

Katedra Sieci Teleinformacyjnych

Gdańsk, 19.10.2023

dr hab. inż. Adrian Bekasiewicz, prof. PG
Katedra Sieci Teleinformacyjnych
Wydział Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska
Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

prof. dr hab. inż. Andrzej Dzedzic
Przewodniczący Rady Dyscypliny Naukowej (RDN)
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i
Technologie Kosmiczne (AEEiTK)
Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Matusiaka pt. *Estymacja częstotliwości metodami interpolacji widma dla okien czasowych GMSD*

Niniejszy dokument stanowi recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Matusiaka (dziedzina nauk inżyniersko-technicznych, dyscyplina: automatyka, elektronika i elektrotechnika i technologie kosmiczne) pod tytułem *Estymacja częstotliwości metodami interpolacji widma dla okien czasowych GMSD*. Praca została zrealizowana pod opieką prof. dr. hab. inż. Józefa Borkowskiego. Umocowaniem prawnym dokumentu jest uchwała RDN AEEiTK nr 732/31/RDND02/2021-2024 z 25.09.2023, a także zawiadomienie nr 27/09/D02/2023 o wyznaczeniu na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora z 29.09.2023. Rozprawa została oceniona zgodnie z zapisami Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2023 r. poz. 724).

1. Ocena układu rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa została przygotowana w języku polskim w formie monografii o objętości 140 stron. Praca zawiera krótkie streszczenia w języku polskim i angielskim, zwięzły wykaz oznaczeń i terminów, łącznie sześć rozdziałów, dodatek z listą publikacji autora, oraz spis bibliografii. Poniżej zawarto krótką dyskusję głównej części pracy.

Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie do tematyki dysertacji, gdzie Autor wskazuje na możliwość wykorzystania transformaty Fouriera w zagadnieniach badania zmienności sygnałów częstotliwościowych. Doktorant podkreśla znaczenie realizacji pomiarów w czasie rzeczywistym we współczesnych systemach oraz związaną z nimi konieczność stosowania metod obliczeniowych o nieznacznej złożoności (tj. tanich obliczeniowo). W pracy zwrócono uwagę, że zastosowanie transformacji Fouriera do przetwarzania zmierzonych sygnałów jest źródłem błędów numerycznych wynikających z przecieków widma, czy efektów zafalowania. Zidentyfikowany problem stanowi punkt wyjścia do dalszych rozważań na temat możliwości precyzyjnego szacowania częstotliwości na podstawie pomiarów przeprowadzonych w dziedzinie czasu. Kandydat podkreśla, że w pracy opisano oraz zastosowano estymatory implementujące okna GMSD (ang. *generalized maximum sidelobe decay*). We wprowadzeniu zawarto także tezę oraz dyskusję celów badań.

W rozdziale drugim Doktorant omówił ograniczenie Cramera-Rao (CR), które stanowi punkt odniesienia dla szacowania obciążenia estymatorów przedstawionych w pracy (w szczególności w trakcie testów numerycznych omówionych w dalszej części rozprawy – rozdział 5). Następnie, Autor przeprowadził dyskusję wybranych klas algorytmów do estymacji częstotliwości, a także wskazał możliwe obszary ich praktycznych zastosowań. Rozdział ma charakter opisowy z elementami dyskusji na temat aspektów teoretycznych i stanowi rozwinięcie tematyki podejmowanej w pracy.

Trzeci (bardzo obszerny – 36 stron) rozdział poświęcono na szczegółowe omówienie zagadnień poruszanych w pracy. Autor przedstawia omówienie modelu sygnału, zależności na dyskretną transformatę Fouriera, czy dyskusję możliwości zastosowania okien czasowych do ograniczenia efektu przecieku widma. Rozdział zawiera także sekcje poświęcone technikom: interpolacji widma (pięć omówionych rozwiązań), estymacji częstotliwości sygnału z jedną składową zespoloną, eliminacji komponentu sprzężonego, a także pozostałych składowych sygnału (tj., składowej stałej, harmonicznym, czy innych zakłóceń). Ostatnią, w mojej ocenie najważniejszą, częścią jest syntetyczne zestawienie omówionych metod interpolacji widma z uwzględnieniem ich cech charakterystycznych, tj., stosowanego modelu sygnału, czy struktury algorytmu (w szczególności Doktorant wskazał czy metoda jest analityczna, czy też iteracyjna), a także postaci widma. W mojej ocenie rozdział jest zbyt długi: Autor poświęcił znaczną objętość na przytoczenie zależności matematycznych z literatury oraz ich dokładną interpretację. Chociaż ostatnia jest bez wątpienia istotna z punktu widzenia wniosków zawartych w Sekcji 3.8, to dokładne analizowanie prac badawczych (wraz z opisem oraz dyskusją wzorów) nie ma większego znaczenia dla czytelnika, który może zasięgnąć informacji z przytoczonych referencji. Doktorant mógł zatem zawęzić dokładne analizy do zagadnień kluczowych z punktu widzenia swoich osiągnięć jednocześnie przedstawiając aktualny stan wiedzy na wyższym poziomie abstrakcji (tj., poprzez objaśnienia rozwiązań bez bezpośredniego wskazywania zależności matematycznych). Takie podejście nie tylko istotnie zwiększyłoby „przystępność” treści dla czytelnika, ale też uwypukliłoby istotne (z punktu widzenia proponowanych metod) koncepcje. Rozdział ma bez wątpienia charakter teoretyczny.

