolic analysis of the elaborated structures. The paper gives a brief overview of the software capabilities and limitations. This may be considered as the initial step for making circuit synthesis. This approach may be easily extended for analysis of multidimensional multiport circuits. (**Two dimensional, gyrator-capacitor prototype filters**).

Słowa kluczowe: CAD, EDA, VHDL-AMS, filtry dwuwymiarowe, układy prototypowe.

Keywords: CAD, EDA, VHDL-AMS, two dimensional filters, prototype filters.

doi:10.12915/pe.2014.09.13

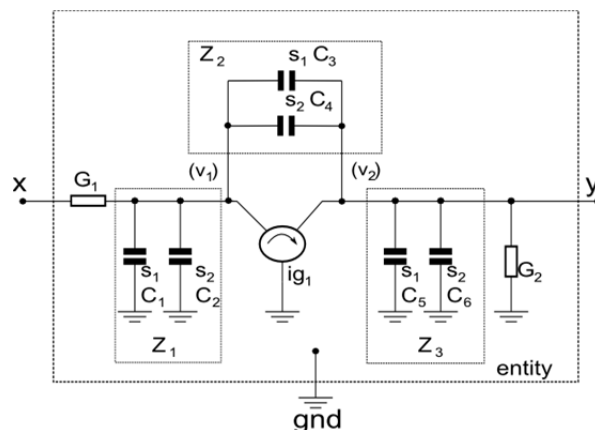
Wprowadzenie

Filtracja sygnałów jest jedną z podstawowych operacji realizowanych we współczesnych układach elektronicznych. Pozwala na redukcję zakłóceń czy też ekstrakcję sygnału użytecznego spośród wielopasmowej transmisji danych. Obecnie wiodący producenci układów półprzewodnikowych oferują komercyjne rozwiązania systemów na czipie (SoC), zawierających bogactwo układów peryferyjnych. W części z nich dane analogowe są możliwe jak najwcześniej konwertowane do postaci cyfrowej. Wczesna digitalizacja sygnału może prowadzić do utraty części użytecznej informacji. Przetworniki analogowo-cyfrowe wykazują zwiększone zapotrzebowanie na energię, a dalsze bloki przetwarzania pochłaniają część mocy obliczeniowej procesora. Tymczasem, można wyróżnić przynajmniej kilka klas zastosowań mieszanych systemów typu SoC, gdzie korzystne jest użycie układów analogowej filtracji wstępnej. Takie podejście pozwala na uwydatnianie szczegółów (wyostrenia) [1] czy też na przykład wyróżnienia na obrazie detali o zadanej orientacji [2]. Oddzielną klasą zastosowań takich układów są systemy obrazowania medycznego [3]. Takie pozwala uwzględnić składową przestrzenną odbieranego sygnału i przez to znajduje szerokie spektrum zastosowań w radiolokacji, sejsmografii, komórkowych sieciach przesyłowych czy też w radioastronomii [4].

Niejednokrotnie już wstępne przetwarzanie analogowe pozwala uzyskiwać zadowalającą jakość sygnału przy znaczącej redukcji poboru mocy urządzenia jako całości [5]. Pomimo faktu iż prace związane z filtracją wielowymiarową pojawiają się w literaturze już od przeszło 30 lat [6], także i w ostatnich doniesieniach można napotkać na nowe studia aplikacji układów filtrujących w niskomocowych urządzeniach mieszanych. Proces filtracji dwuwymiarowych sygnałów może być także uogólniony na większą liczbę wymiarów. Przegląd ostatnich doniesień z zakresu zastosowań filtracji wielowymiarowej skłania do podjęcia wysiłku nad połączeniem istniejących jak dotąd rozdzielnie technik projektowania analogowych układów filtracji oraz cyfrowych układów przetwarzania.

Opis układów filtrujących

Klasyczna teoria analogowych układów filtrujących opiera się przeważnie na wykorzystaniu elementów reaktancyjnych LC, które wyróżnia bezstratność oraz bardzo dobre parametry selektywności i stabilności.



