

Metoda szybkiego prototypowania wielostopniowych modulatorów MASH za pomocą dynamicznie reprogramowanych układów FPAA

Streszczenie. Projektowanie układów analogowych i cyfrowych w jednym układzie scalonym jest drogie i czasochłonne z powodu braku uniwersalnych narzędzi CAD do ich prototypowania. W pracy zaproponowano oprogramowanie GEN_SecOrd z wykorzystaniem możliwości dynamicznego reprogramowania układu FPAA AN231E04 firmy Anadigm® do prototypowania wielostopniowych modulatorów sigma-delta. To innowacyjne narzędzie zapewnia efektywną metodę analizy i testowania eksperymentalnych modulatorów MASH. Pozwala dokonywać wyboru i przestrajac strukturę modulatora, w celu osiągnięcia zadanych właściwości. Dla potwierdzenia skuteczności prototypowania zostały wykonane pomiary trzech struktur dwustopniowych modulatorów sigma-delta, a ich wyniki przedstawiono w pracy.

Abstract. Designing analog and digital circuits fabricated in one chip is time consuming and cost effective, because universal CAD tools to prototype mixed circuits are missing. In the paper, the GEN_SecOrd software using dynamically reprogramming analog circuits in FPAA AN231E04 chip to prototype multistage m -th order MASH modulators is presented. This innovative software provides with effective analysis and testing method of experimental modulators. It allows to select and adjust modulator structure to satisfy desired modulator performances. To verify prototyping effectiveness, three structures of two-stage 3rd order MASH modulators have been measured and obtained results are presented in the paper. (**A Method of Quick Prototyping of Multistage MASH Modulators with a help of Dynamically Reprogrammable FPAA.**)

Słowa kluczowe: przetwornik a/c, MASH, FPAA, projektowanie układów analogowych, układy programowane dynamicznieprototypowanie.
Keywords: a/d converter, MASH, FPAA, analog circuits design, dynamically programmable circuits, prototyping.

Wprowadzenie

W ostatnich latach, wzrosło zainteresowanie projektantów układów scalonych przetwornikami a/c z wielostopniowymi modulatorami sigma-delta (MASH) [1, 2]. Przetworniki te charakteryzują się dużą rozdzielczością, małą wrażliwością na zmiany wartości elementów przetwornika i oferują dużą stabilność dla struktur modulatorów trzeciego i wyższych rzędów.

Szybki rozwój technologii VLSI umożliwił wytwarzanie systemów mieszanych (analogowych i cyfrowych) w jednym w układzie scalonym (SoC). Niestety większość narzędzi projektowania i testowania jest dedykowana dla systemów cyfrowych i mało wydajna dla analogowych. Charakterystyki układów i systemów analogowych są wyznaczane i weryfikowane za pomocą symulatorów takich jak SPICE, które z kolei nie są efektywne w projektowaniu układów i systemów cyfrowych. Z tych powodów projektowanie i budowa prototypów układów mieszanych jest trudna i czasochłonna. Rozwój systemów reprogramowalnych umożliwił szybsze i bardziej wydajne projektowanie systemów mieszanych. Polega ono na tworzeniu prototypów z możliwością korygowania ich właściwości za pomocą rekonfiguracji ich struktur lub wartości elementów składowych. Reprogramowalne układy scalone FPGA (Field Programmable Gate Array) oraz FPAA (Field Programmable Analog Array) umożliwiają szybkie i tanie prototypowanie odpowiednio systemów cyfrowych [3, 4], analogowych [5, 6] i niektórych mieszanych [7, 8].

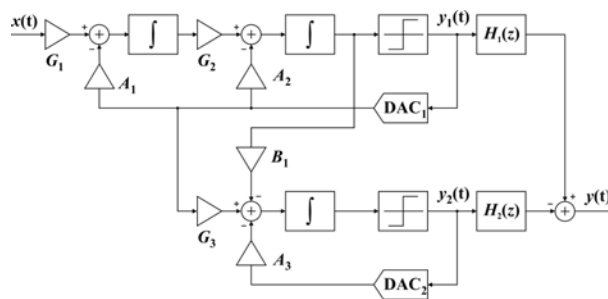
W pracy do prototypowania układu analogowego wykorzystano scalony układ reprogramowalny FPAA Anadigm®'s AN231E04. Jest on dynamicznie rekonfigurowalny i za pomocą sterownika mikroprocesorowego umożliwia kontrolę funkcji analogowych w czasie rzeczywistym. Projektowany prototyp systemu analogowego może być na bieżąco rekonfigurowany w układzie FPAA, a wartości jego elementów zmieniane tak by zrealizować zadane funkcje systemu. Wszystkie zmiany mogą być wykonane bez przerywania pracy systemu i pod kontrolą dedykowanego oprogramowania. Stosując dynamiczną rekonfigurację możemy dobierać odpowiedź pętli sprzężenia zwrotnego,

przestrajac współczynniki wzmocnienia i zmieniać charakterystyki prototypu.

