

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama MATUSIAKA
na temat

„ESTYMACJA CZĘSTOTLIWOŚCI METODAMI INTERPOLACJI WIDMA DLA OKIEN CZASOWYCH GMSD”

1. Ogólna charakterystyka i cel rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest poświęcona zagadnieniom estymacji częstotliwości, a w szczególności analizie estymatorów opartych na interpolacji prążków dyskretnej transformaty Fouriera DFT (*Discrete Fourier Transform*) realizowanej z zastosowaniem uogólnionej postaci okien maksymalnego opadania listków bocznych GMSD (*Generalized Maximum Sidelobe Decay Windows*).

Stosunkowo duża i wciąż rosnąca popularność aplikacyjna metod estymowania parametrów sygnałów okresowych powoduje między innymi naturalny wzrost stawianych im wymagań, takich jak wysoka dokładność określenia parametru, niska złożoność obliczeniowa algorytmu estymacji, czy możliwie krótki czas realizacji metody. Ponadto, wymagania te w sposób istotny zależą od obszaru zastosowań. Jednym z zasadniczych estymowanych parametrów sygnałów okresowych jest częstotliwość. Wśród rozlicznych metod jej określania istotną grupę stanowią metody oparte na analizie widmowej. Są one rozwijane od szeregu lat. Jednakże, wymienione wyżej przesłanki powodują, że poszukiwane są wciąż nowe metody tego typu, a znane rozwiązania są regularnie ulepszone. W ten kontekst bardzo dobrze wpisuje się przedstawiona do recenzji praca doktorska, której Autor możliwość poprawy dokładności określenia częstotliwości elementów widma dostrzegł w umiejętnym zastosowaniu wielopunktowej interpolowanej dyskretnej transformaty Fouriera określanej z użyciem uogólnionej postaci okien czasowych GMSD.

Zatem zarówno z uwagi na względnie duże bieżące zainteresowanie zagadnieniami precyzyjnego i szybkiego określania wartości częstotliwości, jak i wybrane metody estymacji, temat rozprawy jest aktualny, a zważywszy na rozległość związanych z nim zagadnień, wydaje się też stosunkowo trudny.

Recenzowana rozprawa liczy 140 stron i jest podzielona na 6 rozdziałów, uzupełnionych o wykaz publikacji Autora i obszerną bibliografię.

W rozdziale wprowadzającym Autor w sposób przekonujący uzasadnia potrzebę opracowania nowej klasy estymatorów częstotliwości opartych na formułach interpolacji widma z użyciem uogólnionej postaci okien GMSD oraz anonsuje przyjęte założenia dotyczące eliminacji obciążenia estymatorów. Następnie formułuje cel i tezę rozprawy. Jej głównym celem jest zbadanie możliwości zastosowania okien GMSD do opracowania nowych metod interpolacji widma. Natomiast dalszym celem rozprawy jest kompleksowa analityczna i eksperymentalna weryfikacja proponowanych metod interpolacyjnych.

W następnym rozdziale pracy Autor przeprowadza ogólny przegląd wykorzystywanych obecnie metod estymacji częstotliwości oraz dokonuje ich zgrubnej klasyfikacji, stosując kryteria dotyczące domeny estymacji (czasowe, częstotliwościowe, mieszane), użytego modelowania (deterministyczne, stochastyczne) i parametryzacji metod.

W kolejnym, trzecim rozdziale Autor zajmuje się zagadnieniami podstawowymi dla podjętej tematyki, w szczególności zaś analizuje stosowane metody interpolacji widma koncentrując się na metodach z bezpośrednią formułą interpolacyjną, co jest zasadne w kontekście założeń dotyczących proponowanych metod opartych na jednokrokowych formułach algebraicznych.

Zasadnicze wyniki własnej pracy analityczno-badawczej Autora prezentowane są w dwóch kolejnych rozdziałach dysertacji. Rozdział czwarty zawiera efekty przeprowadzonej przez Autora szczegółowej i konsekwentnej analizy metod interpolacji widma, w wyniku której opracowana została autorska procedura uzyskiwania zależności algebraicznych estymatorów częstotliwości opartych na użyciu okien GMSD oraz sformułowane zostały, przedstawione z pełnymi wyprowadzeniami, zależności określające dwu-, trzy- i pięciopunktowe metody interpolacji widma.