Rys.1. Podstawowa struktura stosowana w opisie dwuwymiarowej filtracji gC

Istotną jest również mała wrażliwość takich struktur na rozrzut technologiczny parametrów poszczególnych elementów składowych w odniesieniu do uzyskiwanej charakterystyki częstotliwościowej. Aby wyeliminować konieczność realizacji scalonej indukcyjności, elementy indukcyjne zamodelować można w postaci obwodów zastępczych żyratorowo-pojemnościowych (gC). W dalszym kroku można takie struktury realizować z wykorzystaniem technik powszechnych dla CMOS, takich jak technika przełączanych pojemności (SC), przełączanych prądów (SI), bądź w oparciu o wykorzystanie wzmacniaczy operacyjnych (OTA-C). Kompletna ścieżka projektowania układów scalonych na podstawie struktur żyratorowo-pojemnościowych przedstawiona została między innymi w [7, 8]. Dla celów analizy filtrów dwuwymiarowych zaimplementowano dedykowane oprogramowanie wspierające projektanta. Rysunek 1 przedstawia przyjętą, uogólnioną strukturę obwodu prototypowego. Pozwala ona na bezpośrednie adaptowanie układów wielowymiarowych omawianych w [6]. Zaprezentowany przykład odnosi się do dwóch wierzchołków wewnętrznych $v1$ oraz $v2$ oraz jednego sygnału wejściowego i wyjściowego oznaczanych odpowiednio poprzez x oraz y . Sygnały wejściowe są podłączone do węzłów obwodu poprzez konduktancje szeregowe, natomiast sygnał wyjściowy jest pobierany z zacisków konduktancji łączącej między dany wierzchołek a węzeł odniesienia (masę). Pomiedzy węzłami można wprowadzać żyratory oraz pojemności.

```

library VLSI;
use VLSI.SI.all;
entity example is port (
    terminal input x : electrical;
    terminal output y : electrical;
    terminal ground gnd: electrical);
end entity example;
-- some comment line
architecture example_arch of example is
variable v1,v2 : real;
begin
-- capacitors
C1 : GC_CAP generic map(dim=>1) port map (Ni=>v1, Nj=>gnd);
C2 : GC_CAP generic map(dim=>2) port map (Ni=>v1, Nj=>gnd);
C3 : GC_CAP generic map(dim=>1) port map (Ni=>v1, Nj=>v2);
C4 : GC_CAP generic map(dim=>2) port map (Ni=>v1, Nj=>v2);
C5 : GC_CAP generic map(dim=>1) port map (Ni=>v2, Nj=>gnd);
C6 : GC_CAP generic map(dim=>2) port map (Ni=>v2, Nj=>gnd);
-- conductances with I/O signals
G1 : GC_CON port map (Ni=>x, Nj=>v1);
G2 : GC_CON port map (Ni=>v2, Nj=>gnd, Vo=>y);
-- gyrators
B1 : GC_GYR port map( Ni=>v1, Nj=>v2);
end architecture;

```

Rys.2. Składnia VHDL-AMS przyjęta do wyrażania dwuwymiarowych struktur żyratorowo-pojemnościowych

Dla uzyskania elastycznej metody opisu struktur filtrujących przyjęto język VHDL-AMS. Rysunek 2 ukazuje taki opis dla rozpatrywanej struktury. Układ żyratorowo-pojemnościowy jest reprezentowany w postaci jednostki projektowej (entity), dla której zdefiniowano zaciski wejściowe i wyjściowe. W opisie architektury jednostki projektowej wprowadza się instancje abstrakcyjnych bloków reprezentujących pojemności, żyracje oraz konduktancje. Instancje reprezentujące elementy pojemnościowe są parametryzowane poprzez wymiar zmiennej operatorowej s , która zostanie wykorzystana w dalszej analizie układu do wyrażania impedancji operatorowej bloków Z_1, Z_2, Z_3 . W przypadku elementów konduktancyjnych łączonych pomiędzy masę a zadany węzeł obwodu wprowadza się dodatkowy wymóg podłączenia do tego elementu sygnału wyjściowego.