Artykuł przedstawia budowę i testowanie prototypu w zastosowaniu do sprzętowej implementacji dwustopniowych modulatorów MASH trzeciego rzędu. Zestaw uruchomieniowy AnadigmApex z czterema układami AN231E04 FPAA i oprogramowaniem GEN_SecOrd zostały wykorzystane do dynamicznego modyfikowania parametrów prototypu.

Implementacja modulatora mash w układzie fpaa

W pracy przedstawiono prototypowanie dwustopniowego modulatora MASH trzeciego rzędu o strukturze pokazanej na Rys. 1. Składa się on z trzech integratorów, czterech sumatorów dwóch komparatorów, dwóch jednobitowych przetworników c/a, dwóch układów różniczkujących o transmitancjach $H_1(z)$ i $H_2(z)$ i sześciu wzmacniaczy o regulowanych wzmocnieniach pętli głównej G_1 , G_2 i G_3 , wzmocnieniach w pętlach sprzężenia zwrotnego A_1 , A_2 i A_3 oraz wzmocnieniu między stopniami B_1 . Modyfikacja wzmocnień G_1 , G_2 , G_3 , A_1 , A_2 , A_3 oraz B_1 umożliwia przestrajanie i analizę parametrów modulatora.

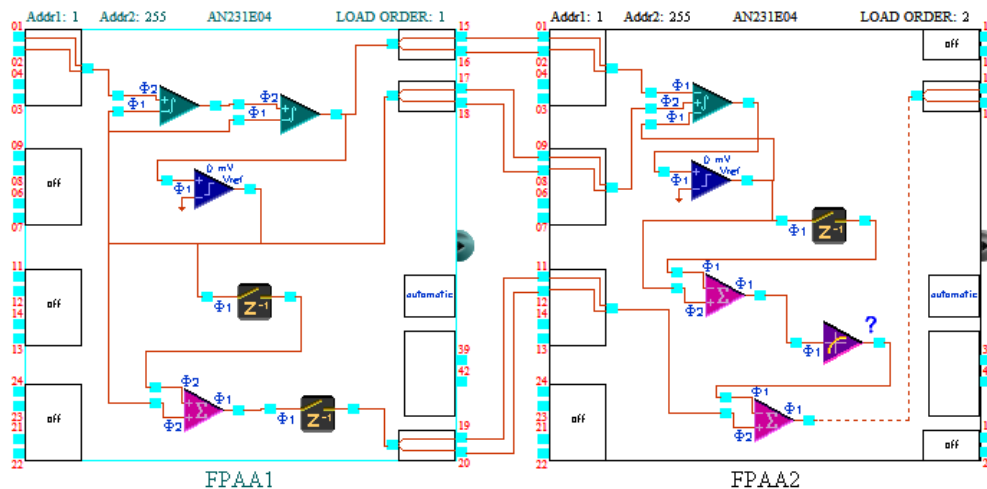


Rys.1. Schemat blokowy dwustopniowego modulatora MASH trzeciego rzędu

Implementacja modulatora MASH trzeciego rzędu z Rys. 1 w strukturze układu scalonego FPAA AN231E04 jest pokazana na Rys. 2. Modulator jest próbkowany dwufazowym zegarem o częstotliwości 4 MHz.

Prototyp modulatora wykorzystuje trzywejsiowe integratory z dynamicznie przestrajonymi wzmocnieniami w zakresie 0.04 – 4.20 jednostki, co pozwala na różnorodne kształtowanie charakterystyki widmowej gęstości mocy szumów modulatora i jest główną zaletą konfiguracji

modulatorów MASH. Przetwarzany sygnał jest opóźniony w pętach sprzężenia zwrotnego o okres próbkowania. Komparatory w obu stopniach przetwarzają sygnał analogowy na strumień cyfrowy.