Rozdział czwarty stanowi rdzeń pracy, ponieważ Autor przedstawia w nim wyprowadzenia opracowanych metod estymacji częstotliwości, tj., formuł z dwoma (2p), trzema (3p) i pięcioma punktami (5p) dla okien GMSD. Warto zwrócić uwagę, że Doktorant „przeprowadza czytelnika przez pełny tok rozumowania” oraz obliczenia prowadzące do uzyskania analitycznych zależności dla stworzonych algorytmów. Z drugiej strony, opis wyprowadzeń przedstawiony w rozdziale jest zbyt szczegółowy. Doktorant mógł ograniczyć się do przedstawienia równań wyjściowych przed przekształceniami oraz wskazania ich końcowej formy (tj., po wykonaniu wszystkich operacji matematycznych). Podejście takie wydaje się uzasadnione ze względu na inżynierski charakter pracy. Zamiast tego zaprezentowano wszystkie kroki prowadzące do uzyskania rozwiązania końcowego. W tym kontekście, przedstawione przekształcenia można określić jako „szczegóły techniczne” nadające się do pominięcia. Jak wskazano powyżej, rezultatem obliczeń zaprezentowanych w rozdziale są zależności dla 2-, 3-, oraz 5-punktowych formuł interpolacyjnych.

W rozdziale piątym (również bardzo obszernym – 42 strony), Doktorant koncentruje się na testach numerycznych opracowanych algorytmów oraz ich porównaniu (tam gdzie jest to możliwe) z istniejącymi metodami. Badania są bardzo szczegółowe i odnoszą się, m.in., do analizy wpływu takich parametrów jak potęga sinusa oknie GMSD, liczba próbek, czy krotność częstotliwości unormowanej na błąd estymacji. Symulacje przeprowadzono dla różnych wartości stosunku sygnał/szum (SNR), czy wartości amplitud harmonicznym względem składowej podstawowej. Punktem odniesienia do przeprowadzonych analiz jest ograniczenie Cramera-Rao (omówione w rozdziale 2). Należy zwrócić uwagę, że chociaż zawarcie w pracy obszernej dyskusji wyników dla metody 2p jest zrozumiałe (w kontekście objaśniania ich znaczenia), to struktura testów dla podejścia 3p oraz 5p (podobnie jak wnioski) są w dużym zakresie takie same jak dla 2p. Mając to na względzie, Doktorant mógł istotnie skrócić ich opisy bez straty dla czytelnika. Można było oczekiwać, że w testach przeprowadzonych dla kolejnych wymienionych metod, doktorant skupi się na wskazaniu najważniejszych różnic, czy nieoczywistych wniosków, względem obszernego opisu dla metody 2p. Zamiast tego, w odniesieniu do 3p i 5p, praca zawiera stosunkowo syntetyczny opis badań, a także powtarzające się (w dużej mierze) konkluzje i obserwacje (bardziej szczegółową dyskusję problemu przedstawiono w punkcie 4 niniejszej recenzji). Na uwagę zasługuje porównanie metod 2p i 3p do rozwiązań z literatury. Rozdział podsumowuje (bardzo krótka w stosunku do części symulacyjnej) dyskusja wyników eksperymentalnych.

W rozdziale szóstym Autor podsumowuje rozprawę poprzez zbiorcze omówienie zrealizowanych prac, syntetyczne podkreślenie oryginalnych osiągnięć oraz wskazanie, że uzyskane wyniki potwierdzają

zasadność przyjętej tezy rozprawy. Niestety w dyskusji zabrakło rozważań nad potencjalnymi kierunkami dalszych badań.

Układ pracy należy uznać za poprawny. Poszczególne rozdziały i sekcje są jasno wyróżnione. Rysunki, zależności oraz tabele są ponumerowane w sposób, który umożliwia ich jednoznaczne przypisanie do odpowiednich akapitów. Ponadto rozmieszczenie tabel, oraz rysunków względem treści rozprawy jest właściwe.

2. Wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata do stopnia doktora

W pracy wskazano cztery cele odnoszące się do założeń przyjętych względem okien czasowych GMSD w problemach interpolacji widma. Ich treść jest następująca:

- „ograniczenie sumarycznego wpływu na dokładność estymacji obecności wielu składowych widmowych znajdujących się w znacznym oddaleniu od wykorzystywanych wartości widma”;
- „ograniczenie wpływu na dokładność estymacji obecności składowej sprzężonej, także dla krótkich czasów pomiaru”;
- „ograniczenie wpływu na dokładność estymacji obecności składowych harmonicznych niskiego rzędu, także dla krótkich czasów pomiaru”;
- „estymację nieiteracyjną, która ograniczenie wpływu obecności składowych zakłócających na dokładność estymacji realizuje bezpośrednio w formule interpolacyjnej”.

