



Warszawa, 7 grudnia 2023 r.

dr hab. inż. Kajetana Marta Snopek, prof. uczelni
Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
ul. Nowowiejska 15/19
00-665 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

(Podstawa formalna recenzji: Uchwała nr 732/31/RDND02/2021-2024 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne z dnia 25 września 2023r.)

Tytuł rozprawy: *"Estymacja częstotliwości metodami interpolacji widma dla okien czasowych GMSD"*

Autor rozprawy: mgr inż. Adam Matusiak

Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Borkowski

1. Zagadnienie naukowe i teza

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy problemu estymacji częstotliwości za pomocą metod interpolacyjnych wywodzących się z klasycznego Dyskretnego Przekształcenia Fouriera. Autor dokonał gruntownego przeglądu i klasyfikacji stosowanych metod i zaproponował trzy nowe metody interpolowanej DFT wykorzystujące okna GMSD (ang. Generalized Maximum Sidelobe Decay). W rozdziale 1. została sformułowana główna teza naukowa rozprawy, która brzmi:

„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 harmonicznnych względem dotychczasowych nieiteracyjnych metod interpolacji widma”.

Na stronie 10. rozprawy zostały również określone założenia proponowanych metod, które uszczegóławiają powyższą tezę. Zarówno cele, jak i teza rozprawy, wystarczająco jasno określają zakres pracy.

RDN AEETK/231/2023

2. Zakres rozprawy

Recenzowana rozprawa ma charakter teoretyczno-symulacyjny z elementami eksperymentu w rzeczywistym systemie pomiarowym. Praca ma objętość 140 stron i składa się z sześciu rozdziałów, których treść została zilustrowana 40 rysunkami (często złożonymi z kilku wykresów) i 4 tabelami.

Rozdział 1 zawiera ogólne wprowadzenie do tematyki rozprawy, jaką jest estymacja częstotliwości stosowana w różnych dziedzinach, z których Autor wymienia: elektroenergetykę, technikę radarową, inżynierię biomedyczną oraz szeroko rozumianą telekomunikację. Podkreślając znaczenie metod wywodzących się z klasycznego dyskretnego przekształcenia Fouriera (DFT), Doktorant krótko opisuje znane zjawiska przecieku i zafalowania (ang. *picket-fence effect*) widma utrudniające interpretację wyników DFT, uzasadniając tym samym celowość stosowania metod interpolowanej DFT (IpDFT). Estymatory IpDFT służą do wyznaczenia interesujących parametrów analizowanego sygnału (tutaj: częstotliwości podstawowej unormowanej) na podstawie kilku sąsiadujących wartości DFT.

Rozdział 2 poświęcony jest omówieniu i klasyfikacji znanych metod estymacji częstotliwości oraz przykładowym zastosowaniom w różnych dziedzinach. W sekcji 2.3.2. został dokładnie opisany pomiar synchrofazora w systemie elektroenergetycznym.

W rozdziale 3, przedstawiono i sklasyfikowano techniki interpolacji DFT (uzupełnianie zerami, interpolacja za pomocą „funkcji uniwersalnych”, metoda bazująca na błędzie średniokwadratowym, liniowa interpolacja LIDFT, metody oparte na formułach algebraicznych). Uwypuklone zostały metody estymacji częstotliwości dobrze kompensujące wpływ składowej sprzężonej oraz innych dodatkowych składowych harmonicznym w estymowanym sygnale. Materiał ten stanowi punkt wyjścia do zaproponowania w rozdziale 4, nowych autorskich metod interpolowanej DFT wykorzystujących okna GMSD: dwupunktowej (2pGMSD), trzypunktowej (3pGMSD) oraz pięciopunktowej (5pGMSD). Znalazły się w nim szczegółowe wyprowadzenia algebraicznych formuł interpolacyjnych tych metod.

W rozdziale 5, metody te przetestowano i porównano z innymi algorytmami znanymi z literatury, co zostało zobrazowane na charakterystykach RMSE (ang. Root Mean-Square Error) zaproponowanych estymatorów. W rozdziale tym został również opisany przeprowadzony przez Autora eksperyment weryfikacji poprawności i skuteczności algorytmu 5pGMSD w estymacji częstotliwości w praktycznym systemie w obecności dodatkowych składowych harmonicznym. Efekty jego działania zostały porównane z metodą 3pGMSD.