W obszernym rozdziale piątym opisane są wyniki przeprowadzonej przez Autora wszechstronnej weryfikacji poprawności trzech zaproponowanych metod. Ocena ich skuteczności poparta jest wynikami badań symulacyjnych (dotyczy wszystkich zaproponowanych metod) i eksperymentalnych (tylko metoda pięciopunktowa), odniesionych częściowo również do wyników uzyskanych z użyciem wcześniej znanych metod bazujących na bezpośrednich formułach interpolacyjnych. Ewaluacja metod przeprowadzona została w oparciu o analizę ich błędów (miarą była wartość błędu średniokwadratowego) dla wybranych parametrów metod (określających np. postać okna czasowego lub krotność częstotliwości) i warunków estymacji (np. sygnał bez lub z zakłóceniami losowymi, różne wartości stosunku sygnał/szum).

Podsumowanie dysertacji, znajdujące się w rozdziale szóstym, w sposób usystematyzowany reasumuje przeprowadzone badania i dostarcza krytycznej oceny uzyskanych wyników testów osobno dla każdej z proponowanych metod. Rozdział ten

zawiera również wartościowe wnioski dotyczące dostrzeżonych ograniczeń badanych metod, a także sugestie co do warunków najbardziej efektywnego ich użycia. Jednocześnie potwierdzona zostaje pozytywna weryfikacja postawionej na wstępie hipotezy o możliwości określenia z użyciem okien czasowych GMSD nowych formuł interpolacji widma, zapewniających poprawę jakości estymacji częstotliwości.

2. Charakter rozprawy

Pod względem objętościowym w pracy dominują fragmenty dotyczące różnych aspektów analiz metod estymacji częstotliwości i interpolacji widma, uzupełnione o merytorycznie powiązane wprowadzenie teoretyczne oraz wyniki modelowania numerycznego i badań symulacyjnych. Rozdziały wstępne poświęcone tym zagadnieniom, dotyczące w szczególności systematycznej i wieloaspektowej analizy metod stosowanych dotychczas, zajmują około połowy pracy (60 str.). Opis autorskich propozycji w tym zakresie (18 str.), a mianowicie (1) dokładna specyfikacja nowych metod interpolacji widma wraz z (2) autorską procedurą uzyskiwania algebraicznych wyrażeń na estymatory częstotliwości bazujące na uogólnionych oknach MSD, uzupełniony jest o obszerną (43 str.) analizę dokładności proponowanych rozwiązań, popartą wynikami badań symulacyjnych i eksperymentalnych, co w sumie absorbuje mniej więcej drugą połowę pracy. Zatem rozprawę kwalifikuję jako analityczno-eksperymentalną.

3. Źródła literaturowe i sposób ich analizy

Wykaz literatury podany przez Autora, jest obszerny i obejmuje 186 pozycji, głównie w języku angielskim, w tym 4 pozycje, których współautorem jest p. Adam Matusiak. Wykaz zawiera zdecydowaną większość ważnych, fundamentalnych publikacji dotyczących tematyki poruszanej w rozprawie. Należy też zauważyć, że w wykazie dominują publikacje bardzo aktualne, bo z ostatniej dekady, co zapewnia właściwe podstawy do wykonanej przez Autora analiza stanu wiedzy. Analiza ta jest zakrojona szeroko i przeprowadzona konsekwentnie. Poświęcono jej aż dwa rozdziały pracy, obejmujące wpieryw 12-stronicowy przegląd znanych metod estymacji częstotliwości i obszarów ich zastosowań (rozdział 2), a następnie obszerną, bo 37-stronicową, wszechstronną analizę metod interpolacji widma (rozdział 3), będących zasadniczym obiektem badań i modyfikacji Doktoranta. Należy zatem stwierdzić, że przedstawiony w rozprawie przegląd dotychczasowych rozwiązań w zakresie jej tematyki jest bez wątpienia bardzo dogłębny i adekwatny, a konsekwentny sposób ich analizy świadczy o dużym rozeznaniu Autora zarówno w ujęciu merytorycznym problemu, jak i samej literaturze przedmiotu.