Realizacja analizy symbolicznej obwodu 2d

Oprogramowanie wspierające proces projektowania dokonuje analizy wejściowego pliku VHDL-AMS, zawierającego opis struktury obwodu. Na potrzeby badań zaimplementowano parser dla plików, który w pierwszym etapie buduje listę wyrazów i separatorów (takich jak spacja, przecinek) pozyskanych z treści plików. W kolejnym kroku uzyskana lista jest wielokrotnie przeglądana dla uzyskania definicji topologii układu wraz ze skojarzonymi elementami i sygnałami.

Zmiennym reprezentującym wierzchołki przypisywane są kolejne liczby naturalne. Podobnie dzieje się z instancjami elementów obwodu. Na tym etapie oprogramowanie może przeprowadzić właściwy proces analizy symbolicznej, mający na celu uzyskanie transmitancji operatorowej obwodu zawierającej symbole reprezentujące wartości elementów (pojemności, żyracji, konduktancji). W programie wykorzystano zmodyfikowaną postać liczby strukturalnej dla wyrażania wielomianów zawierających zmienne symboliczne. Przyjęta koncepcja jest rozwinięciem podejścia, które sprawdziło się w przypadku analizy

układów jednowymiarowych [8]. Liczba strukturalna wyrażająca wielomian N -tego rzędu o K -wymiarach zawierać będzie $(N+1)^K$ grup wierszy wyrażających wystąpienia zmiennych symbolicznych.

$$H(s_1, s_2) = s_2^2(x_1^2 + 3x_2^2) + s_2x_1x_2 - s_2x_3x_4 + s_1(x_3^2 - 2x_4^2)$$

0 2

1	1	1
3	2	2

0 1

1	1	2
-1	3	4

1 0

1	3	3
-2	4	4

Rys.3. Przykład wielomianu symbolicznego drugiego rzędu o dwóch zmiennych wraz z jego reprezentacją w postaci liczby strukturalnej. Wartości w wierszach reprezentują indeksy symboli x w zapisie

Każdy pojedynczy wiersz reprezentuje mnożenie symboli, które zawiera. Pierwszy element wiersza jest stałą, przez którą dokonywane jest mnożenie. Rysunek 3 prezentuje przykładowy wielomian symboliczny drugiego rzędu o dwóch wymiarach wraz z jego reprezentacją w postaci liczby strukturalnej. Taka reprezentacja danych pozwala łatwo zdefiniować podstawowe operacje matematyczne, które będą wyrażały działania na wielomianach. Wynikiem operacji dodawań lub mnożeń liczb strukturalnych są nowe liczby strukturalne, które odzwierciedlają historię operacji wykonywanych na zmiennych symbolicznych. Dzięki tej własności możliwe stało się zaimplementowanie mechanizmu analizy obwodu opisanego w VHDL-AMS z wykorzystaniem metody potencjałów węzłowych. Macierz admittancji obwodu zawiera liczby strukturalne wyrażające wystąpienia elementów pomiędzy węzłami obwodu. Wyznacznik tej macierzy obliczany jest metodą rekurencyjną poprzez dekompozycję macierzy do kolejnych minorów.

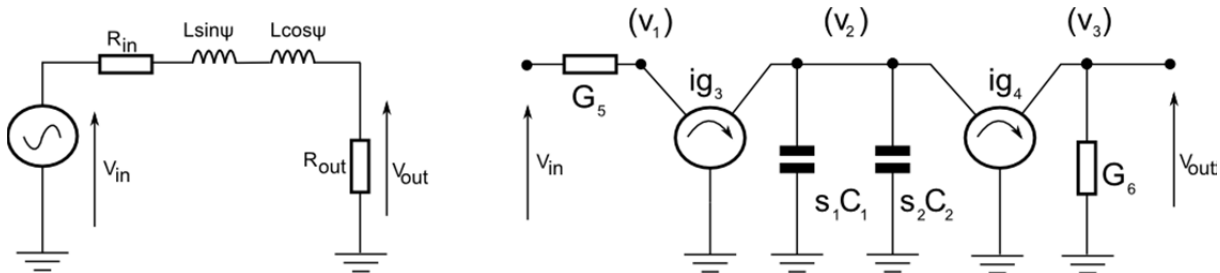
$$(1) \quad H_2^N(s_1, s_2) = \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N s_1^i s_2^j a_{ij}(X)}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N s_1^i s_2^j b_{ij}(X)}$$

