

AUTOREFERAT

1. Imię i Nazwisko: Marek Blok

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- a) Dyplom ukończenia studiów magisterskich na Wydziale Elektroniki Politechniki Gdańskiej na kierunku Telekomunikacja z wynikiem bardzo dobrym, nadający tytuł magistra inżyniera. Gdańsk, 18 maja 1994r.
- b) Świadectwo ukończenia studiów podyplomowych pedagogicznych na Wydziale Zarządzania i Ekonomii Politechniki Gdańskiej w wynikuem dobrym. Gdańsk, 27 maja 1995r.
- c) Dyplom doktora nauk technicznych w zakresie telekomunikacji, nadany uchwałą Rady Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej z dnia 25 lutego 2003r. Tytuł rozprawy doktorskiej: „Projektowanie opóźniających filtrów cyfrowych FIR metodą iteracji czasowo-częstotliwościowej”.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.

- a) październik 2016 – do chwili obecnej – starszy wykładowca w Katedrze Sieci Teleinformacyjnych na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej
- b) październik 2007 – wrzesień 2016 – adiunkt naukowo-dydaktyczny w Katedrze Sieci Teleinformacyjnych na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej
- c) kwiecień 2003 – wrzesień 2007 – adiunkt naukowo-dydaktyczny w Katedrze Systemów Informacyjnych na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej
- d) październik 2002 – marzec 2003 – wykładowca w Katedrze Systemów Informacyjnych na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej
- e) lipiec 1994 – wrzesień 2002 – asystent w Katedrze Systemów Informacyjnych na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej
- f) kwiecień 1994 – czerwiec 1994 – asystent stażysta w Katedrze Systemów Informacyjnych na Wydziale Elektroniki Politechniki Gdańskiej

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego,

Jako „osiągnięcie naukowe uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora stanowiące znaczący wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej” wskazuję monografię pod tytułem „Filtry ułamkowoopóźniające – projektowanie metodą okien”.

* w przypadku, gdy osiągnięciem tym jest praca/ prace wspólne, należy przedstawić oświadczenia wszystkich jej współautorów, określające indywidualny wkład każdego z nich w jej powstanie

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy),
Marek Blok, Filtry ułamkowoopóźniające – projektowanie metodą okien, rok wydania 2015, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, dr hab. inż. Przemysław Dymarski, prof. nzw. Politechniki Warszawskiej, dr hab. inż. Marek Moszyński, prof. nzw. Politechniki Gdańskiej.

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Jednym z podstawowych elementów składowych algorytmów przetwarzania sygnałów dyskretnych jest element opóźniający ciąg próbek, tzw. opóźniacz realizujący opóźnienie o całkowitą wielokrotność odstępu (okresu) próbkowania. Jest on między innymi niezbędny w realizacji numerycznej wszystkich struktur filtrów cyfrowych. Aby go zrealizować wystarczy jedynie przechować w pamięci próbki sygnału przez określoną liczbę cykli zegara, bez angażowania obliczeń numerycznych, i później z nich skorzystać bez straty ich dokładności. To właśnie cechująca go łatwość realizacji jest jedną z najistotniejszych zalet cyfrowych implementacji wszystkich algorytmów przetwarzania sygnałów. Jednak wraz z rozwojem algorytmów przetwarzania i poszerzaniem się zakresu ich zastosowań coraz częściej pojawia się potrzeba dokładnego sterowania opóźnieniem sygnału, znacznie dokładniejszego od odstępu pomiędzy dwiema kolejnymi próbkami. Wymagany jest zatem element realizujący opóźnianie o niecałkowitą wielokrotność odstępu próbkowania, który, jako że takie opóźnianie jest operacją liniową, może być zrealizowany jako liniowy filtr cyfrowy nazywany filtrem ułamkowoopóźniającym (w skrócie filtr FD – *fractional delay filter*). Jednak opóźnianie sygnału o ułamkową część odstępu próbkowania jest zadaniem trudnym wiążącym się z nieuchronną degradacją opóźnianego sygnału, stąd ważna jest dbałość o dokładność projektowanych filtrów.

Zastosowania filtru FD są szerokie, wśród nich można wyróżnić następujące przykłady: modelowanie dźwięków instrumentów muzycznych ([30], [35]), kodowanie sygnałów mowy [28], estymacja opóźnienia (TDE – *time delay estimation*) [29], synchronizacja symbolowa w modemach cyfrowych ([3], [37]), czy też konwersja szybkości próbkowania (SRC – *sample rate conversion*) ([1], [19], [21], [23]). Warto zauważyć, że w większości tych zastosowań wymagany jest filtr realizujący tzw. przepróbkowanie sygnału, czyli obliczający wartości próbek sygnału w nowych chwilach, o zmiennym opóźnieniu (VFD – *variable fractional delay*) ([4], [22], [24], [31]). Oznacza to konieczność ustawicznej (tj. z próbki na próbkę) aktualizacji współczynników jego odpowiedzi impulsowej. Wśród takich zastosowań filtrów FD można wyróżnić dwie główne grupy. Pierwszą stanowi adaptacyjna kompensacja opóźnienia, np. w odbiorniku modemu, a drugą – konwersja szybkości próbkowania, zwłaszcza o niewspółmiernej krotności. W obydwu grupach opóźnienie ułamkowe $d \in [-0,5; 0,5)$ wymagane dla kolejnych próbek wyjściowych jest zmienne, zmieniające się nawet dla każdej próbki wyjściowej. Konieczne jest wtedy ponowne obliczenie wartości współczynników odpowiedzi impulsowej filtru FD. Ciągła aktualizacja współczynników wymusza stosowanie prostych metod projektowania o małej złożoności obliczeniowej. Stanowi to podstawową motywację do badań nad możliwością użycia metody okien do projektowania filtrów FD.

Moja rozprawa doktorska pt. „Projektowanie opóźniających filtrów cyfrowych FIR metodą iteracji czasowo-częstotliwościowej” poświęcona była projektowaniu filtrów opóźniających typu FIR

(*finite impulse response*) z użyciem złożonych obliczeniowo algorytmów iteracyjnych. Głównym celem rozprawy doktorskiej było zastosowanie koncepcyjnie prostego i intuicyjnego podejścia do projektowania filtrów FD polegającego na szeregu wielokrotnie powtarzanych prostych wymuszeń w dziedzinie czasu i częstotliwości. Chociaż w pracy wykazano, że zastosowanie metody rzutowania na podzbiory wypukłe (POCS – *Projection Onto Convex Subset*) umożliwia uzyskanie rozwiązań optymalnych, to jednak, ze względu na jej wolną zbieżność oraz trudności z doбором parametrów projektowania, ma ona ograniczone znaczenie praktyczne. W pracy doktorskiej, jako metodę referencyjną, rozpatrywałem również kolejny iteracyjny algorytm, zespolony algorytm Remeza, zaadoptowany do przypadku szczególnego – projektowania filtrów FD typu minimaks. W rozprawie wskazałem także na możliwość efektywnego numerycznie projektowania banku filtrów tego typu. Dodatkowo zaproponowałem algorytm zmiany szybkości próbkowania w oparciu o bank filtrów ułamkowoopóźniających realizującego konwersję dla stałego i wyrażonego liczbą wymierną stosunku wyjściowej i wynikowej szybkości próbkowania oraz metodę badania tego typu algorytmów.