4. Rozwiązanie postawionego zadania

Ogólne podejście do rozwiązania postawionego zadania jest prawidłowe. Autor bada najpierw przesłanki teoretyczne i formułuje wnioski będące podstawą założeń badawczych. Następnie w sposób przemyślany i analitycznie uzasadniony proponuje trzy metody estymacji widma i oparte na nich algorytmy estymacji częstotliwości, zapewniające znaczną poprawę dokładności estymacji, po czym specyfikuje kryteria oceny jakości nowych metod oraz weryfikuje poprawność i efektywność uzyskanych formuł interpolacyjnych w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych. Ewaluacja jakości proponowanych metod, z uwagi na ich algebraiczny charakter, opiera się głównie na analizie błędów popartej, w przypadku pięciopunktowej metody estymacji, wynikami badań laboratoryjnych. Badania te zrealizowane zostały z wykorzystaniem adekwatnej platformy technologicznej (mikrokontroler STM32L7 z rdzeniem Cortex_M7, 24-bitowe przetworniki DAC i ADC) i języka programowania (język C). Sposób rozwiązania prezentowany w rozprawie jest więc koncepcyjnie kompletny i obejmuje główne etapy procesu analityczno-empirycznego od założeń, przez opracowanie formuł interpolacyjnych, aż po weryfikację prawidłowości ich działania i uzyskanych parametrów. Wyniki badań opracowanych metod potwierdzają z kolei poprawność merytoryczną zaproponowanych rozwiązań.

5. Oryginalność rozprawy

Zdefiniowany przez autora cel pracy, dotyczący opracowania z zastosowaniem okien czasowych GMSD nowych metod interpolacji widma, (1) opartych na estymacji nieiteracyjnej i zapewniających ograniczenie wpływu na dokładność estymacji obecności zarówno (2) wielu składowych widmowych znacznie odległych od wykorzystywanych elementów widma, jak i (3) składowej sprzężonej oraz (4) składowych harmonicznym niskiego rzędu, także (5) dla krótkich czasów pomiaru, to zamierzenie ambitne i rozległe tematycznie. Jego realizacja wymagała dużej wiedzy teoretycznej, umiejętności w zakresie operowania aparatem matematycznym oraz sporej sprawności programistycznej. Sposoby i efekty pomyślnej realizacji zadań prowadzących do osiągnięcia założonego celu są opisane w rozprawie, która zawiera co najmniej kilka elementów będących istotnymi oryginalnymi osiągnięciami Autora. Do najważniejszych należą:

A. Wykonany w rozdziale 3 krytyczny przegląd dotychczasowych metod interpolacji widma (IpDFT) pod kątem szeregu zasadniczych cech dotyczących modelu sygnału, struktury algorytmu i postaci widma (tabela 3.1).

- Autor rozpatruje sześć istotnych cech dotyczących modelu sygnału (oznaczając je w tabeli 3.1 od #1 do #6), które uwzględnienia w przyjętym

modelu matematycznym. Oprócz składowej podstawowej w widmie bierze również pod uwagę składowe oddziałujące na składową podstawową poprzez przeciek widma. Do takich składowych, w przypadku krótkich czasów pomiaru, należą uwzględniane bezpośrednio w formule interpolacyjnej: składowa sprzężona (#2), składowa stała (#3) i składowe harmoniczne, najczęściej niskiego rzędu (#4). Ponadto w części dotyczącej modelu sygnału Autor bada, czy i w jaki sposób uwzględniany jest w przyjętym modelu matematycznym wpływ przecieku widma na składową podstawową, pochodzący od pozostałych składowych zawartych w sygnale, najczęściej harmonicznych wyższego rzędu (tzw. przeciek typu *long-range*). Rozróżnia tutaj uwzględnienie tego wpływu w sposób nieiteracyjny (#5) i iteracyjny lub kilkuetapowy (#6).

- Ponadto Autor analizuje istniejące metody IpDFT pod kątem struktury algorytmu, tj.: liczby wykorzystanych wartości do estymacji szukanych parametrów (#7) oraz weryfikując czy algorytm jest iteracyjny (#8) lub wieloetapowy (#9).
- Autor analizuje również, w odniesieniu do dotychczasowych metod, w jaki sposób uzyskuje się widmo użyte następnie do estymacji szukanych parametrów i jakie zastosowane zostało okno czasowe (cechy #10, #11 i #12 w tabeli 3.1).