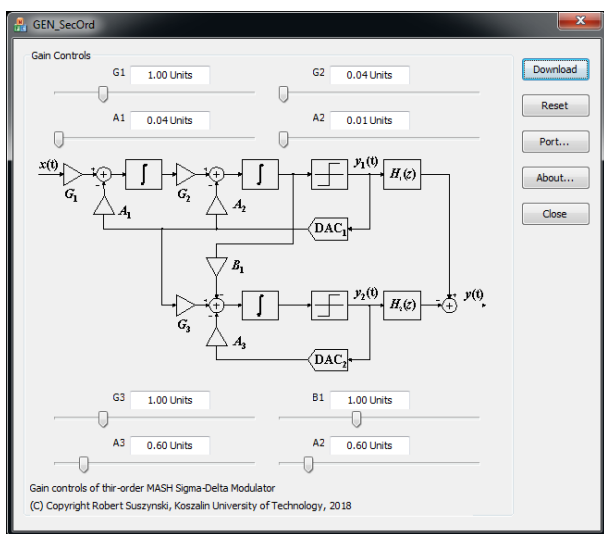


Rys.2. Implementacja modulatora MASH trzeciego rzędu

Dedykowane oprogramowanie gen secord

W prototypowaniu modulatorów MASH wykorzystano autorski program GEN_SecOrd zarządzający zestawem uruchomieniowym z czterema układami FPAA AN231E04. Pozwala on konfigurować strukturę modulatora MASH o ustalonych parametrach początkowych, zrzut ekranu pokazany na Rys. 3. Uruchomienie programu GEN_SecOrd prowadzi do dynamicznej modyfikacji wybranych lub wszystkich parametrów struktury modulatora, tak by spełnić zadane wymagania projektowe. W procesie modyfikacji parametrów $G_1, G_2, G_3, A_1, A_2, A_3$ oraz B_1 , ich wartości są korygowane w jednym cyklu zegarowym i przesyłane do systemu testowego. Umożliwia to modyfikację parametrów modulatora w czasie rzeczywistym. Obserwacja i pomiary przebiegów wyjściowych modulatora pozwalają na szybkie testowanie i optymalizację parametrów modulatora.