Z kolei, monografia wymieniona w punkcie 4a skupia się na zupełnie odmiennej koncepcji projektowania cyfrowych filtrów FD typu FIR, czyli metodzie okien [40], uznawanej za prostą, ale też i niezbyt dokładną, a zatem intuicyjnie sprzeczną z głównym celem badań, którym było uzyskanie rozwiązań bliskich optymalnym. Istotnym założeniem monografii było bowiem skupienie się na projektowaniu filtrów FD o bardzo dużej dokładności ich opóźnienia i wartości chwilowej próbek wyjściowych, a jej motywem przewodnim było wykazanie, że metoda okien, cechująca się prostotą i niską złożonością numeryczną, ma istotne znaczenie praktyczne w projektowaniu tego typu filtrów. Praca ta jest próbą szerokiego ujęcia i usystematyzowania problematyki projektowania filtrów FIR w kontekście metody okien, obejmującej dwa jej odmienne warianty, metodę okien symetrycznych i metodę okien przesuwanych. W monografii zawarto wyniki badań podjętych przez jej autora kilka lat po doktoracie mających na celu poszerzenie, pogłębienie i uporządkowanie wiedzy na ten temat oraz opracowanie praktycznych rozwiązań pozwalających na projektowanie suboptymalnych filtrów FD metodą okien. Zakres tych prac oraz osiągniętych wyników jest przedstawiony szerzej w dalszej części autoreferatu.

Rozpatrywana w monografii metoda okien jest niewątpliwie najpowszechniej znanym sposobem projektowania filtrów cyfrowych. Jej popularność wynika z formalnej i numerycznej prostoty, która sprawia, że projektowanie przy jej użyciu można realizować na bieżąco, w czasie pracy algorytmu wykorzystującego projektowane filtry. Natomiast jej główną wadą jest trudność w projektowaniu filtrów o dużej dokładności aproksymacji. Wynika to między innymi z konieczności starannego doboru kształtu i szerokości okna użytego w projektowaniu.

Warto zauważyć, że chociaż publikacje na temat projektowania filtrów FD pojawiają się dość często, to niewiele jest prac traktujących o projektowaniu filtrów FD metodą okien. Problem w tym, że okna opisane prostymi wzorami na ogół nie gwarantują uzyskania filtrów o dokładności bliskiej rozwiązaniom optymalnym. Z kolei okna gwarantujące uzyskanie wysokiej jakości filtrów, w tym okna parametryczne, ze względu na dużą złożoność obliczeniową nie mogą być zastosowane tam, gdzie okno musi być wyznaczane na bieżąco. Wszystko to sprawia, że metoda okien w zastosowaniu

do projektowania filtrów FD jest wspomniana w nowszej literaturze sporadycznie, a dotychczasowy stan wiedzy w tym zakresie pozwala jedynie na jej ograniczone użycie.

Z odmienną sytuacją mamy do czynienia w metodach projektowania filtrów FD optymalnych w sensie kryterium minimaks (Czebyszewa), najmniejszych kwadratów (LS – *least squares*) albo maksymalnej płaskości (MF – *maximal flatness*) [27]. Algorytmy projektowania tych filtrów są bardziej złożone, za to projektowane filtry spełniają zadane wymagania projektowe. Zwłaszcza interesujące są filtry FD optymalne w sensie kryterium minimaks oraz najmniejszych kwadratów, dla których można określić wymaganą szerokość pasma aproksymacji, w którym to paśmie zapewniają one najmniejszy możliwy błąd wynikowych charakterystyk częstotliwościowych. Jednak duża złożoność obliczeniowa wyklucza projektowanie takich filtrów na bieżąco, w czasie pracy algorytmów, w których są one wykorzystywane. Stąd też filtry te są nieodpowiednie w zastosowaniach wymagających zmiennego lub przestrajanego opóźnienia. Gdy wielkość opóźnienia ulega zmianie dla każdej próbki wyjściowej, złożone algorytmy projektowania filtrów muszą być zastąpione przez prostsze rozwiązania, do których zalicza się, między innymi, wspomniana wcześniej metoda okien. Jednak metoda okien, jeżeli ma umożliwiać projektowanie filtrów FD wysokiej jakości, wymaga modyfikacji. Poza doбором odpowiedniego okna, dodatkowy problem stanowi konieczność modyfikacji tego okna wraz ze zmianą kluczowego parametru filtru, jakim jest jego opóźnienie ułamkowe. Ponieważ filtry FD najczęściej są rozpatrywane jako filtry o zmiennym opóźnieniu ułamkowym (VFD), modyfikacje metody okien sprowadzają się właśnie do wprowadzania zmian w oknie używanym w projektowaniu zależnie od wymaganego opóźnienia projektowanego filtru.

Jednym z istotnych celów naukowych omawianej monografii było wprowadzenie wyraźnego podziału metod projektowania filtrów FD z użyciem okien. Jak pokazano w monografii całościowe ujęcie problematyki projektowania filtrów VFD metodą okien wymaga rozpatrzenia dwóch odmiennych podejść: metody okien symetrycznych oraz metody okien przesuwanych. Metoda okien symetrycznych do projektowania filtrów VFD wykorzystuje jedno symetryczne okno prototypowe, które jest przeskalowywane zależnie od opóźnienia, co jest równoważne dodatkowej korekcji wzmocnienia filtru zależnej od jego opóźnienia. Metoda okien przesuwanych również wykorzystuje jedno symetryczne okno prototypowe, które w tym wariantcie jest próbkowane z przesunięciem równym opóźnieniu efektywnemu projektowanego filtru. Wspólną cechą obydwu podejść jest to, że jedno symetryczne okno prototypowe służy do projektowania całej rodziny filtrów różniących się jedynie opóźnieniem ułamkowym, a dokładność aproksymacji zależna jest od okna prototypowego użytego w projektowaniu. Zaletą takiego podejścia jest to, że takie pojedyncze okno można starannie dobrać zawczasu, na etapie projektowania filtru VFD.

Zauważmy, że chociaż w literaturze pojawia się wiele prac dotyczących projektowania filtrów FD, to tylko nieliczne z nich, zawierają propozycje metod projektowania filtrów FD, które można zaklasyfikować do tych dwóch wariantów metody okien. Bieżący stan literatury w zakresie projektowania filtrów FD metodą okien podsumowują kolejne akapity.