Autorski wybór powyższych dwunastu właściwości w analizie zalet i wad dotychczasowych metod IpDFT jest podstawą porównania tych metod w całym rozdziale 3 i ostatecznego podsumowania ich w tabeli 3.3. W podsumowaniu tym Autor wskazuje, że większość metod IpDFT, choć nie wszystkie, dotyczą okien o maksymalnym opadaniu listków bocznych (w amplitudowej charakterystyce częstotliwościowej okna czasowego), znanych w literaturze jako MSD (*Maximum Sidelobe Decay windows*), stanowiących rodzinę okien, do której należą również najbardziej znane, a mianowicie okno prostokątne i okno Hanna (Hanninga). Uogólnieniem dla tych okien są okna czasowe postaci \sin^p (str. 31, zależność (3.20)), które nazwane zostały oknami o postaci uogólnionej GMSD, gdyż okna MSD są istotnie szczególnym przypadkiem okien GMSD, dla parzystych wartości parametru p . Termin GMSD dla tych okien wprowadzony został w roku 2021 w pracy [37], w której wykazano, że dla wszystkich wartości parametru p (parzystych i nieparzystych) uzyskuje się maksymalne opadanie listków bocznych w amplitudowej charakterystyce częstotliwościowej. Warto podkreślić, że Autor rozprawy jest również współautorem tej pracy ([37]).

W Tabeli 3.2, podsumowującej właściwości najważniejszych z dotychczas opublikowanych metod IpDFT, wymieniona jest również inna praca Autora niniejszej rozprawy, a mianowicie artykuł [123] z roku 2022, w którym opublikowano wybrane

wyniki uzyskane w ramach rozprawy i dotyczące metody pięciopunktowej z wykorzystaniem okien GMSD. Z porównania tego wyniku, że **autorska metoda mgr. inż. Adama Matusiaka jest pierwszą metodą nieiteracyjną, która uwzględnia bliską harmoniczną w modelu matematycznym będącym podstawą do uzyskania równań estymatora częstotliwości** (cecha modelu #4 w Tabeli 3.2).

Wykonana przez Autora analiza dotychczasowych metod IpDFT pod kątem wybranych przez niego cech, spowodowała, że stawia On następującą tezę pracy (str. 11): *Interpolacja widma DFT z wykorzystaniem okien czasowych GMSD pozwala na uzyskanie nowych nieiteracyjnych metod estymacji częstotliwości charakteryzujących się krótkim czasem wykonania wraz ze znaczącym zwiększeniem dokładności estymacji (o rząd wielkości lub więcej) dla krótkiego czasu pomiaru i w obecności zakłóceń harmonicznym względem dotychczasowych nieiteracyjnych metod interpolacji widma.*

Tak postawiona teza, wprost zakładająca uzyskanie metod nieiteracyjnych, oraz wyniki uzyskane w kolejnych rozdziałach pracy pokazują, że Autor rozprawy wybrał rozwiązanie postawionego problemu w sposób wyraźnie trudny, bo poprzez jednoczesną implementację dwóch warunków, a mianowicie:

- uwzględnienie w modelu matematycznym wpływu bliskich składowych zakłócających (cechy #2 i #4 w tabelach 3.1 i 3.2) oraz przecieku typu *long-range* poprzez odpowiednią aproksymację (cecha #5) – to założenie istotnie komplikuje model matematyczny, ale jest warunkiem uzyskania znacznej poprawy dokładności w stosunku do metod dotychczasowych,
- uzyskanie algorytmu nieiteracyjnego, co jest tym trudniejsze, im bardziej jest złożony model matematyczny, ale jest to warunek uzyskania estymatora szybkiego w realizacji (w znaczeniu liczby wymaganych obliczeń) i nie posiadającego innych wad metod iteracyjnych (jak np. możliwych problemów z brakiem zbieżności algorytmu lub koniecznością wstępnej estymacji dla pierwszej iteracji).

Czyniąc powyższe założenia, Autor dąży do uzyskania estymatora o najlepszych właściwościach w zakresie zarówno uzyskiwanej dokładności, jak i wymagań sprzętowych.