W konsekwencji uzyskuje się symboliczną postać transmitancji obwodu, którą dla filtra dwuwymiarowego można wyrazić przez (1). W tym przypadku X reprezentuje zbiór zmiennych symbolicznych zawierających wartości elementów zastosowanych w obwodzie. Wyrazy wielomianów licznika i mianownika transmitancji zawierają kombinacje liniowe wystąpień zmiennych symbolicznych. Licznik transmitancji powstaje poprzez obliczenie

wyznacznika macierzy admitancyjnej po zastąpieniu kolumny reprezentującej węzeł wyjściowy przez wektor pobudzeń.

Przykład realizacji

Rozważmy przypadek wielowymiarowego filtra przeznaczanego do filtracji przestrzennej sygnałów radiowych z uwzględnieniem układu anten odbiorczych o zadanej orientacji wyrażonej kątem Ψ . Na rysunku 4 zaprezentowano strukturę prostego filtra na podstawie [4] oraz jej odpowiednik żyratorowo-pojemnościowy.



Rys.4. Przykład filtra przestrzennego 1-go rzędu (na podstawie [4]) oraz jego odpowiednik żyratorowo-pojemnościowy

```

library VLSI;
use VLSI.SI.all;
entity example is port (
    terminal input Vin : electrical;
    terminal output Vout : electrical;
    terminal ground gnd: electrical);
end entity example;
-- some comment line
architecture example_arch of example is
variable v1,v2 : real;
begin
-- capacitors
C1 : GC_CAP generic map(dim=>1) port map (Ni=>v1, Nj=>gnd);
C2 : GC_CAP generic map(dim=>2) port map (Ni=>v1, Nj=>gnd);
-- conductances with I/O signals
G5 : GC_CON port map (Ni=>Vin, Nj=>v1);
G6 : GC_CON port map (Ni=>v3, Nj=>gnd, Vo=>Vout);
-- gyrators
ig3 : GC_GYR port map( Ni=>v1, Nj=>v2);
ig4 : GC_GYR port map( Ni=>v2, Nj=>v3);
end architecture;

```

Rys.5. Opis VHDL-AMS dla rozważanego filtra

Oprogramowanie dokonuje rozpoznania elementów występujących w obwodzie i szereguje je wedle rodzaju przy zachowaniu porządku: pojemności, żyratory, konduktancje. Następnie każdy z elementów ma przypisaną uogólnioną zmienną symboliczną oznaczaną literą x oraz numerem odpowiadającym wystąpieniu elementu na schemacie. W dalszych rozważaniach utrzymana zostanie ta konwencja. Indeksy zmiennych symbolicznych odpowiadają indeksom elementów na rysunku 4. Analiza symboliczna tak przedstawionego układu prowadzi do uzyskania wyjściowego opisu dla transmitancji układu na podstawie metody potencjałów węzłowych:

$$(2) \quad H_2^1(s_1, s_2) = \frac{\begin{vmatrix} x_5 & x_3 & x_5 \\ -x_3 & s_1 x_1 + s_2 x_2 & 0 \\ 0 & -x_4 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_5 & x_3 & 0 \\ -x_3 & s_1 x_1 + s_2 x_2 & x_4 \\ 0 & -x_4 & x_6 \end{vmatrix}} = \frac{x_3 x_4 x_5}{s_1 x_1 x_5 x_6 + s_2 x_2 x_5 x_6 + x_4^2 x_5 + x_3^2 x_6}$$

Uzyskany wynik w programie jest reprezentowany w postaci dwóch liczb strukturalnych wyrażających wielomiany symboliczne dla licznika oraz mianownika transmitancji. Dzięki temu możliwe jest przeprowadzenie kolejnych etapów przetwarzania, mających na celu odnalezienie wartości zmiennych symbolicznych, dla których układ spełni obrane założenia projektowe.

