



RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Szymona Barcentewicza pt. „Metody obliczania fazora dla sygnałów systemu elektroenergetycznego”

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska będąca przedmiotem niniejszej recenzji jest poświęcona zagadnieniom pomiaru fazorów w systemach elektroenergetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki cyfrowego przetwarzania sygnałów. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Krzysztof Duda, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Dariusz Borkowski. Autor pracy przeprowadził liczne analizy porównawcze wybranych metod i ich dokładności w świetle wymagań standardu IEEE Std C37.118.1TM-2011 *IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*. Wybór tematyki rozprawy uważam za trafny i aktualny. Rozprawa dobrze wpisuje się w badania problematyki inteligentnych sieci elektroenergetycznych, w szczególności zagadnień związanych z ich monitoringiem. Pełne wykorzystanie potencjału tego rodzaju systemów wymaga wprowadzenia inteligentnej infrastruktury pomiarowej, co zostało dostrzeżone przez Komisję Europejską (European Commission: „*Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions, smart grids: from innovation to deployment*”, COM (2011), Brussels, 2011, 202 final). Istotną częścią składową obecnej i przyszłej infrastruktury pomiarowej będą również układy do synchronicznego wyznaczania fazorów (Phasor Measurement Unit – PMU), tym bardziej, że ich realizacja niemal nie wymaga istotnych i kosztownych zmian struktury sprzętowej typowych cyfrowych przyrządów do pomiarów charakterystyk energii elektrycznej.

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 79 stron oraz trzy załączniki. Autor nie sformułował tezy rozprawy, natomiast jej cel określił następująco: *synteza wiadomości z zakresu metod obliczania fazora z przykładami jego zastosowania, oraz miarodajne porównanie znanych metod z oryginalnymi metodami autora*. W pracy można wyróżnić trzy zasadnicze części. Pierwsza część (rozdziały 1 i 2) poświęcona jest omówieniu podstawowych pojęć związanych z tematyką rozprawy oraz jej zakładanym celem. Między innymi przedstawiono podstawowe statyczne i dynamiczne modele fazorów oraz postanowienia rozważanego standardu IEEE. W części drugiej (rozdział 3) zaprezentowano wybrane metody wyznaczania fazorów, w tym zaproponowaną przez autora metodę opartą na interpolowanej dyskretnej transformacji Fouriera (DFT) z korekcją przecieku widmowego. Najważniejsza jest część trzecia rozprawy (rozdział 4), w której przedstawiono wyniki badań porównawczych wybranych metod w odniesieniu do wyżej wspomnianego standardu, uwzględniające różne i zmienne charakterystyki sygnałów wejściowych. W szczególności analizowano wpływ: odchyleń częstotliwości od jej wartości nominalnej, liniowych zmian częstotliwości, modulacji amplitudy i fazy składowej podstawowej oraz zawartości harmonicznych drugiego i trzeciego rzędu. Wyniki przedstawiono w formie graficznej oraz tabelarycznej. Przeprowadzone przez autora analizy wykazały, że wśród badanych metod nie

można wskazać rozwiązania rekomendowanego, a na wybór rozwiązania wpływają: cel pomiaru, przyjęte kryterium i charakterystyka sygnału wejściowego. Wydaje się, że wskazuje to na zasadność stosowania kilku rozwiązań jednocześnie i adaptacji algorytmu przetwarzania sygnału do aktualnej charakterystyki wejściowej sygnału badanego.

W załącznikach zawarto:

- omówienie implementacji algorytmu obliczania fazora w układzie sbRIO-9602 z modułem FPGA,
- program obliczania fazora za pomocą autorskiej propozycji (nie określono w jakim środowisku)
- wykaz publikacji autora.

2. Uwagi ogólne

2.1. Mocne strony rozprawy

Moim zdaniem do mocnych stron ocenianej rozprawy doktorskiej można zaliczyć:

- 2.1.1. Propozycję autorskiej metody obliczania fazora opartą na interpolowanej dyskretniej transformacji Fouriera DFT z korekcją przecieku widmowego. Algorytm wykorzystuje oryginalną propozycję Bertocco i Yoshidy interpolowanego DFT, uzupełnioną o korekcję przecieku widmowego od składowej podstawowej o częstotliwości ujemnej oraz harmonicznych, realizowaną w pętli.
- 2.1.2. Zaplanowanie i przeprowadzenie szerokiego programu badań porównawczych wybranych algorytmów, w tym autorskiego, wyżej wspomnianego rozwiązania, oraz algorytmu wykorzystującego okno pomiarowe o płaskiej charakterystyce prążka głównego.