B. Przeprowadzone w rozdziale 4 modelowanie matematyczne dla przyjętych założeń, obejmujących m.in. uwzględnienie w modelu bliskich harmonicznym i nieiteracyjność rozwiązania, prowadzi do uzyskania głównego wyniku pracy, czyli 5-punktowej metody IpDFT. Ponadto w efekcie modelowania matematycznego Autor uzyskał szereg innych oryginalnych wyników opisanych w rozdziale 4, a których podsumowanie zawarto na str. 123 rozprawy:

- „opracowanie założeń sposobu wyprowadzenia metod wykorzystujących aproksymację charakterystyki częstotliwościowej okna czasowego GMSD (równanie (4.2)),
- opracowanie metody dwupunktowej 2pGMSD wykorzystującej formuły interpolacyjne (4.14) oraz (4.15),
- pełne analityczne wyprowadzenie metody trzypunktowej 3pGMSD (w odróżnieniu do wyprowadzenia z pracy [37], w której zastosowano metodę heurystyczną przy wyprowadzeniu, rozdział 4.4),
- wersja uogólniona estymatora trzypunktowego 3pGMSD, która pozwala na uwzględnienie wpływu dwóch dowolnych oscylacji zespolonych o wybranych krotnościach częstotliwości podstawowej λ_0 (równanie 4.37), w kontraście do dostępnego w literaturze równania (4.42) [37],
- pełne analityczne wyprowadzenie metody pięciopunktowej 5pGMSD (rozdział 4.5).”

Ostatni z powyższych wyników, dotyczący kompletnego opisu metody pięciopunktowej, jako najbardziej zaawansowany i najtrudniejszy element pracy, można uznać za główny wynik rozprawy.

C. Przeprowadzone w rozdziale 5 badania dokładności uzyskanych autorskich metod IpDFT, wykonane zarówno jako badania symulacyjne (rozdziały 5.3 - 5.5), jak i eksperymentalne (rozdział 5.6), a podsumowane szczegółowo na stronach 124 - 126 rozprawy.

Dla każdej z uzyskanych metod, tj. 2pGMSD, 3pGMSD, a przede wszystkim 5pGMSD, zweryfikowano możliwość eliminacji obciążenia dla przyjętych założeń. W odniesieniu do najważniejszego wyniku rozprawy, czyli metody pięciopunktowej 5pGMSD, uzyskano następujące zasadnicze efekty (str. 125 - 126):

- eliminację wpływu składowej sprzężonej oraz pojedynczej bliskiej harmonicznej do wartości pomijalnie małych przy założeniu braku innych składowych zakłócających (innych harmonicznych i szumu),
- liczną rodzinę charakterystyk dokładności metody, uzyskiwanych w zależności od przyjętych parametrów metody (takich jak parametr p okna czasowego oraz liczba próbek N sygnału) i warunków pomiarów (wartość SNR).

W oparciu o wyniki przeprowadzonych eksperymentów Autor może pokusić się między innymi o zawarte w podsumowaniu (str. 126) zasadne stwierdzenie, że:

„W przypadku sygnału zakłóconego wieloma harmonicznymi, druga składowa harmoniczna wywiera największy wpływ na dokładność estymacji. Dlatego zastosowanie estymatora pięciopunktowego 5pGMSD z eliminacją wpływu drugiej harmonicznej

pozwała na zredukowanie błędu nawet do dwóch rzędów wielkości dla rozważanego w badaniach sygnału (rysunek 5.34)”.

Wyniki eksperymentu pomiarowego (opisanego w rozdziale 5.6, w szczególności rys. 5.35) pozwoliły Autorowi także na stwierdzenie (początek strony 121), że: „... zastosowanie metody 5pGMSD pozwala na **zwiększenie dokładności pomiaru ok. 10 razy** w przypadku obecności drugiej harmonicznej w sygnale.”

Zatem poprzez badania symulacyjne i eksperymentalne Autor wykazał poprawność przeprowadzonego modelowania matematycznego i uzyskanych formuł estymatorów oraz prawdziwość postawionej tezy rozprawy.

Sukces w postaci uzyskania nowych metod interpolacji widma Autor osiągnął, moim zdaniem, poprzez:

- dojrzałą pracę naukową w zakresie krytycznej analizy metod dotychczasowych, autorskiego ich porównania pod kątem wybranych przez siebie cech oraz zdiagnozowanych potrzeb zastosowania we współczesnych systemach pomiarowych (rozd. 2.3),
- dużą sprawność posługiwania się aparatem matematycznym, w przeprowadzonym modelowaniu matematycznym,
- biegłość w realizacji komputerowych badań symulacyjnych i interpretacji wyników,
- umiejętności zorganizowania systemu cyfrowego przetwarzania sygnału, programowej implementacji algorytmów i analizy wyników uzyskanych w eksperymencie praktycznym.