Metoda okien przesuwanych (*offset windowing*) pojawiła się w literaturze w odniesieniu do prostych dwu- i trzyskładnikowych okien kosinusowych ([18], [39]). Użycie okien kosinusowych wiąże się jednak z trudnością dopasowania się do wymagań projektowych, a jednocześnie dokładność

aproxymacji charakterystyk tak zaprojektowanych filtrów jest z reguły gorsza od dokładności filtrów optymalnych. Równolegle zaproponowano metodę przesuwania dla okien parametrycznych definiowanych w dziedzinie częstotliwości [26]. Użycie przesuwanego okna parametrycznego ułatwia dopasowanie się do wymagań projektowych, ale przekłada się to na znacznie wyższą złożoność obliczeniową aktualizacji okna przy zmianie jego opóźnienia. Dodatkowo, okna optymalne, pomimo że cechuje je najniższy możliwy poziom listków bocznych, użyte w projektowaniu filtrów FD nie prowadzą do rozwiązań optymalnych. Dlatego metody wykorzystujące okna przesuwane zostały wyparte przez optymalne i suboptymalne metody projektowania filtrów FD, głównie dla kryteriów LS oraz minimaks. Za odejściem od metody okien przesuwanego z pewnością również przemawiała trudność w realizacji przesuwania bardziej zaawansowanych okien. Warto zauważyć, że pomimo tej tendencji w literaturze przewija się przekonanie, że aby uzyskać najlepszą dokładność aproxymacji projektowanych filtrów FD, powinno się używać okien asymetrycznych dostosowanych od asymetrii odpowiedzi impulsowej filtru FD ([24], [27], [38]). W kontekście metody okien przesuwanego na uwagę zasługuje również pozycja [31], w której przedstawiono dyskretne charakterystyki częstotliwościowe na potrzeby implementacji filtrów FD w dziedzinie DFT. W pracy tej zaproponowano filtry o niewielkiej dokładności aproxymacji, ale jednocześnie pokazano związki zaproponowanych dyskretnych charakterystyk częstotliwościowych z projektowaniem z użyciem okien przesuwanego.

Jako pierwsze prace, które można powiązać z **metodą okien symetrycznych**, można uznać prace wskazujące na związki filtrów FD typu MF z symetrycznymi oknami dwumianowymi ([20], [25], [38]). Wykazano w nich analitycznie, że dla ustalonej długości odpowiedzi impulsowej filtry różniące się opóźnieniem można zaprojektować za pomocą jednego okna symetrycznego z dodatkową korekcją wzmocnienia filtru zależną od jego opóźnienia. Jednak znaczenie filtrów typu MF rozpatrywanych w tych pracach jest ograniczone ze względu na ich stosunkowo wąskie pasmo dobrej aproxymacji. Metoda **okien symetrycznych** pojawiła się w literaturze również w powiązaniu z projektowaniem filtrów optymalnych typu minimaks [24]. W zaproponowanym rozwiązaniu posłużono się symetrycznym oknem wyodrębnionym z filtru optymalnego typu minimaks o parzystej długości i opóźnieniu ułamkowym $d = 0,5$ okresu próbkowania. Posługując się tym oknem, odpowiednio korygując wzmocnienie projektowanych filtrów zależnie od ich opóźnienia, uzyskano filtry suboptymalne. Równocześnie w pracy, w której zaproponowano to rozwiązanie błędnie zasugerowano, że uzyskanie rozwiązań optymalnych wymaga stosowania okien przesuwanego. W literaturze pojawiają się również prace, w których okna symetryczne używane są do projektowania filtrów FD, ale bez stosowania korekcji wzmocnienia zależnej od opóźnienia filtru. Przykładowo, w pracy [36] wykazano, że filtr VFD można zaimplementować z użyciem banku filtrów różniczkujących. Co prawda, autor tej pracy stosuje metodę okien do projektowania poszczególnych filtrów różniczkujących, ale rozwiązanie takie jest równoważne projektowaniu tym oknem wynikowych filtrów FD. Stąd metoda ta jest równoważna użyciu tego samego symetrycznego okna do implementacji filtru FD niezależnie od zadawanego opóźnienia. Brak korekcji wzmocnienia sprawia jednak, że zaproponowane rozwiązanie nie pozwala na uzyskanie filtrów optymalnych [16].

Na uwagę zasługuje również praca [33], w której problem projektowania filtru FD rozpatrzono w kontekście opóźniania sygnału o ograniczonym paśmie (nadpróbkowanego). Można w niej odnaleźć

obydwa podejścia do projektowania filtrów FD metodą okien. W pracy tej zaproponowano użycie przesuwanego parametrycznego okna AP (*approximate prolate*), jednak pomimo że okno to jest zdefiniowane jako ciągła funkcja czasu, wskazano na stosunkowo dużą złożoność obliczeniową takiego rozwiązania. Dlatego w tej samej pracy, przy założeniu ograniczonego pasma opóźnianego sygnału, zaproponowano rozwiązanie wykorzystujące symetryczne okno AP, skalowane zależnie od opóźnienia projektowanego filtru. W obydwu wariantach użycie okna AP pozwala na uzyskanie dokładności aproksymacji około 4 dB gorszej od dokładności optymalnych filtrów FD typu minimaks. Co prawda, uzyskano również filtry o dokładności bliskiej filtrom optymalnym, ale wymagało to dodatkowej optymalizacji współczynników struktury. Pomimo interesujących wyników w opracowaniu ograniczono się jedynie do opóźniania sygnałów nadpróbkowanych i nie zwrócono uwagi na istotne różnice obydwu podejść (metody okien symetrycznych i metody okien przesuwanych) ujawniające się przy konwersji szybkości próbkowania sygnałów pełnopasmowych. Godna uwagi jest również praca [34], w której metodę okien zastosowano w projektowaniu filtru VFD pośrednio. W pracy tej parametryczne okno AP użyto do projektowania charakterystyki częstotliwościowej filtru interpolacyjnego, której próbki następnie są wykorzystywane w strukturze z próbkowaniem w dziedzinie częstotliwości implementującej filtr VFD.

Przedstawiony powyżej skrótowy przegląd wiedzy na temat projektowania filtrów FD stanowił punkt wyjścia do przeprowadzonych badań i eksperymentów, których celem było zbadanie właściwości filtrów FD projektowanych metodą okien symetrycznych oraz okien przesuwanych, w konsekwencji zaś wskazanie kierunku poszukiwań nowych rozwiązań w zakresie projektowania tych filtrów, ze szczególnym uwzględnieniem przydatności projektowanych filtrów w implementacji algorytmu konwersji szybkości próbkowania. Aby zrealizować te założenia, problematykę badawczą monografii wskazanej w punkcie 4a podzielono na następujące cele szczegółowe.

- Projektowanie filtrów suboptymalnych metodą okien symetrycznych dla wybranych kryteriów optymalizacji:
 - opracowanie reguł wyodrębniania okna referencyjnego oraz wyznaczania współczynnika korekcji wzmocnienia;
 - opracowanie metody bezpośredniego projektowania okien referencyjnych;
 - opracowanie uniwersalnej struktury dla filtrów suboptymalnych projektowanych metodą okien symetrycznych;
 - opracowanie nowej metody projektowania filtrów VFD – metoda DMF (*distributed maximal flatness*),
- Projektowanie filtrów FD metodą okien przesuwanych:
 - opracowanie metody przesuwania okien wyodrębnionych – użycie krótkich filtrów FD oraz aproksymacji wielomianowej;
 - implementacja filtrów FD projektowanych metodą okien przesuwanych w dziedzinie DFT na podstawie struktury z próbkowaniem w dziedzinie częstotliwości.
- Porównanie metody okien symetrycznych oraz okien przesuwanych w kontekście implementacji algorytmu zmiany szybkości próbkowania przy wykorzystaniu filtrów FD projektowanych z użyciem tych metod. W szczególności odpowiedź na następujące pytania:

- jakie są różnice w jakości filtrów FD projektowanych metodą okien w zależności od zastosowanego wariantu?
- jakie są właściwości algorytmów konwersji szybkości próbkowania realizowanego z użyciem filtrów FD projektowanych metodą okien w zależności od zastosowanego wariantu?