2.2. Słabe strony rozprawy

Niestety, rozprawa posiada również szereg słabszych stron. Najważniejsze z nich to:

- 2.1.1. Zakładanym celem rozprawy była *synteza wiadomości z zakresu metod obliczania fazora*. Zatem czytelnik może oczekiwać dobrze omówionego światowego stanu wiedzy. Niestety, bibliografia rozprawy liczy 56 pozycji, w tym cztery normy, jednak autor skoncentrował się głównie na wymaganiach standardu IEEE Std C37.118.1TM-2011 oraz osiągnięciach zespołu z Akademii Górniczo-Hutniczej (18 pozycji bibliograficznych). Są to osiągnięcia za znaczące, o czym świadczą publikacje w wiodących czasopismach z bazy JCR, jednak uważam, że pełna realizacja zakładanego celu wymagała lepszego omówienia światowego stanu wiedzy. Przykładowo, zagadnienia dotyczące korekcji przecieku widmowego, będącego istotą propozycji autorskiej, omawiane są w licznych publikacjach, w tym również w pracach dotyczących problematyki pomiaru fazorów. Można tu wspomnieć o pracy P. Romano, M. Paolone, „Enhanced Interpolated-DFT for Synchrophasor Estimation in FPGAs: Theory, Implementation, and Validation of a PMU Prototype”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Vol. 63, Issue 12, Dec. 2014, s. 2824 – 2836. Przedstawiono w niej algorytm pomiaru fazora za pomocą interpolowanego DFT. Zastosowano okno Hanninga z kompensacją przecieku widma od składowej podstawowej o częstotliwości ujemnej. Należy jednak dodać, że chociaż zasadnicza idea jest podobna do propozycji autora, to szczegóły rozwiązania są

odmienne. Sądzę, że interesujące byłoby porównanie tego rozwiązania z metodą doktoranta, tym bardziej, że propozycja autorów wyżej wspomnianej pozycji wydaje się mniej złożona obliczeniowo.

2.2.2. W podrozdziale 2.5 autor omawia kryteria oceny algorytmów wyznaczania fazorów, w tym złożoność obliczeniową. Niestety, autor nie podejmuje chociażby próby analizy porównawczej złożoności obliczeniowej badanych metod oraz minimalnych wymagań sprzętowych w kontekście implementacji w układach z DSP lub FPGA.

2.2.3. W rozdziale 4.1. przedstawiono wyniki testów zgodności wg Standardu IEEE C37.118.1. Jednak są one niepełne i nie obejmują skokowej zmiany amplitudy i fazy sygnału wejściowego. Nadto, nie porównano wpływu przyjętej metod na opóźnienie raportowania („Measurement reporting latency compliance”). Oszacowanie wpływu metody na błędy RFE (Rate of change of Frequency Error) ograniczono tylko do testu liniowej zmiany częstotliwości, a dla błędu FE (Frequency Error) pominięto próby dla ustalonych odchyłek częstotliwości podstawowej. Dlaczego? Czy badane metody spełniały wymagania standardu?

2.2.4. Podsumowanie analizy porównawczej badanych metod sprowadza się w zasadzie do krótkich, cząstkowych komentarzy w poszczególnych podrozdziałach, odnoszących się do spełnienia lub nie danego testu zgodności oraz dwóch tabel w podrozdziale 4.1.6. (Tabele 4.1 i 4.2). Konkludując, autor stwierdza jedynie, że „parametry symulacji zostały dobrane w taki sposób, aby można było łatwo porównać właściwości metod”. Moim zdaniem zabrakło pogłębionej syntezy przedstawianych wyników. Dlatego uważam, że podsumowanie jest najłabszą częścią pracy doktorskiej.