Rozdział 6 zawiera obszerne podsumowanie rozprawy z uwypukleniem najważniejszych, zdaniem jej Autora, wyników.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1. Analiza źródeł

Należy zauważyć, iż na przestrzeni ostatnich 30–40 lat problem estymacji częstotliwości był i jest szeroko poruszany w literaturze światowej. Liczba dostępnych źródeł jest bardzo bogata i z pewnością Doktorant musiał dokonać ich selekcji. W załączonym wykazie, obejmującym 186 pozycji, przeważają prace z ostatnich 20 lat, ale w rozprawie cytowane są również artykuły wcześniejsze, jak np. ważna pozycja [150] autorstwa D.C. Rife'a i R. Boorstyna z 1974 roku. Należy zaznaczyć, że 34 z wymienionych 186 pozycji Bibliografii są autorstwa członków zespołu naukowego, z którego Doktorant się wywodzi. Cztery z nich, to publikacje współautorskie wymienione również w Dodatku A rozprawy zawierającym wykaz wszystkich publikacji Doktoranta. Tylko w jednej z nich, mgr. inż. Adam Matusiak jest pierwszym autorem.

Analiza źródeł została przeprowadzona bardzo rzetelnie i na jej podstawie można stwierdzić, że Autor ma dobre rozeznanie w literaturze tematu, dotyczącej zarówno teoretycznych, jak i praktycznych aspektów omawianych metod, jak np. przedstawionego w sekcji 2.3.2. pomiaru synchrofazora w systemie elektroenergetycznym z wykorzystaniem metod interpolowanej DFT, w której znalazły się liczne odniesienia do najważniejszych pozycji literatury z tej tematyki.

Mam jedną uwagę krytyczną, co do liczby cytowań prac dotyczących algorytmów FFT (ang. Fast Fourier Transform). Chociaż nie są one przedmiotem rozprawy, ale warto byłoby powołać się na więcej źródeł, a nie tylko na dwie prace: [69], [139] (str. 24). Bardzo obszerne zestawienie współczesnych algorytmów FFT można znaleźć np. w monografii Franchetti, F., Püschel, M. (2011). *FFT (Fast Fourier Transform)*. In: Padua, D. (eds) *Encyclopedia of Parallel Computing*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-09766-4_243.

3.2. Metoda badawcza

Jako główne zadanie badawcze Doktorant przedstawia: zaproponowanie nowych nieiteracyjnych metod interpolacji widma DFT, wyprowadzenie odpowiednich formuł algebraicznych estymatorów unormowanej częstotliwości podstawowej i praktyczną weryfikację ich poprawności i użyteczności. Zadanie to zostało sformułowane właściwie, a przeprowadzona analiza teoretyczna zagadnienia została wyczerpująco przedstawiona w rozdziałach 2 oraz 3. Jak wielokrotnie i słusznie Autor zauważa w swojej rozprawie, dokładność estymacji zależy od obecności w estymowanym sygnale składowych zakłócających tj. składowej sprzężonej i innych składowych harmonicznym, w tym pojedynczej składowej niskiego rzędu i składowych oddalonych, których działanie szczególnie uwidacznia się w przecieku widma. Zaproponowane w celu redukcji tego zjawiska uogólnione okna GMSD (maksymalnego opadania listków bocznych) sprawdziły się tutaj bardzo dobrze, więc ich dobór był w pełni uzasadniony. Zaproponowane nowe metody interpolacji DFT kompensują wpływ obecności wymienionych wcześniej składowych zakłócających. Ze względu na nieskomplikowaną postać estymatora, charakteryzuje je

hu

prostota implementacji, niska złożoność obliczeniowa oraz wysoka dokładność estymacji, nawet w przypadku krótkich czasów pomiaru, co jest szczególnie widoczne w przypadku metody pięciopunktowej 5pGMSD. Praktyczną użyteczność zaproponowanych metod w odniesieniu do innych konkurencyjnych metod estymacji częstotliwości potwierdzają charakterystyki błędu RMS estymatorów przedstawione w rozdziale 5 otrzymane dla przypadku sygnału bez zakłóceń losowych i zawierającego szum AWGN. Należy podkreślić duży nakład pracy włożonej przez Doktoranta w przeprowadzone testy i opracowanie ich wyników. Wnioski wynikające z badań symulacyjnych zostały szczegółowo i wyczerpująco przedstawione w rozdziale 5. i są one poprawne. Najważniejsze z nich związane z założonymi celami naukowymi i tezą zostały również powtórzone w Podsumowaniu rozprawy.