W ramach realizacji wymienionych powyżej celów uzyskano następujące rezultaty obejmujące główne autorskie osiągnięcia i wyniki zaprezentowane w monografii wskazanej w punkcie 4a:

A. Współautorstwo metody DMF, a w szczególności opracowanie metody automatycznego poszukiwania najlepszego rozwiązania

W ramach prac nad podstawowymi metodami projektowania optymalnych filtrów FD, które zostały przedstawione w monografii we wspólnym ujęciu macierzowym, zaprezentowano nową uniwersalną metodę projektowania filtrów cechujących się opóźnieniem ułamkowym – metodę rozłożonej maksymalnej płaskości (DMF – *distributed maximal flatness*) ([2], [10]), stanowiącą uogólnienie klasycznej metody MF. Rozproszenie w metodzie DMF warunków na maksymalną płaskość w całym zakładanym paśmie aproksymacji pozwala na projektowanie filtrów FD dla różnych kryteriów optymalizacji. Zaproponowane rozwiązanie pozwala na automatyczne poszukiwanie położenia częstotliwości wymuszenia zerowania się charakterystyki błędu oraz jego pochodnych dla zadawanej przez projektanta funkcji wagi oraz różnych funkcji błędu wykorzystywanych w kryterium optymalizacji. Umożliwia to projektowanie jedną metodą filtrów FD znacząco różniących się właściwościami błędu aproksymacji. Metodę tę omówiono w odniesieniu do projektowania „pasywnych” filtrów FD o wzmacnieniu nie większym od jedności.

B. Wyróżnienie dwóch wariantów metody okien do projektowania filtrów VFD i badanie oraz porównanie właściwości filtrów projektowanych tymi metodami

Przeprowadzone badania wykazały, że złożone algorytmy projektowania optymalnych (w sensie kryterium Czebyszewa oraz w sensie pasmowego kryterium LS) filtrów FD o asymetrycznych odpowiedziach impulsowych można w praktyce skutecznie zastąpić metodą okien [32]. Jednak, jak już wspomniano wcześniej, osiągnięcie dobrych efektów projektowania filtrów FD wymaga nieznaczących modyfikacji okna, zależnych od zakładanego opóźnienia ułamkowego. Efektywne rozwiązania projektowania filtrów FD metodą okien można podzielić na dwa warianty: metodę okien symetrycznych z korekcją wzmacnienia filtru oraz metodę okien przesuwanych [11]. Warto podkreślić, że w literaturze ([24], [27], [38]) pojawiają się stwierdzenia, że projektowanie filtrów FD, zwłaszcza jeśli mamy się zbliżyć do rozwiązań optymalnych, należy wiązać z metodą okien przesuwanych (asymetrycznych), a nie z metodą okien wyodrębnionych powiązaną z oknami symetrycznymi. Przeprowadzone badania wykazały, że przekonanie to jest częściowo błędne. Filtry optymalne należy wiązać z oknami symetrycznymi. Jednak w związku z tym, że okna wyodrębnione dla filtrów optymalnych w sensie Czebyszewa oraz w sensie kryterium LS są jedynie prawie symetryczne, ich symetrii nie można wykazać analitycznie. Obserwowana asymetria jest nieznaczna i nie można jej powiązać z metodą okien przesuwanych. Jednocześnie warto zauważyć, że dla filtrów

FD typu MF można wykazać, że równoważną metodę ich projektowania stanowi metoda okien symetrycznych dla okna dwumianowego z korekcją wzmocnienia, zależną od opóźnienia efektywnego projektowanego filtru ([20], [25], [38]).

C. Uogólnienie zaproponowanej w pracy [24] koncepcji projektowania filtrów minimaks metodą okien wyodrębnionych

W pracy [24] zaproponowano metodę projektowania suboptymalnych filtrów FD typu minimaks o parzystej długości poprzez użycie okna wyodrębnionego z odpowiedzi impulsowej filtru o opóźnieniu ułamkowym równym 0,5. Pokazano tam również, że aby uzyskać rozwiązania suboptymalne użycie pojedynczego okna należy uzupełnić o korekcję wzmocnienia filtru zależną od zakładanego opóźnienia ułamkowego. Prace nad metodą okien symetrycznych zaowocowały uogólnieniem tej koncepcji. W efekcie przeprowadzonych badań uzyskano następujące efekty opisane w monografii wskazanej w punkcie 4b:

- **Zaproponowanie rozkładania asymetrycznego okna wyodrębnionego z odpowiedzi impulsowej filtru optymalnego** o opóźnieniu ułamkowym $|d| \in (0; 0,5)$ na składową parzystą i nieparzystą i wykorzystanie tych składowych w metodzie okien do projektowania filtrów o dowolnym opóźnieniu [8],
- **Wykazanie, że optymalne filtry FD można projektować z użyciem okna asymetrycznego, komponowanego z przeskalowanej składowej parzystej i nieparzystej okna wyodrębnionego z odrębnymi współczynnikami skali dla każdej ze składowych okna.** Rozwiązanie to pozwala na prostą aktualizację współczynników filtru FD na bieżąco, podczas pracy algorytmu realizującego opóźnianie umożliwiając uniknięcie złożonych obliczeń wymaganych w metodach optymalnych [8],
- **Wykazanie, że możliwe jest projektowanie suboptymalnych filtrów FD z użyciem wyłącznie składowej parzystej okna wyodrębnionego z dodatkową korekcją skali tej składowej okna.** Pozwala to na uzyskanie dalszego obniżenia złożoności obliczeniowej aktualizacji współczynników filtru FD [16],
- **Opracowanie wzoru na uproszczone obliczanie współczynnika korekcji wzmocnienia** projektowanego filtru FD dla zadanego pasma aproksymacji w oparciu wyłącznie o współczynniki okna prototypowego [5],
- **Zbadanie możliwości zastosowania aproksymacji wielomianowej oraz tablicy LUT (*look-up-table*)** do wyznaczania wartości współczynnika korekcji wzmocnienia filtru na potrzeby implementacji filtru VFD [16],
- **Opracowanie metody bezpośredniego projektowania okien referencyjnych** pozwalającej na obniżenie złożoności obliczeniowej w stosunku do wyodrębnia tego okna z odpowiedzi impulsowej filtru optymalnego. Jednocześnie dla kryterium LS, korzystając z okien pozyskiwanych tą metodą, z uwagi na mniejszy wpływ błędów numerycznych, można projektować filtry o większej dokładności, niż dla bezpośredniego projektowania filtrów optymalnych [6],
- **Zaproponowanie struktury filtru VFD bazującej na metodzie wyodrębnionych okien symetrycznych,** w której możliwa jest zmiana właściwości zaimplementowanego filtru, jego

typu oraz szerokości pasma aproksymacji, poprzez prostą wymianę okna prototypowego oraz współczynników wielomianu aproksymującego współczynnik korekcji wzmocnienia filtra FD [16].

