

Kielce, 14.06.2024 r.

Dr hab. inż. Jerzy Augustyn
Katedra Informatyki, Elektroniki i Elektrotechniki,
Politechnika Świętokrzyska
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7,
25-314 Kielce
email: j.augustyn@tu.kielce.pl

RECENZJA
rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Kamila Kontorskiego
pt.: „Analiza i badanie właściwości cyfrowych
niezrównoważonych komparatorów impedancji”

1. Wstęp

Przedłożona recenzja została opracowana na podstawie Uchwały nr 1097 Senatu Uniwersytetu Zielonogórskiego z dnia 24 kwietnia 2024 roku. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Ryszard Rybski.

2. Opinia o tematyce i zakresie rozprawy

Dokładny pomiar wartości składowych impedancji jest istotnym zadaniem w wielu obszarach nauk inżynieryjno-technicznych. Pośród różnych stosowanych metod pomiarowych, wyróżniają się układy komparacyjne, wykorzystujące metodę bezpośredniego porównania z wzorcami rezystancji, pojemności i indukcyjności. Wynik takiego porównania można określić w układach zrównoważonych lub niezrównoważonych. Istotną cechą tej drugiej grupy układów komparacyjnych jest wykorzystanie zmierzonej wartości sygnału niezrównoważenia do wyznaczenia stosunku porównywanych impedancji. Stosowane współcześnie układy komparatorów impedancji wykorzystują cyfrowe źródła napięć sinusoidalnych (CZNS). Stan równowagi komparatora, określony przez zerowe wskazanie detektora napięcia, uzyskuje się poprzez zmianę nastaw amplitud i faz dwóch CZNS. Stosunek porównywanych impedancji wyznacza się na podstawie wartości nastaw tych źródeł poprzez wyznaczenie wartości zespolonego stosunku napięć (ZSN). W komparatorach niezrównoważonych czas potrzebny do realizacji pomiaru jest znacznie krótszy, a ze względu na wykonywany pomiar napięcia niezrównoważenia, mniejsze są wymagania dotyczące rozdzielczości nastaw CZNS, co pozwala na uproszczenie konstrukcji takiego układu. Uzyskanie w takim komparatorze poziomu niepewności zbliżonego do osiąganego w układach zrównoważonych związane jest jednak ze koniecznością wykonywania bardziej złożonych obliczeń, na podstawie których uzyskuje się wynik komparacji. Wykonywane



podczas komparacji impedancji pomiary zespolonych wartości napięć CŽNS oraz napięcia niezrównoważenia, realizowane są metodami cyfrowego przetwarzania sygnału, na podstawie próbek uzyskanych w układach przetwarzania analogowo-cyfrowego. Dlatego istotnym zagadnieniem jest określenie warunków próbkowania dla zastosowanego algorytmu przetwarzania, umożliwiających uzyskanie wystarczającej niepewności pomiaru ZSN.

Uwzględniając przedstawione wyżej argumenty uważam, że podjęte w recenzowanej pracy doktorskiej badania naukowe, których celem jest:

- *"analiza i badanie dokładności niezrównoważonych komparatorów impedancji z cyfrowym pomiarem zespolonego stosunku napięć",*
- *"analiza dokładności cyfrowego przetwarzania sygnałów i badanie jej wpływu na niepewność komparacji impedancji",*

są aktualne i ważne oraz mają istotne znaczenie teoretyczne i praktyczne w obszarze metrologii elektrycznej.

3. Przegląd i ocena treści rozprawy

Przedstawiona rozprawa, o objętości 134 stron, zawiera 7 rozdziałów zasadniczych, wykaz ważniejszych symboli użytych w pracy oraz bibliografię obejmującą 98 pozycji, obejmujących najważniejsze publikacje odnoszące się do stanu badań w zakresie tematycznym rozprawy.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawia aktualny stan techniki w obszarze komparacji wzorców impedancji, omawia najczęściej stosowane rozwiązania układowe cyfrowych komparatorów impedancji z uwzględnieniem kalibrowanych i niekalibrowanych CŽNS, pokazując potencjalne zalety zastosowania komparatorów niezrównoważonych. Na tej podstawie określa cel pracy oraz formułuje tezę, określając jednocześnie zakres prac niezbędnych do jej udowodnienia. Rozdział kończy omówieniem struktury pracy.