Cel czwarty jest jasny – dotyczy opracowania analitycznych procedur interpolacyjnych, które są korzystne z punktu widzenia przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym. Pierwsze trzy cele zakładają poprawę parametrów opracowywanych metod interpolacji. Chociaż sama ich treść jest jasna, to zabrakło jednoznacznego punktu odniesienia. Innymi słowy, czytelnik wie, że negatywny wpływ wskazanych czynników ma zostać ograniczony, ale nie ma wiedzy o jaką wartość/współczynnik. Niemniej cele doprecyzowuje teza rozprawy o następującej treści: „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 harmonicznych względem dotychczasowych nieiteracyjnych metod interpolacji widma.”

Na podstawie powyższego jasnym jest, że wskazane założenia uznaje się za spełnione jeśli dokładność szacowania częstotliwości zostanie zwiększona co najmniej o rząd wielkości w porównaniu do istniejących metod analitycznych. Cele pracy oraz (doprecyzowująca je) teza są właściwe w kontekście przedstawionej do oceny rozprawy.

3. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

Autor stosuje szereg metod badawczych niezbędnych do realizacji postawionych w pracy celów. Pośród nich należy wyróżnić techniki modelowania matematycznego, które umożliwiły wyznaczenie stosownych formuł analitycznych. Uzyskane rozwiązania podlegały gruntownym badaniom symulacyjnym zorientowanym, przede wszystkim, na udowodnienie założonej tezy pracy oraz spełnienie jej zamierzeń. Testy numeryczne uwzględniają porównania opracowanych przez Doktoranta rozwiązań algorytmicznych – zarówno wzajemne, jak również względem metod z literatury. Ostatecznie, przeprowadzono weryfikację eksperymentalną dwóch opracowanych algorytmów, które wyprowadzono analitycznie.

Warto zwrócić uwagę, że narzędzia omówione powyżej są konsekwentnie stosowane, a ich udział w pracy składa się na logiczny ciąg prowadzący od założeń, przez syntezy (tutaj rozumiane zastosowanie modelowania matematycznego), po symulacje i na badaniach praktycznych kończąc. Należy dodać, że wyniki dotyczące implementacji w rzeczywistym systemie są skromne (przede wszystkim ilościowo) w porównaniu do analiz symulacyjnych. Niedosyt może budzić także stosunkowo wyidealizowane podejście do eksperymentu, sprowadzające się do implementacji układu generatora sygnału wraz z układem akwizycji i przetwarzania danych. Warto nadmienić, że demonstracja działania opracowanych rozwiązań na sygnałach pozyskanych z rzeczywistych systemów zdecydowanie zwiększyłaby atrakcyjność prezentowanych wyników (oraz stanowiła praktyczne wyzwanie dla proponowanych metod). Niemniej, podejście Doktoranta jest logiczne i spójne, a przez to odpowiednie. Świadczy o tym także zrealizowanie celów pracy oraz udowodnienie założonej tezy.

4. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Jak wskazano w punkcie 1 recenzji, wyniki badań w rozprawie zostały przedstawione w rozdziale 5. Rozważania w nim zawarte rozpoczęto od zdefiniowania kryterium oceny estymatorów w postaci błędu RMSE (ang. *root-mean-square error*). W kolejnych sekcjach, doktorant opisał badania symulacyjne dla metod 2p, 3p, oraz 5p, a także przedstawił (krótko) wyniki eksperymentalne.

Na uwagę zasługuje bardzo duża liczba przeprowadzonych analiz (co zostało już wspomniane w punkcie 1). Z drugiej strony, znaczna część dyskusji sprowadza się do syntetycznego i cyklicznie powtarzanego opisu zawartości rysunków. Przykład przedstawiono w poniższych akapitach.

Na s. 82, Doktorant pisze: „Na rysunku 5.1 przedstawione zostały wykresy charakterystyk błędu RMSE w funkcji częstotliwości podstawowej λ_0 , dzięki którym możliwa jest ocena wpływu wyboru liczby użytych próbek N służących do obliczenia widma DFT na dokładność pomiaru. W badaniach zastosowano wartości N kolejnych potęg dwójki od $N = 32$ do $N = 1024$. Dla charakterystyk błędu uzyskanych dla czterech wybranych kolejnych wartości parametru p można zaobserwować, że wraz ze wzrostem liczby próbek N następuje znaczące zredukowanie wartości błędu wynikającego z obciążenia estymatora, nawet poniżej 10^{-5} bin dla $p > 2$. Zysk z zastosowania większej liczby próbek N rośnie wraz z zastosowaniem większej wartości parametru p , o czym świadczą rosnące odległości pomiędzy charakterystykami błędu na wykresach od 5.1a do 5.1d. Dla parametru $p = 3$ błąd RMSE jest mniejszy od 10^{-5} bin dla wszystkich badanych wartości N , zaś dla wartości $N > 512$ zmniejsza się poniżej wartości 10^{-10} bin. Na rysunku 5.1d charakterystyka związana z wartością $N = 1024$ przyjmuje odmienny kształt ze względu na ograniczenia dokładności związane z wykorzystywaną arytmetyką zmiennoprzecinkową.”