D. Opracowanie nowych rozwiązań w zakresie metody okien przesuwanych

Podobnie jak w metodzie okien symetrycznych, również w metodzie okien przesuwanych można się posłużyć składową parzystą okna wyodrębnionego z filtra optymalnego, uzyskując w ten sposób dużą dokładność aproksymacji. Jednak istotnym problemem w tej metodzie jest przesuwanie okna, gdy nie dysponujemy jego analogowym prototypem zadany w postaci wzorów analitycznych. Prace nad metodą okien przesuwanych, w tym nad rozwiązaniem problemu przesuwania okna zaowocowały następującymi efektami:

- **Zaproponowanie i przebadanie dwóch autorskich rozwiązań przesuwania okien: z użyciem krótkich filtrów FD oraz z użyciem aproksymacji wielomianowej.** Pokazano, że do przesuwania okien można skutecznie użyć krótkich filtrów FD stosując splot kołowy [12]. Drugie rozwiązanie wykorzystujące aproksymację wielomianową [9] pozwala na precyzyjne przesuwanie okna, jednak wymaga ono kilku bądź kilkunastu wariantów okna prototypowego uzyskanego dla różnych przesunięć, które trzeba wstępnie pozyskać inną metodą. Dobrym rozwiązaniem jest połączenie obydwu metod: wyznaczenie zestawu przesuniętych okien prototypowych z użyciem kilku krótkich filtrów FD i użycie go do wyznaczenia współczynników aproksymacji wielomianowej, a następnie precyzyjne przesuwanie okna realizowane z użyciem wielomianowej aproksymacji odcinkowej okna. Pozwala to na obniżenie złożoności obliczeniowej operacji przesuwania.
- **Wykazanie, że użycie w metodzie okien przesuwanych okien wyodrębnionych z odpowiedzi impulsowych filtrów optymalnych pozwala na projektowanie filtrów VFD bliskich filtrom optymalnym.** Co prawda, jak pokazano, tak projektowane pojedyncze filtry FD ustępują nieco jakością filtrom optymalnym, jednak jak wykazano w monografii, korzystniej jest zastosować tak projektowane filtry w zmianie szybkości próbkowania sygnałów pełnopasmowych, gdyż wówczas istotne są relacje pomiędzy poszczególnymi filtrami FD używanymi w przepróbkowaniu.
- **Zaproponowanie charakterystyk na potrzeby implementacji w dziedzinie DFT filtrów FD o dużej dokładności i powiązanie zaproponowanych charakterystyk z metodą okien przesuwanych.** Pozwala to na bezpośrednią implementację filtrów FD o dużej dokładności w dziedzinie DFT, bądź implementację filtra VFD, powiązanego z metodą okien przesuwanych, w oparciu o strukturę z próbkowaniem w dziedzinie częstotliwości [13]. Uzyskana w ten sposób struktura filtra VFD, cechująca się bardzo niską złożonością obliczeniową, stanowi unikatowe rozwiązanie pozwalające na implementację wysokiej jakości filtrów VFD powiązanych z metodą okien przesuwanych. Użycie tej struktury w powiązaniu z zaproponowanymi charakterystykami pozwala rozwiązać problem złożonego obliczeniowo przesuwania okna, co jest szczególnie istotne w implementacji zmiany szybkości próbkowania. Powiązanie filtra VFD z metodą okien przesuwanych pozwala bowiem na wykorzystanie pasmowych filtrów VFD [14], co przekłada się na możliwość zmiany położenia pasma

prześciowego filtru zbiorczego (interpolacyjnego) algorytmu zmiany szybkości próbkowania (SRC) [17], niedostępną przy zastosowaniu filtrów FD projektowanych metodą okien symetrycznych bądź metodami optymalnymi.

- **Wykazanie, że możliwe jest projektowanie filtrów VFD metodą okien przesuwanych bliskich filtrom optymalnym realizowane w dziedzinie DFT.** Zaproponowane dyskretne charakterystyki częstotliwościowe wymagają optymalizacji zaledwie kilku współczynników [13]. Nie można jednak zastosować prostych algorytmów gradientowych ze względu na występowanie wielu minimów lokalnych błędu aproksymacji charakterystyk częstotliwościowych.
- **Zaproponowanie metody realizacji filtrów pasmowych VFD o przestrajanej szerokości pasma.** Zmiana szerokości pasma tych filtrów pozwala na sterowanie pasmem filtru interpolacyjnego (zbiorczego) w algorytmie SRC zrealizowanym z użyciem takich filtrów [17]. Co bardzo istotne, jak wykazano w monografii poza zawężaniem pasma filtru interpolacyjnego, można uzyskać również jego poszerzenie. Uzyskuje się to poprzez implementację filtrów VFD o zawiniętych charakterystykach częstotliwościowych. W efekcie w powiązaniu ze strukturą z próbkowaniem w dziedzinie częstotliwości uzyskuje się oryginalne rozwiązanie pozwalające na jednoczesne sterowanie opóźnieniem jak i szerokością pasma implementowanego filtru FD.

E. Zastosowanie zaproponowanych rozwiązań w przepróbkowaniu sygnałów cyfrowych

W opisanych wcześniej osiągnięciach znalazły się odniesienia do algorytmów SRC. Wynika, to z tego, że najistotniejsze różnice pomiędzy projektowaniem metodą okien symetrycznych oraz metodą okien przesuwanych ujawniają się, jeżeli rozpatruje się filtry projektowane tymi metodami w kontekście realizacji algorytmów SRC. Jednocześnie algorytm SRC zrealizowany w oparciu o filtr VFD jest najbardziej spektakularnym zastosowaniem tego typu filtrów, wymaga on bowiem ciągłej aktualizacji współczynników używanego filtru VFD, co z kolei wymusza stosowanie prostych metod projektowania o małej złożoności numerycznej. W takim kontekście prezentowana w omawianej monografii metoda okien jest szczególnie interesująca zwłaszcza w zestawieniu z zaproponowanym nowym rozwiązaniem, jakim jest algorytm zmiany szybkości próbkowania o płynnie zmienianej w czasie krotności. Głównym motywem do realizacji takiego algorytmu zmiany szybkości próbkowania, poza zademonstrowaniem przydatności filtrów projektowanych zaproponowanymi metodami do tego zastosowania, była chęć przeanalizowania efektów użycia filtrów FD projektowanych metodą okien z uwzględnieniem zaproponowanego w monografii podziału na metodę okien symetrycznych i metodę okien przesuwanych.

W ramach realizacji tego celu osiągnięto następujące efekty:

- **Opracowanie autorskiej referencyjnej/konkurencyjnej wydajnej obliczeniowo implementacji algorytmu SRC wykorzystującej filtry I-FIR (interpolowane filtry typu FIR - *Interpolated FIR*).** Rozwiązanie to, obok klasycznego algorytmu SRC, stanowi punkt wyjścia do analizy algorytmów SRC zrealizowanych z użyciem filtrów VFD [7].