Rozdział drugi, o charakterze przeglądowym, Autor poświęcił przedstawieniu klasyfikacji cyfrowych niezrównoważonych komparatorów impedancji, z uwzględnieniem sposobu pomiaru napięć oraz wyznaczenia stosunku impedancji. Opisał układy pomiarowe realizujące dwie podstawowe metody pomiaru napięć, wykorzystujące technikę sekwencyjnego lub jednoczesnego próbkowania. W punkcie 2.4 omawia wpływ synchronizacji okresu sygnału odtwarzanego przez generator i okresu próbkowania napięć występujących w układzie komparatora na możliwość wykorzystania wybranych algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów do wyznaczenia amplitud i kątów fazowych mierzonych napięć. Z treści tego punktu oraz innych fragmentów pracy wynika, że Autor utożsamia próbkowanie synchroniczne z koherentnym. Takie podejście występuje w wielu publikacjach. Należy jednak zauważyć, że spotykane jest również rozróżnienie tych dwóch pojęć. Poprzez próbkowanie synchroniczne należy rozumieć wykorzystanie wspólnego generatora impulsów taktujących do określenia chwil czasowych związanych z generacją sygnału oraz próbkowaniem napięć w układzie pomiarowym. Natomiast próbkowanie koherentne dotyczy sygnałów okresowych i jest definiowane zależnością: $NT_p = MT$, gdzie N , M są wzajemnie pierwszymi liczbami naturalnymi. Odpowiedni dobór relacji pomiędzy okresem próbkowania T_p a okresem generowanego napięcia sinusoidalnego T umożliwia zwiększenie liczby mierzonych poziomów kwantowania próbkowanego sygnału, co w efekcie może zapewnić wykrycie dodatkowych prążków widma, związanych na przykład z nieliniowością

przetworników a/c i c/a, a także zwiększyć odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi próbkami, co może zmniejszyć potencjalną korelację pomiędzy nimi. W analizie przedstawionej w pracy założono, że N/M jest liczbą całkowitą.

W ostatnim punkcie rozdziału drugiego przedstawiono dwie metody pomiarowe stosowane w komparatorach nie zrównoważonych, różniące się sposobem wykonywania obliczeń stosunku impedancji. Interesująca jest w szczególności zaproponowana przez Autora metoda interpolacji.

Rozdział trzeci zawiera opis modelu matematycznego cyfrowego komparatora nie zrównoważonego, opracowany na podstawie jego schematu elektrycznego. Model uwzględnia istotne źródła niepewności pomiaru, w szczególności impedancje pasożytnicze występujące w przekątnej pomiarowej układu komparatora. Model umożliwił określenie zakresu wartości i rodzaju porównywanych impedancji oraz przeprowadzenie analizy, prowadzącej do uproszczenia podstawowego wzoru wykorzystywanego do wyznaczania składowych zespolonego stosunku komparowanych impedancji, a także niepewności ich pomiaru. W rozdziale zestawiono modele wzorcowych impedancji komparowanych oraz wzory używane do wyznaczenia wartości składowych rzeczywistej i urojonej stosunku impedancji. Ponadto wyprowadzono zależności, umożliwiające oszacowanie złożonej niepewności standardowej pomiaru stosunku składowych dominujących i różnicy lub sumy składowych resztkowych różnych typów komparowanych impedancji. Duży fragment rozdziału został poświęcony analizie niepewności pomiaru składowych zespolonego stosunku napięć, w przypadku gdy do wyznaczenia amplitudy i kąta przesunięcia fazowego wykorzystywane jest Dyskretne Przekształcenie Fouriera. W analizie uwzględniono podstawowe źródła niepewności związane z kwantyzacją, błędem zera i wzmocnienia, zakłóceniami losowymi oraz nieliniowością układu pomiarowego. Kończącym wynikiem przeprowadzonej analizy jest stwierdzenie, że chociaż "niepewność pomiaru stosunku impedancji przy wykorzystaniu komparatora nie zrównoważonego nie może być niższa od niepewności pomiaru stosunku impedancji przy wykorzystaniu komparatora zrównoważonego", to po spełnieniu określonych warunków można w komparatorze nie zrównoważonym uzyskać niepewności pomiaru stosunku impedancji na poziomie porównywalnym z osiąganym w układzie komparatora zrównoważonego.