Warto też podkreślić, że ze względu na brak istotnych założeń ograniczających uzyskane wyniki cechuje duży poziom ogólności, co zapewnia im potencjalną gotowość aplikacyjną w odniesieniu do wielu zastosowań.

6. Poprawność przedstawienia uzyskanych wyników

Oceniając strukturę przedłożonej rozprawy, należy stwierdzić, że jest ona klarowna i generalnie poprawna. Zawarte w dwóch początkowych rozdziałach pracy obszernie przeglądy metod estymacji częstotliwości, a zwłaszcza metod interpolacji widma, mogą jedynie z pozoru wydawać się zbyt rozległe. Analiza metod interpolacji widma jest bowiem poprzedzona uzasadnionym merytorycznie wprowadzeniem, a następnie przeprowadzona bardzo konsekwentnie, według jasnych kryteriów klasyfikacji. Jej wartościowym zwieńczeniem jest, zawarta w rozdziale 3.8, zwięzła analiza porównawcza metod interpolacyjnych. Na szczególną uwagę w tym kontekście zasługują przywołane już w recenzji tabele od 3.1 do 3.3, w których w bardzo przejrzysty sposób, stosując 12 kryteriów dotyczących wykorzystywanych modeli sygnałów, struktur algorytmów

i postaci widma, zestawiono własności znanych metod. Analiza ta, obejmująca metody opisane w 31 artykułach, stanowi cenną bazę porównawczą dla zaproponowanych przez Autora metod, których cechy, zweryfikowane według tych samych kryteriów, zestawione zostały w tym samym rozdziale, w tabeli 3.4.

Praca jest bardzo starannie przygotowana zarówno pod względem edytorskim, jak i językowym. Czyta się ją bardzo dobrze, a Autor nie zmusza czytelnika do kilkukrotnego analizowania tych samych fragmentów pracy w celu jej zrozumienia. Ponadto, Autor unika używania pojęć żargonowych lub stosowanych w wąskich kręgach specjalistów.

7. Krytyczna ocena zawartości merytorycznej rozprawy

Zgodnie ze sformułowaną wcześniej opinią, ogólna koncepcja pracy i sposób rozwiązania postawionego zadania są poprawne, a uzyskane wyniki oceniane bardzo wysoko. Szczegółowa lektura rozprawy ujawnia jednak pewne braki i elementy dyskusyjne.

A. Uwagi o charakterze dyskusyjnym

- Bardzo istotnym i wartościowym elementem pracy, obszernie w niej komentowanym, są liczne wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych zaproponowanych metod. W ich efekcie najważniejsze cechy metod zostały dobrze zidentyfikowane. Autor pokusił się nawet o ocenę złożoności obliczeniowej implementacji programowej formuł metody trzypunktowej i najbardziej złożonej metody pięciopunktowej, wykonaną poprzez pomiar liczby cykli procesora potrzebnych do realizacji formuł na wybranej platformie sprzętowej. W wyniku pomiarów Autor wykazał, że „*metoda pięciopunktowa jest wyraźnie wolniejsza od metody trzypunktowej*”. W kontekście właściwości dynamicznych opracowanych algorytmów interesującą wydaje się odpowiedź na pytanie jak szybko reagują algorytmy estymacji zaprezentowane w rozprawie na zmianę parametrów sygnału, w szczególności na zmianę wartości częstotliwości?
- W pracy zakłada się, że wartości prążków widma wykorzystane w procesie interpolacji są obliczane za pomocą algorytmu FFT. Czy możliwym i zasadnym jest wykorzystanie w tym celu innych algorytmów niż algorytm FFT?

B. Uwagi krytyczne mniejszej wagi

Jak już zauważono praca została bardzo starannie przygotowana zarówno pod względem językowym jak i edytorskim. Jednakże, mimo niewątpliwie dużego zaangażowania Autora w jej opracowanie, dostrzeżono kilka drobnych usterek.