- **Opracowanie algorytmu realizującego płynną zmianę szybkości próbkowania wykorzystującego filtry VFD.** Klasyczne algorytmy zmiany szybkości próbkowania, pomimo małej złożoności obliczeniowej ich polifazowych implementacji, przede wszystkim cechuje brak możliwości realizacji przepróbkowania o dowolnej krotności oraz zmian tej krotności w trakcie przepróbkowania. Tych wad jest pozbawione zaprezentowane w monografii nowe rozwiązanie wykorzystujące filtr VFD bazujący na filtrach projektowanych metodą okien do realizacji zmiany szybkości próbkowania o płynnie zmienianej krotności [15]. W monografii pokazano, jak za pomocą zaproponowanego algorytmu można przepróbkować sygnał ze zmienną krotnością, a następnie proces ten odwrócić.
- **Zastosowanie w algorytmie SRC filtrów VFD bazujących na filtrach FD projektowanych metodą okien przesuwanych.** To nowe rozwiązanie [17] pozwala na zmianę szerokości pasma filtra zbiorczego (interpolacyjnego) na bieżąco w trakcie przepróbkowania, co jest szczególnie istotne w implementacji przepróbkowania o zmiennej krotności. Dodatkowo, korzystając ze struktury z próbkowaniem częstotliwości i zaproponowanych dyskretnych charakterystyk częstotliwościowych pozwalających na przestrajanie szerokości pasma filtra VFD, można uzyskać implementację algorytmu SRC cechującą się niską złożonością obliczeniową, zatem pozwalającą na sterowanie szerokością pasma filtra interpolacyjnego na bieżąco.

Zaletą metody okien użytej do projektowania filtrów FD, poza dokładnością aproksymacji zbliżoną do dokładności uzyskiwanej dla optymalnych filtrów FD, jest łatwość analizy właściwości algorytmu SRC realizowanego z użyciem takich filtrów. W tym celu wystarczające okazuje się zbadanie właściwości okna zbiorczego, utworzonego poprzez kompozycję polifazową okien użytych do projektowania poszczególnych filtrów FD użytych w przepróbkowaniu. Badając właściwości okien oraz filtrów zbiorczych uzyskiwanych dla algorytmów SRC oceniono przydatność w tym zastosowaniu filtrów projektowanych obydwoma wariantami metody okien. Jednocześnie implementacja algorytmu SRC zaprezentowana w monografii pozwoliła na weryfikację tak uzyskanych wyników badań i analiz. Warto tu zauważyć, że z niewielką liczbą publikacji dotyczących projektowania filtrów FD metodą okien wiąże się również brak prac analizujących właściwości algorytmów SRC w powiązaniu z oknami stosowanymi wprost, bądź też niejawnie, jak to ma miejsce w metodach optymalnych, które można powiązać z metodą okien symetrycznych, do projektowania tych filtrów. A między innymi właśnie analiza tych związków doprowadziła autora omawianej monografii do zaproponowania charakterystyk dyskretnych pozwalających ma wydajną obliczeniowo implementację filtrów VFD o przestrajaniem opóźnieniu oraz szerokości pasma.

W ramach przeprowadzonych badań właściwości algorytmów SRC realizowanych z użyciem filtrów FD projektowanych metodą okien uzyskano następujące efekty:

- **Analiza i zebranie wniosków na temat użycia filtrów projektowanych metodą okien symetrycznych (w tym metodami optymalnymi powiązanych z tą metodą) w algorytmie SRC.** Stosując metodę okien symetrycznych można projektować suboptymalne filtry FD, na tyle bliskie filtrom optymalnym, że w zastosowaniach praktycznych można uznać je za filtry optymalne. Jednocześnie pokazano, że dla filtrów FD projektowanych metodą okien

symetrycznych, okno zbiorcze algorytmu SRC realizowanego z użyciem tych filtrów ma przebieg schodkowy z nieciągłościami występującymi w odstępach równych okresowi próbkowania sygnału wejściowego. Nieciągłości te przekładają się na występowanie w paśmie zaporowym filtru zbiorczego/interpolacyjnego oraz w charakterystyce amplitudowej okna zbiorczego silnych listków, skutkujących ograniczonym tłumieniem replik widmowych sygnału. Jednocześnie, w związku z powiązaniem filtrów optymalnych z metodą okien symetrycznych, okna zbiorcze uzyskane na podstawie filtrów optymalnych cechują takie same właściwościami. Co więcej, wspomniane listki występują również, gdy użyte są pasmowe filtry FD projektowane metodą okien symetrycznych, bądź optymalne pasmowe filtry FD. Dlatego filtrów FD projektowanych metodą okien symetrycznych oraz optymalnych filtrów FD nie należy stosować do zmiany szybkości próbkowania sygnałów pełnopasmowych bądź sygnałów pasmowych z silnymi zakłóceniami pozapasmowymi, o ile nie zastosuje się dodatkowej wstępnej filtracji pasmowej. Jednak ze względu na nieco mniejszy błąd aproksymacji i łatwiejsze projektowanie, filtry FD projektowane metodą okien symetrycznych są bardzo dobrym rozwiązaniem w przypadku zmiany szybkości próbkowania sygnałów o paśmie pokrywającym się z pasmem dobrej aproksymacji użytych filtrów FD.

- **Analiza i zebranie wniosków na temat użycia filtrów projektowanych metodą okien przesuwanych w algorytmie SRC.** Korzystając z metody okien przesuwanych uzyskuje się filtry FD, które są bliskie filtrom optymalnym ale, w odróżnieniu od filtrów projektowanych metodą okien symetrycznych, ich dokładność nieznacznie, ale zauważalnie, odbiega od jakości filtrów optymalnych. Jednocześnie sama natura metody okien przesuwanych, w której do projektowania filtrów różniących się opóźnieniem ułamkowym używa się okien przesuniętych o opóźnienie efektywne projektowanego filtru, sprawia, że okno zbiorcze algorytmu SRC realizowanego z użyciem tego typu filtrów jest gładkie w dziedzinie czasu, co sprawia, że w paśmie zaporowym filtru zbiorczego/interpolacyjnego nie występują niekorzystne silne listki, typowe dla użycia filtrów projektowanych metodą okien symetrycznych. Dodatkowo, co jest szczególnie istotne w realizacji algorytmów SRC, brak tych listków oznacza, że, jak pokazano w monografii, stosowanie w przepróbkowaniu pasmowych filtrów VFD projektowanych metodą okien przesuwanych również pozwala na uzyskanie filtru zbiorczego pozbawionego tych niekorzystnych listków. W rezultacie korzystając z pasmowych filtrów VFD można swobodnie sterować położeniem pasma przejściowego zbiorczego filtru interpolacyjnego. Cecha ta jest szczególnie istotna przy zmniejszaniu szybkości próbkowania. Podsumowując, z przeprowadzonych badań wynika, że w przypadku konwersji szybkości próbkowania sygnałów pełnopasmowych lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie nieoptymalnych, z punktu widzenia aproksymacji charakterystyk częstotliwościowych opóźniacza ułamkowego, filtrów FD projektowanych metodą okien przesuwanych.
- **Demonstracja skuteczność omawianych metod projektowania filtrów FD na przykładzie przepróbkowania sygnałów dźwiękowych.** Zrealizowano przepróbkowanie o płynnie zmienianej krotności zrealizowane z użyciem filtrów FD o zmiennej szerokości pasma. Działanie algorytmu płynnej zmiany szybkości próbkowania zademonstrowano na sygnałach mowy oraz muzyki fortepianowej modyfikując ich chwilową szybkość próbkowania a

następnie odwracając ten proces korzystając z tego samego algorytmu. Dodatkowo sygnały mowy poddano próbkowaniu z krotnością zależną od chwilowej wartości częstotliwości tonu krztaniowego. Uzyskano w ten sposób sygnał mowy, który odtwarzany ze stałą szybkością próbkowania brzmi syntetycznie, ale jednocześnie sprawia wrażenie bardziej melodyjnego. Również tu korzystając z tego samego algorytmu daje się przywrócić pierwotną szybkość próbkowania przetwarzanych sygnałów.