Z kolei, na s. 94, Autor zawarł niniejszą treść: „Na rysunku 5.11 przedstawiono wykresy charakterystyk błędu RMSE w funkcji częstotliwości podstawowej λ_0 , które pozwalają na ocenę wpływu liczby użytych próbek N sygnału służących obliczeniu DFT na dokładność estymacji. W badaniach zastosowano wartości N kolejnych potęg dwójki od $N = 32$ do $N = 1024$. Poziom błąd RMSE widoczny na uzyskanych charakterystykach dla czterech wybranych kolejnych wartości parametru p świadczy o tym, że wraz ze wzrostem liczby próbek N następuje znaczące zredukowanie błędu wynikającego z obciążenia estymatora, nawet poniżej wartości 10^{-10} bin dla parametru $p > 1$. Zysk z zastosowania większej liczby próbek N rośnie wraz z zastosowaniem większej wartości parametru p (rosnąca różnica w błędzie widoczna dla wykresów od 5.11a do 5.11d). Dla parametru $p = 3$ błąd RMSE jest mniejszy niż 10^{-10} bin dla wszystkich badanych wartości N , zaś dla wartości $N > 512$ zmniejsza się poniżej wartości 10^{-10} bin. Na rysunku 5.11d charakterystyka związana z liczbą próbek $N = 1024$ przyjmuje odmienny kształt ze względu na ograniczenia związane z dokładnością wykorzystywanej arytmetyki.”

Różnice pomiędzy wskazanymi akapitami są kosmetyczne, a uzyskane wyniki są bardzo zbliżone. Co więcej stwierdza to sam Doktorant pisząc: „Powyższy opis wyników pokrywa się w dużym stopniu z opisem poświęconym estymatorowi 2pGMSD dla przypadku sygnału złożonego z pojedynczej oscylacji zespolonej (rysunek 5.1).”

Tego rodzaju dyskusje stanowią objętościowo znaczną (jeśli nie przeważającą) część opisu wyników. Przykładowo, informacje przedstawione na s. 94 można było streścić w jednym zdaniu wskazując, że konfiguracja testu przedstawionego na Rys. 5.11 jest tożsama z tą dla Rys. 5.1. Dokładny opis w ramach pierwszej serii przeprowadzonych testów (2p) może stanowić „wprowadzenie” czytelnika w metodykę badawczą stosowaną przez Doktoranta. Niemniej, w przypadku symulacji dla kolejnych metod (3p i 5p) stanowi on jedynie powielenie informacji dostępnych na rysunkach oraz (częściowo) opisach pod nimi. Zastosowane przez Autora podejście nie tylko sztucznie zwiększa objętość rozprawy, ale też jest bardzo męczące dla czytelnika.

Podobnie, dyskusja rezultatów poszczególnych testów (tu rozumiana jako wyniki dla 2p, 3p i 5p) jest bardzo zbliżona. Autor uzasadnia otrzymane charakterystyki (w zależności od przeprowadzanych analiz) dominacją wariacji, obciążenia estymatora, składowej sprzężonej, błędów losowych (lub z nimi związanych), czy ograniczeniami arytmetyki zmiennoprzecinkowej. Oczywiście nie ma w tym nic złego i jest to jak najbardziej zrozumiałe w kontekście zaprezentowanych danych. Z drugiej strony, skrócenie części opisowej na rzecz holistycznego podsumowania rozważanych metod (powiedzmy w tabelach) znacznie zwiększyłoby przejrzystość pracy dla czytelnika. Wspomniane podsumowanie mogłoby zostać uzupełnione o dyskusję uwypuklającą rozbieżności pomiędzy poszczególnymi metodami ze wskazaniem ich wad oraz zalet. Taka analiza mogłaby z kolei stanowić punkt wyjścia do zarekomendowania poszczególnych metod z punktu widzenia ich potencjalnych praktycznych zastosowań.

Pomimo rozbudowanych opisów, sposób doboru niektórych parametrów do symulacji jest niejasny. Przykładowo, na s. 84, wskazano, że wpływ SNR na błąd RMSE został wyznaczony dla częstotliwości podstawowej $\lambda_0 = 2.8$ (analiza zakłóceń losowych). Jednocześnie, na s. 89, zastosowano $\lambda_0 = 3.8$. Dobrane wartości parametrów są wykorzystywane konsekwentnie dla poszczególnych grup przeprowadzonych testów. Niestety klucz wyboru wielkości nie został omówiony, chociaż wydaje się nieprzypadkowy. Podobne wrażenie można odnieść w kontekście parametru p (potęga sinusa funkcji GMSD).