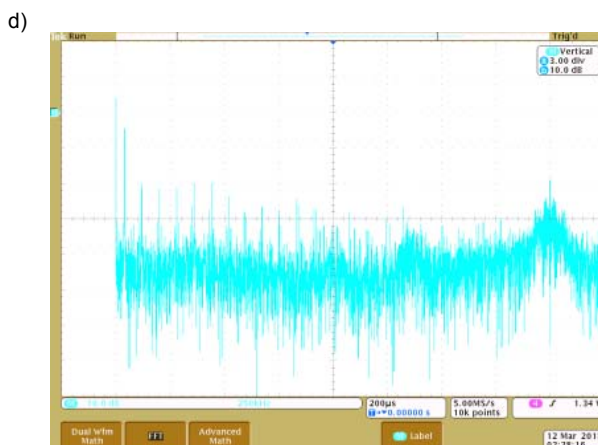
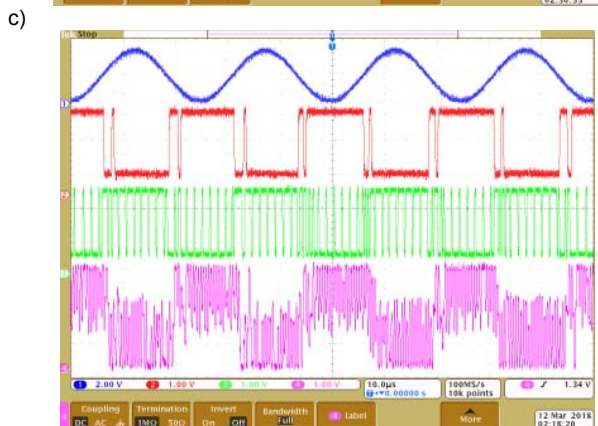
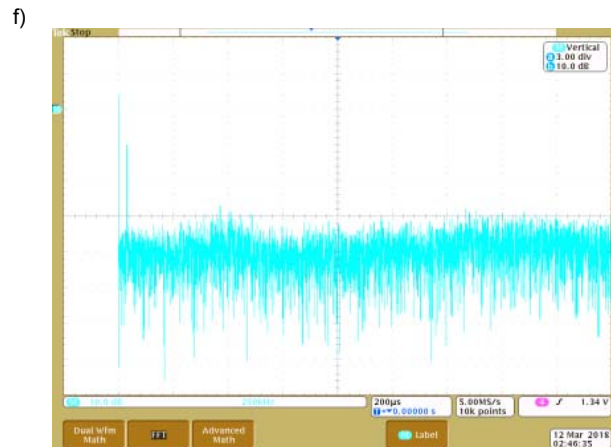
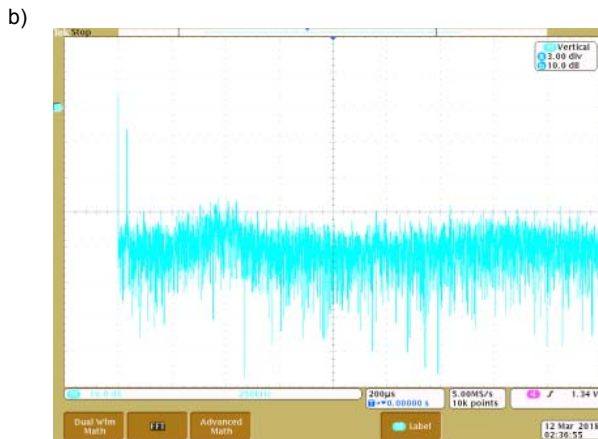
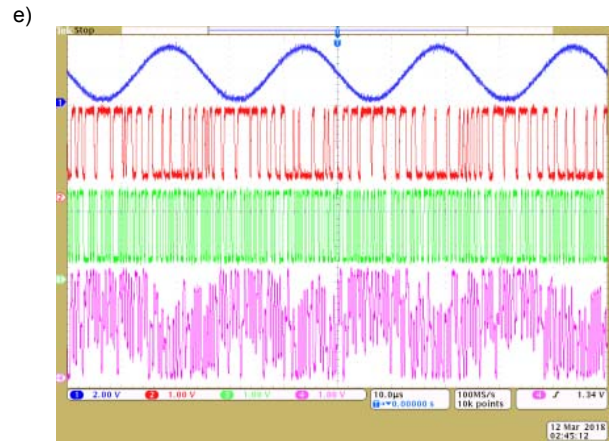
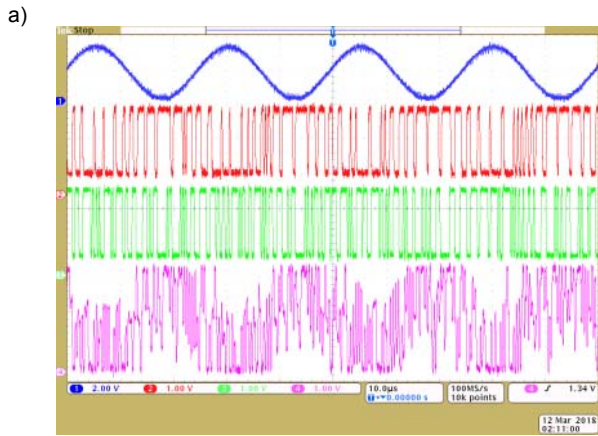
wzmocnienia układów wejściowych zaimplementowanego dwustopniowego modulatora MASH trzeciego rzędu. Jest ono zatem efektywnym narzędziem do optymalizacji prototypów modulatorów o zadanych właściwościach. W celu zweryfikowania działania systemu zmierzono trzy prototypy modulatora MASH. Pierwszy jest dobrany ze względu na charakterystyki kształtowania widmowej gęstości mocy szumu. W tej konfiguracji modulator uzyskuje optymalne parametry. Drugi ilustruje działanie przetwornika w niekorzystnych warunkach pracy, powodujących silne zniekształcenia nieliniowe, które powodują niekorzystne harmoniczne w paśmie przepustowym modulatora oraz blisko górnej częstotliwości granicznej. Oba te czynniki utrudniają efektywną pracę decymatora oraz powodują pogorszenie współczynnika SNDR. Przekłada się to na pogorszenie pracy modulatora i zmniejszenie jego efektywnej rozdzielczości. Trzeci modulator wykazuje płaską charakterystykę, bez kształtowania widmowej gęstości mocy szumu dla wyższych częstotliwości, co jest pożądane w przypadku modulatorów sigma-delta. W tych warunkach pracy modulator uzyskuje poprawne parametry, akceptowalne dla modulatora 3-rzędowego, jednak poprzez odpowiednie kształtowanie tej charakterystyki można w tej samej konfiguracji uzyskać lepsze parametry szumowe, a przez to i rozdzielczość przetwornika, co ilustruje przykład pierwszego modulatora. Przebiegi wyjściowe modulatorów zostały pomierzone za pomocą wbudowanego analizatora FFT w mierniku przebiegów cyfrowych Tektronix MSO 4054. Analiza spektralna była dokonywana dla 10^8 próbek wewnątrz prostokątnego okna czasowego. Pozwala ona wyznaczyć widmo gęstości mocy szumów, SNDR, SFDR, rozdzielczość i moc pobieraną ze źródła zasilania. Były one wyznaczone dla pobudzenia o częstotliwości 1 kHz, i częstotliwości próbkowania 4 MHz, a więc współczynnika nadpróbkowania $OSR = 4000$. Zestawienie otrzymanych współczynników $G_1, G_2, G_3, A_1, A_2, A_3, B_1$ oraz parametrów trzech otrzymanych prototypów modulatorów zostały pokazane w tabelach 1 i 2, a przebiegi i analizy FFT na rys. 4.