Bibliografia

- [1] Blok M.: Dwustopniowy algorytm zmiany szybkości próbkowania bazujący na filtrach ułamkowo-opóźniających. Krajowe Sympozjum Telekomunikacji, KST'2003, Akademia Techniczno-Rolnicza, 2003, B, s. 36-45.
- [2] Blok M., Rojewski M., Matyjas A.: Projektowanie filtrów ułamkowo-opóźniających metodą nierównomiernego próbkowania w dziedzinie częstotliwości. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2006, 9, s. 159–168.
- [3] Blok M.: Algorytm pozyskiwania symboli z synchronizacją symbolową operujący na przebiegu błędu detektora Gardnera. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2010, 19, s. 453-458.
- [4] Blok M.: Versatile structure for variable fractional delay filter based on extracted window method. Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne PWT'2011, WEiT - Politechnika Poznańska, 2011, s. 64-67.
- [5] Blok M.: On practical aspects of optimal FSD filter design using extracted window method. Proceedings of 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD'2011), Linköping 2011, s. 330–333.
- [6] Blok M.: Wyznaczanie okien do projektowania prawieoptymalnych filtrów opóźniających. Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 8-9, 2011, s. 1362-1367.
- [7] Blok M.: Zmiana szybkości próbkowania z zastosowaniem filtrów I-FIR. Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 8-9, 2011, s. 1374-1379.
- [8] Sac M., Blok M.: A nearly optimal fractional delay filter design using an asymmetric window. International Journal of Electronics and Telecommunications, 57 (4), 2011, s. 465-472.
- [9] Blok M.: Zmiana szybkości próbkowania z użyciem filtrów ułamkowoopóźniających projektowanych oknem offsetowanym z pomocą aproksymacji wielomianowej. Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 4, 2012, s. 125-128.
- [10] Blok M.: FIR filter design using distributed maximal flatness method. International Journal of Electronics and Telecommunications, 59 (1), 2013, s. 59-66.
- [11] Blok M.: On sample rate conversion based on variable fractional delay filters. International Journal of Computer Science and Applications, 10 (1), 2013, s. 98-116.
- [12] Blok M.: Extracted window offsetting using maximally flat fractional delay filter. Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 53(7), 2013, s. 59-63.
- [13] Blok M.: Comments on “Closed Form Variable Fractional Time Delay Using FFT”. IEEE Signal Processing Letters, 20 (8), 2013, s.747-750.
- [14] Blok M.: Filtr ułamkowoopóźniający o przestrajanej szerokości pasma realizowany w dziedzinie DFT. Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 8-9, 2013, s. 1141-1150.
- [15] Blok M., Drózda P.: Variable ratio sample rate conversion based on fractional delay filter. Archives of Acoustics, 39 (2), 2014, s. 231-242.
- [16] Blok M., Sac M.: Variable fractional delay filter design using a symmetric window. Circuits, Systems, and Signal Processing, 33, 2014, s. 3223-3250.

- [17] Blok M.: Zmiana szybkości próbkowania z użyciem filtru ułamkowoopóźniającego o zmiennej szerokości pasma. Przegląd telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 7, 2016, s. 662-667.
- [18] Cain G.D., Yardim A., Henry P.: Offset windowing for FIR fractional-sample delay. Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing ICASSP'95, IEEE, 1995, s. 1276-1279.
- [19] Cho K.J., Park J.S., Kim B.K., Chung J.G., Parhi K.K.: Design of a sample-rate converter from CD to DAT using fractional delay allpass filter. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 54, 2007, s. 19-23.
- [20] Dempster A.G., Murphy N.P.: Lagrange interpolator filters and binomial windows. Signal Processing, 76, 1999, s. 81-91.
- [21] Evangelista G.: Design of digital systems for arbitrary sampling rate conversion. Signal Processing, 83, 2003, s. 377-387.
- [22] Farrow C.W.: A continuously variable digital delay element. Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS'88, IEEE, 1988, s. 2641-2645.
- [23] Harris F.J.: Performance and design of Farrow filter used for arbitrary resampling. Proceedings of 13th International Conference on Digital Signal Processing DSP'97, IEEE, 2, 1997, s. 595-599.
- [24] Hermanowicz E.: A nearly optimal variable fractional delay filter with extracted Chebyshev window. Proceedings of IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems ICECS'98, 2, 1998, s. 401-404.
- [25] Kootsookos P.J., Williamson R.C.: FIR approximation of fractional sample delay systems. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 43, 1996, s. 269-271.
- [26] Laakso T.I., Saramäki T., Cain G.D.: Asymmetric Dolph-Chebyshev, Saramäki, and transitional windows for fractional delay FIR filter design. Proceedings of the 38th Midwest Symposium on Circuits and Systems MWSCAS'95, s. 580-583.
- [27] Laakso T.I., Välimäki V., Karjalainen M., Laine U.K.: Splitting the unit delay – Tools for fractional delay filter design. IEEE Signal Processing Magazine, 13, 1996, s. 30-60.
- [28] Marques J.S., Trancoso I.M., Tribolet J.M., Almeida L.B.: Improved pitch prediction with fractional delays in CELP coding. Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing ICASSP'90, IEEE, 1990, s. 665-668.
- [29] Olsson M., Johansson H., Löwenborg P.: Time-delay estimation using Farrow-based fractional-delay FIR filters: Approximation versus estimation errors. Proceedings of 14th European Signal Processing Conference EUSIPCO'06, EURASIP, 2006.
- [30] Pakarinen J., Välimäki V., Fontana F., Lazzarini V., Abel J.S.: Recent advances in real-time musical effects, synthesis, and virtual analog models. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2011, article ID 940784.
- [31] Pei S.C., Lai, Y.: Closed form variable fractional time delay using FFT. IEEE Signal Processing Letters, 19, 2012, s. 299-302.
- [32] Sac M., Blok M.: A nearly optimal fractional delay filter design using an asymmetric window. International Journal of Electronics and Telecommunications, 57, 2011, s. 465-472.
- [33] Selva J.: An efficient structure for the design of variable fractional delay filters based on the windowing method. IEEE Transactions on Signal Processing, 56, 2008, s. 3770-3775.
- [34] Selva J.: Convolution-based trigonometric interpolation of band-limited signals. IEEE Transactions on Signal Processing, 56, 2008, s. 5465-5477.