3. Uwagi szczegółowe

3.1. Istotnym mankamentem pracy są błędy edycyjne. Nie są one liczne, ale pojawiają się w kluczowych zależnościach matematycznych. Błędy dostrzegłem we wzorach (2.21), (3.23), (3.25), (3.31) i (3.36). Przykładowo, w pracy zdefiniowano R jako (zależność (3.23)):

$$R = \frac{|V[k \max - 1]| - |V[k \max]|}{|V[k \max]| - |V[k \max + 1]|}$$

Powinno być:

$$R = \frac{V[k \max - 1] - V[k \max]}{V[k \max] - V[k \max + 1]}$$

Wyżej wspomniane błędy utrudniają wykonanie poprawnych obliczeń przez czytelnika rozprawy.

3.2. Na stronie 56 autor informuje, że „Sygnał generowany jest zgodnie ze wzorem (1.16)”. Podobnie jest na str. 33, „Wykorzystując model (1.2) fazor dany jest wzorem:”, czy też na stronie 36 „ ω_0 - częstotliwość sygnału sinusoidalnego (1.1)”. W rozprawie nie ma wzorów o takich numeracjach.

3.3. W bibliografii pojawia się luka pomiędzy publikacjami [Dud11c], a [Dud14].

- 3.4. Na str. 39 jest nadmiarowo: „ $p_0=p(0)$, $p_1=p(0)$...”, powinno być tylko $p_0=p(0)$.
- 3.5. W podpisie pod rysunkiem 4.7 znajduje się informacja, że przedstawione są wyniki dla pięciu okresów f_0 . Wydaje się, że są to wyniki dla jednego okresu.
- 3.6. Na rys 4.3 część wyników została zasłonięta przez oznaczenia.
- 3.7. Na rys. 4.7 i 4.11 oznaczono std M = 0.005 i std P = 0.025. Powinno być: std M = 0.025 i std P = 0.005 dla $F_s > 20$ i std M = 0.005 i std P = 0.005 dla $F_s \leq 20$. Analogiczna uwaga dotyczy rysunków 4.9 i 4.13 (std M).
- 3.8. W Tabeli 4.1 pojawiają się oznaczenia „TVE Szum” i „FE Szum”, natomiast w Tabeli 4.2 „TVE OfB” i „FE OfB”. To drugie oznaczenie jest spójne z opisem w punkcie 4.1.3.
- 3.9. Opis implementacji w układzie FPGA jest niepełny. Jaką metodę zaimplementowano? Czy wektor bazowy zawierał liczby „Complex Extended”? Dlaczego częstotliwość próbkowania wynosiła 6,4 kHz, a wyniki w części 4 przedstawiono dla częstotliwości 6,45 kHz?
- 3.10. Omawiając autorską metodę IpDFT_{BY}, autor powołuje się tylko na własną publikację [Bar13] z roku 2013, podczas gdy zależności (3.23), (3.24 i (3.25) pojawiły się we wcześniejszej pracy [Dud11b] z roku 2011 bez udziału autora. Dodatkowo kolejność autorów publikacji [Dud11b] w spisie literatury jest nieprawidłowa.
- 3.11. Rys. 2.7 jest nieczytelny. Jako różnicę modułów oznaczono różnicę pomiędzy modułem estymowanego fazora, a przyprostokątną trójkąta, którego przeciwprostokątną jest moduł wartości teoretycznej.
- 3.12. Wartości S/N na rysunkach 4.38 i 4.39 są niepoprawne.
- 3.13. Rysunek 2.8 nie został przywołany w tekście rozprawy.
- 3.14. Na stronie 25 przywołano wymagania standardu IEEE, dotyczące stanów statycznych (Tabela 2.1). Dlaczego nie przedstawiono odpowiednich danych dla stanów dynamicznych?
- 3.15. W pracy pojawiają się dwa rysunki oznaczone jako 3.10 na stronie 42 i stronie 43.