W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki badań symulacyjnych określających wpływ wartości napięcia nie zrównoważenia oraz impedancji pasożytniczych, a także błędów pomiaru tych wielkości na dokładność wyznaczenia stosunku impedancji w cyfrowym komparatorze nie zrównoważonym. Ponadto metodą symulacyjną zbadano niepewność pomiaru stosunku składowych dominujących oraz różnicy składowych resztkowych impedancji wzorcowych w zależności od stopnia nie zrównoważenia układu, niepewności pomiaru składowych poszczególnych ZSN oraz pojemności pasożytniczych. Zbadano również wpływ częstotliwości generowanych napięć sinusoidalnych na dokładność pomiaru składowych stosunku impedancji. W celu weryfikacji zasadności wprowadzonej w rozdziale trzecim uproszczonej zależności służącej do oszacowania niepewności pomiaru ZSN z wykorzystaniem przekształcenia DFT, przeprowadzono porównawcze badania symulacyjne zależności uproszczonej z wzorem analitycznym.

Rozdział piąty zawiera wyniki badań eksperymentalnych dwóch wybranych cyfrowych nie zrównoważonych komparatorów impedancji: układu wykorzystującego do generacji i próbkowania sygnałów występujących w układzie kartę akwizycji danych oraz układu, w którym do pomiaru napięcia nie zrównoważenia zastosowano woltomierz fazoczuły. Dodatkowo zamieszczono wyniki pomiarów dla komparatora zrównoważonego. Pomiar

przeprowadzono dla stosunku impedancji typu R-R, C-C oraz R-C, różnych kombinacji wartości komparowanych wzorców oraz dla różnych częstotliwości pomiarowych. Zamieszczono również oszacowanie niepewności uzyskanych wyników. Otrzymane wyniki zostały dodatkowo zweryfikowane poprzez badania z wykorzystaniem wzorców impedancji, których parametry zostały wyznaczone podczas procesu wzorcowania w Głównym Urzędzie Miar. Wyniki badań eksperymentalnych są zbieżne z rezultatami badań symulacyjnych i potwierdzają możliwość osiągnięcia wartości niepewności pomiaru stosunku impedancji w cyfrowym komparatorze nie zrównoważonym na poziomie osiągalnym przy wykorzystaniu cyfrowego komparatora zrównoważonego.

Uzupełnieniem pracy jest rozdział szósty, w którym Autor analizuje możliwość wykorzystania metody interpolacji w nie zrównoważonym komparatorze cyfrowym. Przedstawiono dwie metody doboru nastaw CŽNS, wyrażenia określające niepewność pomiaru oraz wyniki badań eksperymentalnych, przeprowadzonych przy wykorzystaniu układów pomiarowych, opisanych w rozdziale piątym.

Rozdział siódmy jest podsumowaniem dokonań Doktoranta - przedstawieniem efektów jego pracy, uzyskanych oryginalnych osiągnięć oraz wniosków z przeprowadzonych badań teoretycznych i eksperymentalnych.

Załączona bibliografia zawiera najistotniejsze pozycje z zakresu komparacji wzorców impedancji, w tym również Autora rozprawy. Na podkreślenie zasługują dwie publikacje w renomowanych czasopismach z listy JCR, pierwszym autorem jednej z nich jest mgr inż. Kamil Kontorski. Zawierają one częściowe wyniki badań przeprowadzonych w ramach jego rozprawy doktorskiej.