Z kolei, na s. 87 (Rys 5.5), Doktorant przeprowadził symulacje SNR dla 2pGMSD z wykorzystaniem $p = 0$ oraz $p = 3$. O ile pierwszy parametr jest zasadny, ponieważ metoda z pracy [113] wykorzystuje okno prostokątne (co odpowiada GMSD z $p = 0$), to dobór $p = 3$ nie został umotywowany. Na podstawie Rys. 5.4, można wnioskować, że wybór $p = 1$ nie jest logiczny ze względu na dominację obciążenia estymatora w badanym zakresie SNR. Natomiast wydaje się, że problem nie występuje dla $p = 2$ (który jednocześnie zapewnia mniejszy błąd względem ograniczenia CR – Rys. 5.4). Podobne pytanie nasuwa się przy analizie Rys. 5.16 na s. 100, chociaż w tym wypadku można domniemać, że podstawowym celem doktoranta było (podobnie jak w odniesieniu do λ_0) zapewnienie spójności dobieranych parametrów dla wszystkich testowanych metod. Niemniej, konkretne decyzje, przy wyborze zmiennych, aż proszą się o stosowne uzasadnienie.

Ostatnia sekcja opisu metodologii zawiera dyskusję wyników eksperymentalnych. Jak wspomniano w punkcie 1 recenzji, część praktyczna jest skromna w stosunku do przeprowadzonych symulacji. Niemniej, Autor zademonstrował implementację praktyczną dwóch opracowanych rozwiązań algorytmicznych (tj., 3p- oraz 5p-GMSD) w układzie mikrokontrolera oraz zaprezentował ich działanie. Niestety, na Rys. 5.35 zabrakło porównania charakterystyk z sygnałem odniesienia (tj., przed korekcją), co utrudnia ocenę faktycznego wpływu przetwarzania na sygnał wejściowy. Innymi słowy, Autor przedstawił względne porównanie metod 3p i 5p. Na uwagę zasługuje omówienie złożoności obliczeniowej opracowanych rozwiązań analitycznych poprzez porównanie liczby cykli procesora. Wyniki jasno wskazują, że algorytm 5p wymaga około 4.7-krotnie więcej cykli w porównaniu do 3p. Niemniej, oba rozwiązania „mieszczą się” (z dużym zapasem) w zakresie możliwości obliczeniowych zastosowanego mikrokontrolera. Jak wskazano w punkcie 1, przeprowadzony eksperyment (choć poprawny – wskazuje sprzętową implementację rozwiązania) można uznać za syntetyczny. Zaprezentowanie możliwości algorytmów na danych z rzeczywistego systemu, czy dla kilku przetworników analogowo-cyfrowych (tj. o różnej rozdzielczości) stanowiłoby wartość dodaną pracy.

Mając na względzie powyższe można stwierdzić, że opis wyników zawarty w pracy jest poprawny. Wspomniane problemy (w szczególności obszernie i powtarzające się opisy nie wnoszące dużo do tematu) mają niekorzystny wpływ na przystępność pracy dla czytelnika. Z drugiej strony, głównym zadaniem opisu badań było udowodnienie tezy rozprawy. Lektura rozdziału skłania do konkluzji, że ów cel został spełniony. Należy dodać (zgodnie z dyskusją przedstawioną we wprowadzeniu do rozprawy), że algorytmy przetwarzania sygnału są powszechnie stosowane we współczesnej inżynierii. Stąd potencjał do praktycznego wykorzystania rozwiązań opracowanych przez Doktoranta jest ogromny.

5. Ocena zastosowanego piśmiennictwa oraz składu pracy

Jak wspomniano w punkcie 1, praca została sporządzona w języku polskim. Część uwag odnoszących się do piśmiennictwa (w kontekście sztucznie zwiększonej objętości pracy będącej następstwem syntetycznej i cyklicznej dyskusji wyników oraz wyciąganych wniosków) zawarto w punkcie 5.

Należy wskazać, że doktorant stosuje niezwykle dużo powtórzeń zwrotów, dla których nie stosuje (istniejących) synonimów. Przykładowo, słowo „metoda” pojawia się w rozprawie, w każdym możliwym przypadku (łącznie 798 razy – średnio 5.6/stronę). W samej tylko sekcji 2.1 (dwa akapity), autor zastosował je 13-krotnie nie stosując przy tym żadnego dostępnego synonimu (technika, algorytm, podejście, itp.). Na stronie 14, zwrot został powtórzony 9-krotnie w jednym akapicie (8 linijek tekstu), a na s. 22, 23-krotnie. Ponadto, Autor wielokrotnie stosuje zwroty typu „Przykładami metod (...) są metody”. Inne często powtarzane słowa (wraz z odmianami) to, np., „wartość” (796 razy), „estymator” (608 wystąpień), „składowa” (449), „parametr” (351), „charakterystyka” (232), czy „formuła” (125). Wielokrotnie można było zastosować synonimy wspomnianych wyrazów, lub całkowicie je pominąć (choćby przy wyliczeniach, gdzie czytelnik doskonale zdaje sobie sprawę z tego „co Autor ma na myśli”). Doktorant stosował ponadto zwroty, takie jak: „Zysk wynikający z przyjęcia (...) wynika przede wszystkim”. Używanie dużej liczby powtórzeń, czy zdań o wskazanej strukturze znacznie utrudnia czytelnikowi przyswajanie treści pracy.