4. Uwagi dyskusyjne i pytania do doktoranta

- 4.1. Analizy wykonano dla jednego i pięciu okresów. Marginalnie potraktowano wpływ liczby okresów sygnału wejściowego na wyniki pomiarów za pomocą poszczególnych metod. Stwierdzono jedynie, że „Wybranie innych długości często prowadziło do bardzo dużych różnic w działaniu pomiędzy poszczególnymi metodami” oraz „Przy wyborze innej długości sygnału niektóre metody mogły lepiej lub gorzej spełnić wymagania standardu.” Nie wiadomo na czy polegały te różnice i dlaczego wystąpiły. Informacje te mogą mieć istotne znaczenie dla wyboru metody.
- 4.2. Istotą autorskiego algorytmu jest korekcja przecieku widma, w tym przecieku pochodzącego od harmonicznych. W praktyce oznacza to znaczny wzrost złożoności obliczeniowej algorytmu, zależny od liczby uwzględnianych harmonicznych. Biorąc pod uwagę charakterystyki okien pomiarowych, szczególnie istotne będą harmoniczne niskich rzędów. Zwiększając liczbę analizowanych okresów można ograniczyć liczbę uwzględnianych harmonicznych, czy też zmniejszyć błędy estymacji. Jak wynika z rys. 4.6-4.8., wymagania standardu nie są spełnione dla metody IdDFT_{BY} dla drugiej harmonicznej i jednego analizowanego okresu., natomiast są spełnione dla pięciu

okresów. Jaka, zdaniem autora, jest minimalna liczba okresów dla której spełnione będą kryteria związane z TVE i FE? Dlaczego dla jednego okresu wyniki dla DFT są obciążone mniejszym błędem niż dla $IdDFT_{BY}$? Dla jakiego minimalnego rzędu harmonicznej kryteria zostaną spełnione przy analizie dla jednego okresu oraz dla jakiej klasy pomiarowej i dla jakiego zakresu zmian częstotliwości?

- 4.3. Wpływ przecieku widma od harmonicznych będzie zależał od przesunięcia częstotliwości od f_0 , rzędu harmonicznej oraz od kąta przesunięcia fazowego harmonicznej. Czy autor analizował ten ostatni problem? Jakie przyjęto fazy harmonicznych w przypadku badań opisanych w punkcie 4.1.2?
- 4.4. Ostatni etap autorskiego algorytmu to: „Proces korekcji jest zakańczany lub powtarza się algorytm od punktu e)”. Nie wiadomo jakie były kryteria wyjścia z pętli. Ile pętli było wykonywanych i czy istnieje związek pomiędzy charakterystyką sygnału wejściowego a niezbędną liczbą iteracji?
- 4.5. Autor wymiennie posługuje się terminami „złożoność obliczeniowa” i „wydajność obliczeniowa”, definiując to drugie pojęcie, jako: „Wydajność obliczeniową możemy określić przez liczbę operacji podstawowych (np. dodawań, mnożeń) wykonywanych podczas pracy algorytmu.” Moim zdaniem, tego rodzaju definicja powinna odnosić się do złożoności obliczeniowej. Termin „wydajność” z reguły odnosi się do określonej platformy sprzętowej, np. procesora. W przypadku algorytmu można by mówić o wydajności obliczeniowej dla określonej implementacji. Zależy ona od złożoności obliczeniowej, ale również od dostępnej pamięci i czasu dostępu, liczby rejestrów uniwersalnych, realizacji mnożenia (sprzętowe czy też programowe), języka programowania itp.
- 4.5. Na rysunkach 3.10 i 3.11 przedstawiono charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe okna Kaisera dla parametru $\beta=2.5$ i $\beta=4.7$. Natomiast nie podano, które okno wykorzystano w rozdziale czwartym w metodzie WLS. Jakie były kryteria wyboru? Jak zmiana parametru β wpływa na wyniki estymacji i dla jakiej szerokości okna wyrażonej w okresach składowej podstawowej?
- 4.6. Jakie są ograniczenia w stosowaniu okien o płaskiej charakterystyce prążka głównego do analizy fazorów? (Przykładowo liczba okresów).

5. Posumowanie i wniosek końcowy

Pomimo wyżej wskazanych i omówionych uwag krytycznych, uważam, że praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, polegającego na opracowaniu nowej metody pomiaru fazorów, zaplanowaniu i przeprowadzeniu pogłębionych badań i analiz, umożliwiających porównanie znanych metod z metodą zaproponowaną przez autora, a także metodą wykorzystującą okno o płaskiej charakterystyce prążka głównego. O wysokich kompetencjach naukowych doktoranta świadczą liczne artykuły naukowe, w tym trzy współautorskie publikacje w czasopismach umieszczonych w bazie JCR.

Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w obszarze Elektrotechniki, w szczególności cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Podsumowując, uważam, że ocenia rozprawa doktorska spełnia w wystarczającym stopniu wymagania zawarte w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2016 r. poz. 882 i 1311) i wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Tomasz Torasulski