3.3. Naukowa wartość rozprawy

Najważniejszą część rozprawy stanowią rozdziały 4 i 5 prezentujące oryginalny dorobek Autora oraz rozdział 6 zawierający obszerne podsumowanie wyników. Jedna kwestia wymaga jednak wyjaśnienia. Otóż w Podsumowaniu Autor zaznacza, że w rozprawie przedstawiono zarówno wyniki wcześniejszych prac badawczych, jak i te dotąd niepublikowane. Nie zostało jednak opisane jaki był wkład mgr. inż. Adama Matusiaka w powstanie wcześniejszych publikacji współautorskich wymienionych w Dodatku A. Uważam, że jest to bardzo istotne w ocenie naukowej wartości rozprawy, w rozumieniu potwierdzenia, że do oryginalnych wyników Doktoranta można zaliczyć również pomysł opracowania interpolacyjnych metod 3pGMSD i 5pGMSD. Cytując za Autorem, do autorskich wyników należą:

- „opracowanie założeń sposobu wyprowadzenia metod wykorzystujących aproksymację charakterystyki częstotliwościowej okna czasowego GMSD [...]”;
- opracowanie metody dwupunktowej 2pGMSD wykorzystującej formuły iteracyjne (4.14) i (4.15); pełne analityczne wyprowadzenie metody trzypunktowej 3pGMSD;
- wersja uogólniona estymatora trzypunktowego 3pGMSD, która pozwala na uwzględnienie wpływu dwóch dowolnych oscylacji zespolonych o wybranych krotnościach częstotliwości podstawowej [...]”;
- pełne analityczne wyprowadzenie metody pięciopunktowej 5pGMSD [...]”.

Rozszerzając powyższą listę, uważam, że naukową wartość rozprawy podnoszą dodatkowo: dokonana klasyfikacja metod estymacji częstotliwości ze względu na model sygnału, strukturę algorytmu i postać widma, przedstawiona w zwartej i przejrzystej formie w Tabelach 3.1–3.4 w rozdziale 3; opracowanie Algorytmu 1 (str. 78) dla metody pięciopunktowej 5pGMSD oraz zaproponowanie i przeprowadzenie eksperymentu pomiarowego, którego wyniki potwierdzają słuszność postawionej tezy badawczej. Jeszcze raz należy podkreślić klarowność wyprowadzeń z rozdziału 4. oraz prostotę otrzymanych formuł algebraicznych, co przekłada się na łatwość implementacji i szybkość działania.

4. Poprawność redakcyjna rozprawy

Rozprawa napisana jest poprawnym językiem technicznym, jej układ jest przemyślany i logiczny. W pierwszych rozdziałach Doktorant dokładnie przedstawia tematykę estymacji częstotliwości i dopiero na tej podstawie wprowadza nowe metody interpolacji DFT z oknami GMSD. Następnie porównuje działanie zaimplementowanych metod z innymi wybranymi algorytmami analizując uzyskaną dokładność. Dalej przeprowadza eksperyment w rzeczywistym systemie pomiarowym i formułuje wnioski końcowe.

Należy podkreślić, że rozprawa ma estetyczną formę, wielkość czcionek i odstępów została właściwie dobrana, a powiązana z numerem konkretnego rozdziału numeracja formuł matematycznych, bardzo ułatwia lekturę. Praca została zilustrowana licznymi rysunkami, które są czytelne i dobrze opisane. Wszystkie użyte w treści akronimy zostały rozwinięte, a w pracy został zamieszczony Wykaz wybranych oznaczeń i terminów.

Dostrzegłam niewielką liczbę błędów redakcyjnych oraz sformułowań, do których można mieć mniejsze lub większe zastrzeżenia:

- nie bardzo podoba mi się dosyć zawile sformułowanie samej tezy rozprawy, ale rozumiem jaka myśl przyświecała Doktorantowi;
- nie powinno się zostawiać w wierszach pojedynczych spójników, co jest nagminne w całym tekście rozprawy;
- dostrzegłam niekonsekwencję w oznaczeniach unormowanej częstotliwości podstawowej: λ lub λ_0 (str.13); podobnie φ versus φ_0 (str. 21 po wzorze (2.21));
- niekonsekwencja w oznaczeniach okien czasowych $w(n)$ versus w_n (wzory (3.13), (3.14), (3.23));
- Autor używa sformułowania „błąd RMSE” zamiast po prostu „błąd RMS”, bo „E” to z ang. *error*;
- błędnie użyte „ilość” w znaczeniu „liczby oscylacji” na str. 25;
- w drugim wierszu nad wzorem (4.12) pojawił się błąd w wyrażeniu: jest $W_p(k + 1\lambda_0)$, a powinno być $W_p(k + 1 - a\lambda_0)$.