Do innych zidentyfikowanych problemów należy brak spójności przy stosowaniu/definiowaniu akronimów, zaniechanie tłumaczenia zwrotów angielskich, a także błędy nazewnictwa w tymże języku. W kontekście pierwszego zagadnienia, doktorant zamiennie stosuje skrót z angielskiego, jak GMSD (ang. *generalized maximum sidelobe decay*), czy SNR (ang. *signal to noise ratio*), z tymi które pochodzą z języka polskiego (jak APN-ANF dla angielskiego zwrotu *all-pass filter* – s. 16). Innym przykładem może być używanie polskich określeń w połączeniu z angielskimi skrótami, jednak bez odpowiednich objaśnień, np. „zwykła metoda najmniejszych kwadratów (OLS)”, gdzie zabrakło informacji, że OLS oznacza (ang. *ordinary least-squares*). Takie niespójne podejście utrudnia czytelnikowi zrozumienie znaczenia skrótów – tym bardziej, że w pracy nie zastosowano tabeli z objaśnieniami zastosowanych akronimów. Do nieprzetłumaczonych zwrotów należy np., „*matrix pencil method*”, czyli metoda macierzy ołówkowych. Niepełną listę pozostałych zidentyfikowanych błędów, czy niedociągnięć zawarto poniżej:

- s. 15 – *course estimation* => *coarse estimation*;
- s. 21 – UTC znaczy *Coordinated Universal Time*, a nie *Universal Time Coordinates*;
- s. 25 – *picket-fence* => *picked fence*;
- s. 35 – w odróżnieniu do sygnału sinusoidalnego => od sygnału;
- s. 41, 42 (m.in.) – sieroty „l”, „w”, „o” na końcu linijki;
- s. 49 – $w(n)$ winno być zapisane kursywą;
- s. 57 – rodzaj okna czasowego jest określona => określony;
- s. 63 – po nałożeniu okna czasowego => po zastosowaniu okna;
- s. 64 – „Celem (...). W tym celu (...)”;
- s. 74 – dokładnie ta sama => taka sama;
- s. 105 – Krotność (...) 10^8 raza. => Krotność (...) 10^8 ;
- s. 42 – skrót RCSTL nie jest objaśniony;
- s. 39 – skrót CRLB nie jest objaśniony (odnosi się to także to rozdziału 5).

Oprócz wskazanych niedociągnięć piśmienniczych należy zwrócić uwagę na problemy dotyczące składu pracy. Przede wszystkim uwidaczniają się one w kontekście rycin zawartych w rozdziale 5. Doktorant niekonsekwentnie opisuje wykresy, co utrudnia ich interpretację. Przykładowo, rys. 5.1 składa się z czterech rycin z oznaczeniami (a)-(d). Niestety Autor nie odniósł się do nich w opisie ograniczając się jedynie do stwierdzenia, że (parafrazując) na rysunku pokazano wpływ liczby próbek dla czterech wybranych wartości określonego parametru. Analogicznie, na rys. 5.6 zawarto dwie ryciny (a), (b). Natomiast w podpisie zawarto jedynie informację, że (parafrazując) wykres porównuje błędy dla różnych parametrów okna dla sygnału sinusoidalnego. Takie podpisy utrudniają czytelnikowi zrozumienie „na co patrzy”. Z kolei dla rys. 5.7, Autor zdecydował się odnieść do oznaczeń (a)-(d) w podpisie, co jest dowodem na wskazany brak konsekwencji.

Powyzsza uwaga odnosi się do wszystkich wykresów zawartych w rozdziale 5. Zastosowanie określonego (spójnego) schematu opisu znacznie zwiększyłoby czytelność pracy i stanowiło kolejny argument za skróceniem (usunięciem) syntetycznych dyskusji (patrz punkt 4 recenzji). Pozostałe błędy/niedociągnięcia dotyczące składu pracy zawarto poniżej:

- cała praca – brakujące odstępki pomiędzy niektórymi słowami i cytowanymi referencjami (np. s.40 jako[5], czy s. 41 Dudy[78]) – jest to zapewne błąd wynikający ze składu pracy w środowisku LaTeX;
- s. 55 – błąd składania tekstu przez LaTeX (pod wzorem 3.92, słowo uwzględnieniu wystaje poza akapit);
- s. 60, 78 – samodzielne tabele powinny być na górze strony (konfiguracja LaTeX);
- s. 85 – pół strony wolnego miejsca pod rys. 5.3.