Rys.3. Zrzut ekranu autorskiego programu Gen_SecOrd

Pomiary prototypu

Oprogramowanie GEN_SecOrd współpracujące z układami FPAA AN231E04 umożliwia dynamiczną zmianę



Rys.4. Kolejno od góry: sinusoidalny sygnał wejściowy, cyfrowe przebiegi wyjściowe 1-go stopnia, II-go stopnia, całego modulatora oraz widmo sygnału wyjściowego modulatora MASH z a),b) modulator 1 c),d) modulator 2 e),f) modulator 3

Tabela 1. Współczynniki trzech struktur modulatora MASH

Współczynnik	Modulator 1	Modulator 2	Modulator 3
G_1	4	4	4
A_1	4	2	4
G_2	4	4	4
A_2	4	2	4
B_1	4	4	2
G_3	4	4	2
A_3	4	4	4

Tabela 2. Parametry trzech struktur modulatora MASH

Parametr	Modulator 1	Modulator 2	Modulator 3
Rozdzielczość (bit)	13	10	12
Częstotliwość próbkowania (MHz)	4	4	4
OSR	4 000	4 000	4 000
Moc pobierana (mW)	216	216	216
SNDR (dB)	73.2	63.2	71.8
SFDR (dB)	77.1	68.2	76.1

Przedstawiony system prototypowania pozwala na modyfikowanie właściwości modulatora MASH, w tym kształtowanie jego widmowej gęstości mocy szumów. Czas zmiany parametrów zależy od przyjętej metody pomiaru. Przy wykorzystaniu wbudowanego w przyrząd pomiarowy układu analizatora FFT, analiza spektralna sygnału wyjściowego modulatora jest otrzymywana w czasie rzeczywistym. Modyfikacja dowolnego z parametrów

struktury prowadzi do natychmiastowego wyświetlenia spektrum sygnału wyjściowego na oscyloskopie i pozwala skorygować charakterystykę częstotliwościową oraz harmoniczne sygnału wyjściowego. Doświadczenie projektanta w połączeniu z pośrednimi pomiarami umożliwia szybkie i efektywne prototypowanie modulatorów MASH.

Wnioski końcowe

Z uwagi na posiadane właściwości modulatory MASH znajdują liczne zastosowania, a temat poszukiwania ich nowych struktur jest obecnie podejmowany w literaturze naukowej. Projektowanie, analiza i testowanie modulatorów MASH napotyka jednak na liczne problemy z uwagi na ich nieliniową charakterystykę. Przedstawione oprogramowanie GEN_SecOrd jest innowacyjnym narzędziem wychodzącym naprzeciw potrzebom projektantów eksperymentalnych struktur modulatorów. Dostarcza narzędzia do analizy właściwości otrzymywanych struktur i pozwala na eksperymentalny dobór struktury i jej rekonfigurację bądź dostrojenie w celu osiągnięcia zadanych właściwości.