- [35] Tolonen T., Välimäki V., Karjalainen M.: Modeling of tension modulation nonlinearity in plucked strings. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 8, 2000, s. 300-310.
- [36] Tseng C.C.: Design of variable fractional delay FIR filter using differentiator bank. Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS'2002, IEEE, 4, 2002, s. 421-425.
- [37] Wenzhen L., Tomisawa M.: Transposed-Farrow-structure-based multirate filters for symbol timing synchronization in software defined radio (SDR). Proceedings of IEEE 60th Vehicular Technology Conference VTC2004-Fall, IEEE, 3, 2004, s. 1668-1672.
- [38] Välimäki V., Laakso T.: Principles of fractional delay filters. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing ICASSP'2000, 6, 2000, s. 3870-3873.
- [39] Yardim A., Cain G.D., Henry P.: Optimal two-term offset windowing for fractional delay. Electronics Letters, 32(6), 1996, s. 526-527.
- [40] Zieliński T.P., Korohoda P., Rumian R.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w telekomunikacji. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2014, ISBN: 978-83-01-17445-3.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

Szczegółowy wykaz osiągnięć z okresu po doktoracie zawiera się w załączniku „Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki”.

Moje zainteresowania naukowe skupiają się wokół cyfrowego przetwarzania sygnałów, w szczególności przetwarzania wieloszybkościowego, co ma odzwierciedlenie w umieszczonych w wykazie osiągnięciach. Główny nurt moich prac naukowych jest związany z projektowaniem filtrów ułamkowoopóźniających, głównie metodą okien. W okresie po doktoracie w wyniku tych prac powstało 19 artykułów w czasopismach oraz referatów prezentowanych na konferencjach międzynarodowych i krajowych. Z zainteresowaniami tymi łączą się prace naukowe poświęcone algorytmom zmiany szybkości próbkowania, w szczególności rozwiązaniom wykorzystującym w przepróbkowaniu filtry ułamkowoopóźniające. Zainteresowania te zaowocowały 9 artykułami publikowanymi w czasopismach i referatami prezentowanymi na konferencjach międzynarodowych i krajowych.

Poza pracami poświęconymi metodom projektowania cyfrowych filtrów ułamkowoopóźniających oraz ich telekomunikacyjnym zastosowaniom zajmuję się różnymi zagadnieniami w zakresie cyfrowego przetwarzania oraz oprogramowania C++ w zastosowaniach telekomunikacyjnych. Wyniki tych prac obejmują 19 artykułów w czasopismach oraz referatów prezentowanych na konferencjach międzynarodowych i krajowych. W ramach tych prac można wyróżnić takie zagadnienia jak: oprogramowanie systemu zarządzania przepływem informacji w rozproszonym systemie wymiany danych Straży Granicznej, cyfrowa modulacja i demodulacja, algorytmy synchronizacji symbolowej, pozyskiwanie symboli za pomocą przestrajanych filtrów ułamkowoopóźniających, symulacja transmisji w radiowej sieci ad-hoc, kodowanie sygnałów mowy, estymacja widma gęstości mocy, estymacja pulsacji chwilowej, estymacja częstotliwości krótkich sygnałów sinusoidalnych, estymacja częstotliwości tonu krtaniowego oraz projektowanie cyfrowych filtrów typu FIR.

Spośród 47 publikacji w czasopismach i materiałach konferencyjnych wchodzących w skład wymienionego dorobku naukowego, 28 to publikacje, których jestem samodzielnym autorem. Sumaryczny Impact Factor moich prac wynosi 3,737. W bazie Web of Science znajduje się 11 moich prac (10 po doktoracie) a liczba cytowań moich prac po doktoracie według tej bazy wynosi 10 (6 bez autocytowań), a indeks Hirscha wynosi 2. W bazie Scopus znajduje się 17 moich prac (16 po doktoracie) cytowanych 34 razy (15 bez autocytowań) w tym 30 (13 bez autocytowań) cytowania dla prac po doktoracie, a indeks Hirscha wynosi 3. W bazie IEEE Xplore znajduje się 8 prac (7 prac po doktoracie) cytowanych 9 razy (8 razy dla prac po doktoracie). Według bazy Google Scholar całkowita liczba cytowań moich prac wynosi 120 (76 od 2012 roku) a indeks Hirscha 7 (6 od 2012 roku).

W okresie po doktoracie byłem przewodniczącym/współprzewodniczącym sesji na trzech konferencjach (SPS 2011, ICT YOUNG 2013 i ASMOR 2015) oraz recenzowałem artykuły dla międzynarodowych i krajowych czasopism. Ogółem zrecenzowałem 43 artykuły dla następujących czasopism:

- Elsevier, Engineering Science and Technology, an International Journal,
- Elsevier, Digital Signal Processing,
- Elsevier, Journal of The Franklin Institute,
- Elsevier, Optik - International Journal for Light and Electron Optics,
- Elsevier, Signal Processing,
- IEEE, Signal Processing Letters,
- IEEE, Transactions on Control Systems Technology,
- IEEE, Transactions on Signal Processing,
- Springer, Circuits, Systems & Signal Processing,
- Taylor & Francis, IETE Technical Review,
- Taylor & Francis, International Journal of Electronics,
- Wydawnictwo AMG, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni.

Zrealizowałem również projekt badawczy habilitacyjny pt. „Filtry cyfrowe ułamkowoopóźniające – projektowanie metodą okien”, finansowany przez NCN, w wyniku którego powstała monografia wskazana w p. 4 jako osiągnięcie naukowe. Poza tym brałem udział w dwóch grantach badawczo-rozwojowych jako wykonawca oraz obecnie jestem głównym wykonawcą w dwóch kolejnych grantach badawczo-rozwojowych. W grantie „Strumieniowa transmisja danych czasu rzeczywistego w rozproszonych systemach dyspozytorskich i teleinformatycznych Straży Granicznej” pełnię funkcję przewodniczącego komitetu sterującego konsorcjum.

Wśród prac związanych z praktycznym zastosowaniem mojej wiedzy i umiejętności można wyróżnić oprogramowanie MapSerwer służące do zbierania, udostępniania i zarządzania przepływem informacji w rozproszonym systemie wymiany danych Straży Granicznej. Powstało ono przy moim udziale w ramach realizacji grantów badawczo-rozwojowych. Obecnie oprogramowanie to jest rozbudowywane na potrzeby rozszerzenia systemu wymiany danych o możliwość udostępniania i archiwizowania danych multimedialnych takich jak obraz z kamer wideo, rozmowy telefoniczne czy

zdjęcia i SMSy. Godna uwagi jest również biblioteka C++ DSPElib służąca do prostej implementacji i szybkiego prototypowania wieloszybkowościowych algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów zawierających sprzężenia zwrotne. Biblioteka ta została w całości opracowana i zaimplementowana przeze mnie. Jest ona wykorzystana w moich pracach badawczych oraz w ramach dydaktycznych zajęć projektowych i laboratoryjnych oraz przy wytwarzaniu aplikacji służących jako pomoce dydaktyczne.

Moje prace badawcze dotyczące filtrów ułamkowoopóźniających doprowadziły również do opracowania układu do przestrajania pasma filtra ułamkowoopóźniającego, który został zgłoszony do ochrony patentowej w ramach zgłoszenia patentowego nr P. 420811 p.t. Układ do przestrajania pasma filtra ułamkowoopóźniającego realizowanego w dziedzinie dyskretnej transformaty Fouriera.

March Piotr