Warto także zwrócić uwagę, że termin „okno Hanninga” stosowany przez doktoranta jest kolokwializmem wynikającym z angielskiego zwrotu „*hanning a window*”, który oznacza modyfikowanie sygnału przy użyciu okna Hannana [1]. Nazwa funkcji pochodzi od J. von Hannana (stąd okno Hannana a nie Hanninga), który stosował ją do analizy danych meteorologicznych [2].

- [1] R.B. Blackman, J.W. Tukey, “The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering — Part I,” *Bell System Technical Journal*, vol. 37, no. 1, 1958.
 [2] J. von Hann, *Handbook of Climatology*, The Macmillan Company, 1903.

6. Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

Jedną z nieprawidłowości w pracy jest „swobodne” podejście Autora do prezentacji wykresów zawartych w rozdziale 3. Przykładowo doktorant zaniedbał opis osi pionowych na rys. 3.1, a także zastosował niespójne oznaczenia dla osi poziomych. Ponadto, na rycinach brakuje skali. Typowym (i konsekwentnie stosowanym) podejściem powinno być opisanie obu osi dla każdego zastosowanego wykresu, a także dodanie skali. Prezentowane treści powinny być zwięźle wyjaśnione w opisie rysunku (jak wskazano w punkcie 5). Podobny komentarz odnosi się do rys. 3.2 oraz 3.3. Z kolei, na rys. 3.4 oraz 3.5, Doktorant zawarł skalę, a także opisał oś pionową (choć po angielsku pomimo przygotowania rozprawy w języku polskim) zaniedbując jednocześnie opis osi poziomej.

Następnym problemem jest brak spójności pomiędzy definicją błędu RSME oraz oznaczeniami zastosowanymi na wykresach w rozdziale 5. Chociaż metryka RMSE jest w istocie tożsama z $(MSE)^{0.5}$, ten fakt nie musi być oczywisty dla czytelnika i Autor powinien jasno wskazać istniejącą zależność w rozprawie. Zaniedbanie tego rodzaju aspektów wydaje się szczególnie istotne w kontekście bardzo rozbudowanych i powtarzających się dyskusji w opisie wyników (punkt 4 recenzji).

Chociaż poprzez realizację eksperymentu Autor wykazał możliwość praktycznego zastosowania opracowanych rozwiązań algorytmicznych, to badania ograniczono do sprzętowej implementacji dwóch algorytmów. Metoda nie została zademonstrowana dla żadnego z praktycznych problemów wskazanych choćby w sekcji 2.3.1. W kontekście dyskusji przeprowadzonej w sekcji 5.6, wydaje się że najłatwiejszym sposobem demonstracji opracowanych rozwiązań byłyby testy układu przetwornika analogowo-cyfrowego (lub cyfrowo-analogowego, w zależności od jego umiejscowienia w schemacie na rys. 5.35) o mniejszej rozdzielczości w porównaniu do zastosowanego w pracy (obecnie 24 bity), a także porównanie uzyskanych rezultatów już dostępnymi wynikami (wraz z odpowiednią dyskusją). Niestety, w rozprawie zabrakło bardziej rozbudowanych testów, czy choćby analiz sygnałów z rzeczywistych systemów (co, jak wielokrotnie już wskazano, stanowiłoby istotną wartość dodaną). W tym miejscu nasuwa się pytanie, dlaczego takie badania nie zostały przeprowadzone.

W komentarzu dotyczącym błędu systematycznego dla 2p-GMSD zawartym w rozdziale 6 Autor stwierdza, że „uzyskanie błędu na poziomie 10^{-10} bin jest praktycznie nieosiągalne w rzeczywistym systemie ze względu na szum i zakłócenia w sygnale”. Z kolei w dyskusji dotyczącej 5pGMSD Doktorant argumentuje, iż „uzyskanie zbliżonej dokładności w rzeczywistym systemie pomiarowym jest bardzo trudne ze względu na występujące zakłócenia”, w odniesieniu do błędu 10^{-10} bin. W związku z tym nasuwa się pytanie: czy zbliżenie się/zejście poniżej wskazanej wielkości jest trudne, czy niemożliwe?

Ostatnie pytanie, które nasuwa się po lekturze rozprawy doktorskiej (choć w żadnym wypadku nie powinno być uznawane za nieprawidłowość – umieszczono je tutaj jedynie ze względu na sposób organizacji recenzji) odnosi się do liczby punktów w estymatorach opracowanych przez Doktoranta. Otóż w pracy wyprowadzono zależności dla 2p-, 3p- oraz 5p-GMSD. Czy Autor badał możliwość syntezy rozwiązania dla estymatora cztero-punktowego? Jeśli nie podjęto takich prób, co było powodem takiego stanu rzeczy? Jeśli stosowne badania zostały przeprowadzone, dlaczego nie zawarto ich w pracy?