Podsumowanie

W niniejszym opracowaniu przedstawiono koncepcję opisu struktur filtrujących w oparciu o język VHDL-AMS. Struktury te można wyrażać poprzez zbiór wzajemnie połączonych bloków funkcyjnych o parametryzowanej budowie. Takie podejście zapewnia możliwość czytelnej reprezentacji obwodu, nawiązuje do standardów istniejących od dawna w świecie układów cyfrowych. Pozwala także na implementowanie algorytmów zautomatyzowanego projektowania struktur zadanych rzędów i topologii. Przyjęte podejście pozwala na projektowanie i analizę symboliczną układów wielowrotnikowych. Zapewnienie możliwości definiowania operatorów skojarzonych z danymi elementami reaktancyjnymi pozwala natomiast na uogólnienie omawianego zagadnienia do systemu projektowania wielowrotników N -wymiarowych. Na bieżącym etapie rozwoju badań opracowano oprogramowanie, dzięki któremu możliwe jest uzyskiwanie transmitancji symbolicznych dla rozpatrywanych struktur. Wyrażenie takiej transmitancji w postaci N -wymiarowej liczby strukturalnej K -tego rzędu ułatwia implementowanie powszechnie znanych metod optymalizacji wielokryterialnej dla znalezienia wartości elementów występujących w obwodach. Uzyskanie transmitancji symbolicznej w postaci dwóch liczb strukturalnych dla licznika i mianownika pozwala na przeprowadzenie syntezy obwodu metodą porównywania współczynników transmitancji. Autorzy żywią przekonanie, że dalszy postęp prac związany z rozwojem narzędzi syntezy automatycznej makrokomórek w realizacji SC, SI lub OTA-C zaowocuje uzyskaniem kompletnego kompilatora krzemowego, który może być z powodzeniem zastosowany do przyspieszenia projektowania wielowymiarowych, mieszanych układów CMOS dla wczesnego przetwarzania sygnałów wizyjnych w układach mieszanych klasy SoC.

LITERATURA

- [1] Handkiewicz A., Katarzyński P., Szczesny S. et al, Design automation of a lossless multiport network and its application to image filtering, *Expert Systems with Applications*, vol. 41, issue 5, (2014), 2211-2221
- [2] Matei R., Goras L., Two-dimensional filter design based on frequency mapping of analog prototype filters, *Circuit Theory and Design (ECCTD)*, 2011 20th European Conference on, (2011), 326-329
- [3] Jendernalik W., Blakiewicz G., Handkiewicz A., Melosik M., Analogue CMOS ASICs in Image Processing Systems, *Metrology and Measurement Systems*, vol. XX, Issue 4, (2013), 613-622
- [4] Madanayake A., Wijenayake C., Dansereau D.G. et al, Multidimensional (MD) circuits and systems for emerging applications including cognitive radio, radio astronomy, robot vision and imaging, *Circuits and Systems Magazine*, IEEE, vol.13, no.1, (2013), 10-43
- [5] Jendernalik W., Jakusz J., Blakiewicz G., Piotrowski R., Szczepanski S., Analog CMOS processor for early vision processing with highly reduced power consumption, *Circuit Theory and Design (ECCTD)*, 2011 20th European Conference on, (2011), 745-748
- [6] Ahmad M.O., Ahmadi M., Ramachandran V., Transfer-function realisation of a class of doubly terminated two-variable lossless networks and their application in two-dimensional analogue and digital filter design, *Electronic Circuits and Systems*, IEE Proceedings G, vol.131, no.2, (1984), 67-71
- [7] Handkiewicz A., *Mixed-Signal Systems: A Guide to CMOS Circuit Design*, Wiley-IEEE Press, ISBN: 978-0-471-22853-0, 2002
- [8] Katarzyński P., Melosik M., Handkiewicz A., gC-Studio – the environment for automated filter design, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, Technical Sciences, vol. 61, no. 2, (2013), 541-544

Autorzy: dr inż. Piotr Katarzyński, E-mail: piotr.katarzynski@put.poznan.pl; prof. dr hab. inż. Andrzej Handkiewicz, E-mail: Andrzej.Handkiewicz@put.poznan.pl; Politechnika Poznańska, Wydział Informatyki, ul. Piotrowo 3A, 61-138 Poznań.