5. Uwagi krytyczne i tematy do dyskusji

Uwagi dotyczące strony technicznej rozprawy zostały przedstawione powyżej w pkt. 4 niniejszej recenzji. Tutaj wymienię zauważone błędy lub niejasności o charakterze merytorycznym:

- Proszę o potwierdzenie prawidłowości wzoru (2.2) zacytowanego, według Autora, z pozycji [150] autorstwa D.C. Rife'a i R. Boorstyna, którego w takiej formie w oryginalnej publikacji nie znalazłam.
- Nie rozumiem dlaczego częstotliwość unormowana λ zdefiniowana została jako $\lambda = fNT$ (chodzi o mnożenie przez liczbę próbek N) (p. str. 13 i str. 28). Wedle mojej

wiedzy, częstotliwość unormowaną w literaturze dotyczącej DtFT definiuje się jako iloraz częstotliwości f i częstotliwości próbkowana równej $1/T$. Proszę o uzasadnienie poprawności tego wzoru.

- Dostrzegłam błąd we wzorze (3.5) na IDFT – pod znakiem sumy powinno być X_k .
- Dlaczego we wzorze (3.6) w wykładniku $e^{j2\pi\lambda n/N}$ jest znak „+”? I dlaczego postać wykładnika jest właśnie taka? W definicji DtFT funkcja wykładnicza ma zwykle postać $e^{-j2\pi\lambda n}$.
- Zauważyłam błąd w mianowniku $\arccos(\cdot)$ we wzorze (3.29) – w obecnej formie jest $Z_2 - Z_2$, czyli 0.
- W Tabeli 3.4 (str. 60) w kolumnie #7 chyba błędnie wpisano „5” w kontekście 2pGMSD i 3pGMSD?

Pozostałe uwagi merytoryczne i pytania:

1. Proszę o dokładne wyjaśnienie jaki był wkład Doktoranta w powstanie publikacji [37], [51], [52] oraz [123].
2. Interesuje mnie zastosowanie metod estymacji częstotliwości w aparaturze biomedycznej (str. 8). Czy Doktorant mógłby rozwinąć ten wątek i podać przykłady konkretnych zastosowań z odniesieniami do literatury?
3. Proszę o wyjaśnienie metodyki „interpolacji za pomocą funkcji uniwersalnych” (str. 14 i 33). Co rozumie się pod pojęciem „funkcji uniwersalnej”?
4. Uważam, że w pracy (podrozdział 3.3 lub 4.2) zabrakło wykresów $w(n)$ okien GMSD i ich widm $W(\lambda)$ dla kilku przykładowych wartości p . Podobnie ma się rzecz z innymi oknami wymienionymi w treści rozprawy, np. oknami I klasy Rife’a-Vincenta (str. 31).
5. Pytanie dotyczy dokładności, z jaką estymowana jest częstotliwość. Na str. 121, na przykład, Autor pisze, że „zastosowanie metody 5pGMSD pozwala na zwiększenie dokładności pomiaru ok. 10 razy w przypadku obecności drugiej harmonicznej w sygnale”. Chodzi o porównanie z prostszą metodą trzypunktową. Jak ważne jest to stwierdzenie z praktycznego punktu widzenia? Jaka jest tolerancja błędu estymacji w konkretnych zastosowaniach?
6. Eksperyment opisany w sekcji 5.6 rozprawy jest bardzo interesujący. Ciekawe byłoby porównanie działania metody 5pGMSD również z metodą dwupunktową. Czy Doktorant przeprowadzał takie badania?
7. Czy podejmowana była próba implementacji w praktycznym systemie, opisanym w podrozdziale 5.6, służącym do estymacji częstotliwości, innych konkurencyjnych metod interpolacji DFT?

Chcę podkreślić, że powyższe uwagi mogą być przedmiotem dyskusji na publicznej obronie i nie mają wpływu na moją zdecydowaną pozytywną opinię o recenzowanej rozprawie.

6. Wnioski końcowe

Uważam, że recenzowana rozprawa stanowi **rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego i potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta**. Rozprawa została przygotowana na dobrym poziomie naukowym i redakcyjnym oraz **wnosi znaczący wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Adama Matusiaka pt. „Estymacja częstotliwości metodami interpolacji widma dla okien czasowych GMSD” zalicza się do kategorii **prac spełniających wymagania** (wg Ustawy - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 10 marca 2023 r., tj. Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) i **wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony**.

Kajetana Snopek