7. Ocena czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Autor zdefiniował łącznie cztery cele badawcze (doprecyzowane tezą pracy), które zostały osiągnięte poprzez implementację spójnej metodologii wywodzącej się z modelowania matematycznego (ze szczególnym uwzględnieniem algebry liniowej), symulacji komputerowych, czy (ograniczonej) weryfikacji eksperymentalnej. Niektóre z oryginalnych rozwiązań zaproponowanych przez doktoranta (i wymienionych w podsumowaniu pracy) dotyczą:

- Opracowania założeń do wyprowadzenia metod z aproksymacją charakterystyki częstotliwościowej okna GMSD;
- Opracowanie metod 2p, 3p, 5p;
- Przeprowadzenia pełnych analitycznych wyprowadzeń dla algorytmów 3p oraz 5p;
- Gruntownych testów opracowanych metod, tj., 2p-, 3p- oraz 5p-GMSD;
- Implementacja analitycznych rozwiązań 3p- oraz 5p- w opracowanym urządzeniu oraz praktyczna demonstracja ich działania wraz z analizą złożoności obliczeniowej.

Bez wątpliwości przedstawione powyżej wyniki badań Doktoranta stanowią oryginalne rozwiązanie postawionych problemów naukowych.

8. Ocena czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

O poziomie ogólnej wiedzy teoretycznej Doktoranta świadczą przedstawione w rozprawie rozbudowane analizy teoretyczne (modelowanie matematyczne), a także trafnie dobrana i aktualna bibliografia (94 spośród zacytowanych prac zostało opublikowanych w ciągu ostatniej dekady), na którą składa się łącznie 186 pozycji literaturowych. Doktorant jest współautorem trzech cytowanych prac (tj., dwóch publikacji z listy A – 200 PKT MEiN, a także komunikatu na recenzowanej konferencji o zasięgu międzynarodowym), co pozwoliło na upowszechnienie niektórych z uzyskanych wyników w środowisku naukowym.

W podsumowaniu przedłożonej do oceny rozprawy, Autor w sposób jednoznaczny przedstawił swój wkład w opracowane rozwiązania algorytmiczne. W mojej ocenie zastosowane podejście badawcze świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.

9. Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Adama Matusiaka pod tytułem *Estymacja częstotliwości metodami interpolacji widma dla okien czasowych GMSD* stanowi rozwiązanie problemu szacowania częstotliwości z wykorzystaniem tanich obliczeniowo rozwiązań analitycznych. Niezwykle obszerny przegląd literatury, a także rezultaty zaprezentowane w dysertacji jasno wskazują, że Doktorant nie tylko doskonale rozumie podjętą tematykę, ale też posiada wiedzę i umiejętności niezbędne do prowadzenia pracy naukowej. O znaczeniu wyników zawartych w rozprawie świadczy także ich publikacja w artykułach z listy A (200 pkt MEiN każdy) oraz na międzynarodowej konferencji. Co więcej, Doktorant zawarł w pracy wyniki badań, które nie zostały jeszcze opublikowane na forum międzynarodowym. Na uznanie zasługuje wygenerowanie znacznej ilości danych symulacyjnych w celu rzetelnej weryfikacji opracowanych rozwiązań. Ponadto, przedstawione wyniki wskazują, że dysertacji pracy została udowodniona, a jej cele spełnione.

Praktyczne aspekty realizacji badań nie budzą wątpliwości. Z drugiej strony, rozprawa jest napisana w sposób, który utrudnia czytelnikowi jej przyswojenie. Wynika to (przede wszystkim) ze sposobu dyskusji, który opiera się na szeregu notorycznych powtórzeń zamiast spójnego, łatwego do interpretacji i zwięzłego opisu uzyskanych rezultatów (punkt 5 recenzji), czy rozważanych koncepcji (punkt 1 recenzji). W szczególności w rozdziale 5 zabrakło uwypuklenia najważniejszych różnic pomiędzy opracowanymi metodami, czy jasnego wskazania aspektów wartych uwagi. Po lekturze można odnieść wrażenie, że Doktorant włożył dużo pracy w wygenerowanie (bardzo dobrych i ciekawych) wyników, przez co zabrakło czasu na rzetelne podejście do napisania rozprawy (z uwzględnieniem jej kilkukrotnego przejrzenia w celu identyfikacji oczywistych niedociągnięć – jak wielokrotne anafory, czy brak zwięzłości w interpretacji danych). Jest to bez wątpienia wada, którą należy uznać za stan faktyczny, tj., nie wymagający informacji zwrotnej. Z drugiej strony, takie aspekty jak brak rygorystycznego podejścia do opisu rysunków, czy brak spójności w formułowaniu wniosków mają większą wagę (zwłaszcza uwzględniając techniczny charakter pracy), a przez to wymagają dodatkowego komentarza. Za istotne należy także uznać pytania, które nie stanowią niedociągnięć jednak pozostały bez odpowiedzi po lekturze dysertacji.

Mając na względzie powyższe stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca **spełnia wymagania** określone w art. 187 ust. 1-4 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2023 r. poz. 724). Dlatego **wnioskuję o dopuszczenie rozprawy mgra inż. Adama Matusiaka do publicznej obrony**. Jednocześnie proszę Doktoranta o odniesienie się do uwag zawartych w punkcie szóstym niniejszej recenzji.



Adrian Bekasiewicz