- Proces weryfikacji poprawności i jakości zaproponowanych metod opiera się głównie na badaniach symulacyjnych, których wyniki prezentowane są w postaci licznych charakterystyk. Pewien niedosyt w zakresie opisu tych badań pozostawia brak informacji na temat użytych narzędzi programistycznych. Podstawowa choćby

informacja na ten temat podniosłaby wartość prezentowanych wyników i zapewniła możliwość ewentualnego porównywania z rezultatami innych opracowań.

- Drobną niedogodnością, utrudniającą jednakże czytanie tekstu i śledzenie myśli Autora, jest zawężenie *Wykazu wybranych oznaczeń i terminów* jedynie do oznaczeń dotyczących sygnałów i formuł algebraicznych, a nieumieszczenie w *Wykazie* rozwinięć akronimów i skrótów stosowanych w rozprawie.
- Dostrzeżono bardzo nieliczne usterki formatowania tekstu (np. str. 81) i błędy typograficzne w postaci „bękartów” (np. str. 23, 82, 88).
- Dość liczne błędy typograficzne w postaci „sierot” (w całej pracy).
- Usterka językowa na str. 32, gdzie zamiast sformułowania „...skutkuje pogorszeniem...” użyto „...skutkuje w pogorszeniu...”.

Należy wyraźnie podkreślić, iż powyższe uwagi krytyczne i dyskusyjne, acz istotne, nie kwestionują wysokiej wartości merytorycznej opisanego przez doktoranta rozwiązania, a odnoszą się głównie do sposobu jego charakteryzacji.

8. Wnioski końcowe

Rozprawa mgr. inż. Adama Matusiaka wnosi nowe istotne elementy do ważnego i aktualnego problemu estymacji częstotliwości z użyciem metod interpolacji widma. W szczególności Autor proponuje kilka nowatorskich modyfikacji nieiteracyjnych metod estymacji częstotliwości, które charakteryzując się krótkim czasem wykonania pozwalają w znacznym stopniu, w szczególności nawet dziesięciokrotnie, zwiększyć dokładność estymacji dla krótkiego czasu pomiaru i w obecności zakłóceń harmoniczných. W efekcie wykonanego modelowania matematycznego Autor uzyskał i opisał w pracy także szereg oryginalnych wyników dotyczących sposobu wyprowadzenia metod wykorzystujących aproksymację charakterystyki częstotliwościowej okna czasowego, w tym pełne analityczne wyprowadzenia metod trzypunktowej i pięciopunktowej GMSD. Ponadto, wykonał szczegółowy i systematyczny przegląd dotychczasowych metod interpolacji widma (IpDFT) w aspekcie dość licznych zbioru najważniejszych cech dotyczących modelu sygnału, struktury algorytmu i postaci widma.

Przedstawione w rozprawie metody rozwiązania zadań badawczych, uzyskane wyniki oraz sposoby ich prezentacji powodują, że praca jest ciekawa i wartościowa naukowo. Autor wykazał przy tym dobre przygotowanie teoretyczne oraz umiejętności prowadzenia pracy projektowej i badawczej.

Uważam, że przedłożona rozprawa w pełni spełnia wymagania określone przez *Ustawę o stopniach i tytułach naukowych* i może stanowić podstawę nadania stopnia doktora nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*. Wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Ponadto, zważywszy na:

1. osiągnięte bardzo wartościowe rezultaty pracy, a zwłaszcza uzyskaną znaczną poprawę dokładności estymacji częstotliwości z użyciem zaproponowanych przez Autora metod interpolacji widma,
2. możliwość zastosowania wyników pracy w różnych aplikacjach dzięki wysokiemu poziomowi uogólnienia proponowanych formuł,
3. znaczną wartość poznawczą przeprowadzonej w sposób systematyczny i w szerokim zakresie analizy porównawczej metod interpolacji widma na potrzeby estymacji częstotliwości,
4. bardzo pozytywną weryfikację wyników pracy i potwierdzenie jej wysokiej jakości przez środowisko międzynarodowe dużą liczbą cytowań dwóch publikacji współautorstwa Doktoranta, w których przedstawione zostały wybrane wyniki jego badań (wg. WoS - 19 obcych cytowań dwóch prac opublikowanych w latach 2021 i 2022 w renomowanych czasopismach: *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IF=10.215, 200 pkt. MNiSW i *Mesurement*, IF=5.131, 200 pkt. MNiSW),

wnoszę o wyróżnienie recenzowanej rozprawy.