Zaletą przedstawianego systemu prototypowania struktur modulatorów MASH jest testowanie układów z przełączanymi kondensatorami w czasie rzeczywistym. Wybór nowych parametrów struktury modulatora i tym samym nowych właściwości modulatora nie jest procesem iteracyjnym, ale zależy od zdolności dynamicznego korygowania właściwości modulatora poprzez płynną zmianę poszczególnych lub wszystkich parametrów struktury. Wyznaczenie właściwości modulatora nie polega na analizie lepszego lub gorszego modelu matematycznego, lecz na doświadczeniu projektanta i pomiarach korygowanych struktur implementowanych w technice przełączanych pojemności. Implementacja prototypu zbudowanego za pomocą przełączanych pojemności pozwala wyznaczyć rzeczywiste wartości takich parametrów jak m.in. moc pobierana ze źródła zasilania, pasmo przenoszenia czy szumy.

Przedstawiona została innowacyjna metoda prototypowania modulatorów MASH. Polega ona na dynamicznym reprogramowaniu modulatora w układzie scalonym AN231E04. Proponowane oryginalne oprogramowanie GEN_SecOrd wykorzystujące dynamiczną rekonfigurację układu AN231E04 pozwala na projektowanie prototypu modulatora MASH o zadanych wymaganiach. Ważną zaletą systemu prototypowania jest możliwość dynamicznego modyfikowania struktury modulatora w układzie AN231E04 niedostępne w standardowych metodach prototypowania nowych struktur. To podejście pozwala na optymalizację parametrów dowolnej struktury modulatora MASH trzeciego rzędu. Może ono zostać wykorzystane do systematycznego poszukiwania rozwiązań

modulatora o zadanych właściwościach. Prezentowane rezultaty trzech struktur modulatorów MASH trzeciego rzędu potwierdzają przydatność proponowanej metody prototypowania. Zaproponowane oprogramowanie, programowe konfigurowanie struktury modulatora, procedura testowania i osiągnięte rezultaty stanowią podstawę do dalszych prac badawczych. W planach jest rozbudowa oprogramowania GEN_SecOrd dla prototypowania bardziej złożonych struktur modulatorów oraz udoskonalenia metod zautomatyzowanych metod pomiarów tak by określać wrażliwość rozdzielczości modulatora na zmianę wybranych parametrów modulatora.

Autorzy: prof. nzw. dr inż. Robert Suszyński, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, Katedra Systemów Cyfrowego Przetwarzania Sygnałów, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin; prof. dr hab. inż. Krzysztof Wawryn, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, Katedra Systemów Cyfrowego Przetwarzania Sygnałów, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin.

LITERATURA

- [1] Y. Matsuya, et. al. A 17-Bit Oversampling A/D Conversion Technology Using Multistage Noise Shaping, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 24, no. 4, pp. 969-975, (1989)
- [2] Z. Ye, M.P. Kennedy, Reduced Complexity Mash Delta-Sigma Modulator, *IEEE Transactions On Circuits and Systems II - Express Briefs*, 54(8), pp.725-729, (2007)
- [3] A. Sasongko, A. Baghdadi, F. Rousseau, A.A. Jerraya, Towards SoC validation through prototyping: A systematic approach based on reconfigurable platform, *Design Automation for Embedded Systems*, vol. 8, no. 2-3, pp. 155-171, (2003)
- [4] A. Shoa, S. Shirani, Run-time reconfigurable systems for digital signal processing applications: A survey, *Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal Image and Video Technology*, vol. 39, no. 3, pp. 213-235, (2005)
- [5] R. Suszynski, K. Wawryn, Rapid prototyping of algorithmic A/D converters based on FPAA devices, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences*, vol. 61, no. 3, pp. 691-696, (2013)
- [6] P. Falkowski, A. Malcher, Dynamically programmable analog arrays in acoustic frequency range signal processing, *Metrology and Measurement Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 77-89, (2011)
- [7] L. Znamirovski, O.A. Palusinski, C. Reiser, Optimization technique for dynamic reconfiguration of programmable analog/digital arrays, *Analog Integrated Circuits And Signal Processing*, vol. 31, no. 1, pp. 19-30, (2002)
- [8] D. Angele, M. Stein, J.G. Kauffman, A reconfigurable Continuous-Time Delta Sigma-ADC using a digitally programmable g(m)-C Array, in *Proceedings of the 55th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems MWSCAS*, pp. 810-813, (2012)