Przedstawiona do recenzji rozprawa została napisana na wysokim poziomie merytorycznym. Doktorant poprawnie sformułował ważny problem naukowy i zaprezentował poprawne jego rozwiązanie, uzyskane przez Autora samodzielnie i z zastosowaniem właściwej metodologii naukowej. Z przedstawionego omówienia treści rozprawy doktorskiej wynika wysoka umiejętność formułowania problemów badawczych oraz ich efektywnego rozwiązywania, przy wykorzystaniu wiedzy z zakresu metrologii, teorii obwodów, modelowania i badań symulacyjnych oraz umiejętności przeprowadzania złożonych badań eksperymentalnych.

4. Oryginalne osiągnięcia

Podczas realizacji zaplanowanych celów badawczych Doktorant uzyskał szereg oryginalnych osiągnięć naukowych, wśród których można wymienić:

1. Opracowanie klasyfikacji cyfrowych nie zrównoważonych komparatorów impedancji ze względu na sposób pomiaru napięć i wyznaczenia stosunku impedancji,
2. Opracowanie zależności określających niepewność pomiaru składowych stosunku impedancji różnego typu oraz niepewność pomiaru stosunku składowych dominujących i różnicy lub sumy składowych resztkowych komparowanych impedancji różnego typu,
3. Opracowanie zależności określających niepewność pomiaru ZSN z wykorzystaniem Dyskretnego Przekształcenia Fouriera, przy uwzględnieniu błędów kwantyzacji i błędów liniowości toru pomiarowego oraz zewnętrznych zakłóceń,
4. Analizę i badania symulacyjne wpływu impedancji pasożytniczych i dokładności ich pomiaru na dokładność komparacji w cyfrowym nie zrównoważonym komparatorze impedancji,

5. Przeprowadzenie badań symulacyjnych wpływu m.in. niepewności pomiaru składowych względnego napięcia niezrównoważenia i pojemności pasożytniczych na dokładność pomiaru składowych stosunku impedancji różnego typu,
6. Opracowanie modeli fizycznych dwóch układów cyfrowych niezrównoważonych komparatorów impedancji oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych pomiaru stosunku impedancji różnych typów i porównanie uzyskanych wyników z otrzymanymi w układzie komparatora zrównoważonego,
7. Opracowanie zależności określających niepewność pomiaru składowych stosunku impedancji typu R-R, C-C i R-C przy wykorzystaniu metody interpolacji w cyfrowym niezrównoważonym komparatorze impedancji,
8. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych z wykorzystaniem metody interpolacji przy wykorzystaniu dwóch cyfrowych niezrównoważonych komparatorów impedancji i porównanie uzyskanych wyników z otrzymanymi w układzie komparatora zrównoważonego,
9. Opracowanie budżetów niepewności wyników pomiarów otrzymanych w układach klasycznych komparatorów niezrównoważonych oraz komparatorów, w których wykorzystywana jest metoda interpolacji.

Mając na uwadze wyżej wymienione oryginalne osiągnięcia naukowe uważam, że Pan mgr inż. Kamil Kontorski zrealizował założone cele badawcze oraz uzasadnił słuszność sformułowanej tezy. Ponadto wykazał się umiejętnościami samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych z wykorzystaniem właściwych metod badawczych i na poziomie naukowym odpowiadającym wymaganiom przy realizacji rozpraw doktorskich w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych.

5. Uwagi i komentarze

Przy zachowaniu wysokiej oceny całości rozprawy, jej lektura nasuwa kilka uwag o charakterze ogólnym i szczegółowym:

- 1) Uwzględniając uwagi zawarte w punkcie 3 recenzji, wydaje się, że analiza przeprowadzona w rozdziale 3 rozprawy zyskałaby na ogólności po zastosowaniu ogólnej postaci warunku próbkowania koherentnego. Również ograniczenie na liczbę próbek zawarte w rozdziale 4 na stronie 73: "Literą M oznaczona liczba próbek zebranych synchronicznie w jednym okresie każdego z dwóch sygnałów mierzonych. W praktyce liczba ta musi być na odpowiednio niskim poziomie, aby założenia o niezależności między błędami kolejnych próbek były spełnione", można byłoby znacząco zredukować.
- 2) Na stronie 20 pracy, analizując warunki stosowalności metody sekwencyjnego próbkowania, Autor formułuje ograniczenie: "W przypadku, kiedy próbkowanie jest synchroniczne, odstęp czasowy między chwilami rozpoczęcia pobierania dyskretnych wartości poszczególnych napięć powinien odpowiadać okresowi sygnałów odtwarzanych". Warunek ten nie jest konieczny, jeżeli znany jest odstęp czasowy pomiędzy chwilami rozpoczęcia pobierania próbek poszczególnych napięć.
- 3) Zależności (2.3-4) mają charakter przybliżony poza przypadkami gdy ZSN zasilających i względnego napięcia niezrównoważenia jest równy 1. Analogiczna uwaga dotyczy zależności (2.7-8).
- 4) W objaśnieniach pod nienumerowanymi wzorami na stronach 21, 24 i 26, Autor nazywa błędy względne zamiennie współczynnikami odwzorowującymi



błąd/nieidealność toru analogowego, co utrudnia zrozumienie toku jego rozumowania.

- 5) Nienumerowana zależność zamieszczona w pracy na stronie 35, otrzymana zdaniem Autora w wyniku przekształcenia wzoru (3.4), zawiera błąd w zapisie.
- 6) Omawiając zależności (3.25-6) przedstawiające sygnały na wyjściu toru analogowego w postaci splotu analogowych sygnałów poddawanych pomiarowi i odpowiedzi impulsowej toru analogowego, Autor pisze, że "Przyjęte jest natomiast oczywiste założenie, że opisywany jest układ stabilny". W tym miejscu istotne byłoby założenie dotyczące liniowości toru analogowego, co w kontekście dalej prowadzonej analizy dotyczącej błędów liniowości nie zawsze jest ściśle spełnione.
- 7) W komentarzu do wzorów (3.39-40) na stronie 49, dotyczącym składników powiązanych z błędami liniowości we wzorach opisujących Dyskretne Przekształcenie Fouriera, Autor zawarł, wymagające szerszego wyjaśnienia, zdanie: "Dla przetworników z kompensacją wagową (taką metodę konwersji przyjęto w analizie), błędy te odznaczają się przybliżonymi wartościami dla próbek cechujących się tym samym kątem fazowym w kolejnych okresach sygnału mierzonego".
- 8) W analizie przeprowadzonej w punkcie 3.6 przyjęto zastosowanie przetworników a/c z kompensacją wagową. Czy wyniki tej analizy pozostaną aktualne dla, stosowanych w ostatnich latach coraz powszechniej, przetworników realizujących konwersję metodą sigma-delta?
- 9) W ostatnim zdaniu punktu 4.5 Autor pisze: "Bardzo zbliżone przebiegi do tych przedstawionych na rys. 2.23-26 zostały otrzymane dla symulacji wykonanych przy założeniu, że wartość kąta przesunięcia fazowego między napięciami próbkowanymi wynosi $\pi/2$ ". Tymczasem w Tabeli 4.4 zawierającej wartości wielkości przyjętych do symulacji, wyniki których przedstawiono na tych rysunkach, wartość przesunięcia fazowego wynosi właśnie $\pi/2$. Cytowane zdanie wymaga komentarza.
- 10) W wielu miejscach pracy Autor zamiennie używa określeń: niedokładność, dokładność pomiaru, poziom, czy błąd, w odniesieniu do granic przedziału charakteryzującego rozproszenie wyniku względem nieznannej wartości prawdziwej. Jeżeli podawana jest przy tym wartość liczbowa takich granic, bardziej poprawne jest użycie terminu niepewność.
- 11) Zależność (4.1) opisująca zespolony błąd pomiaru stosunku impedancji, jest niezgodna z ogólnie przyjętą definicją błędu pomiaru jako różnicy pomiędzy wartością wielkości zmierzonej, a wartością prawdziwą.
- 12) Wzór (5.2) przedstawiający możliwość wyznaczenia wartości pojemności pasożytniczej jako średniej arytmetycznej wyników dwóch pomiarów pojemności podano bez uzasadnienia. Przyjęty sposób oszacowania wartości pojemności pasożytniczej nie jest oczywisty i wymaga szerszego wyjaśnienia.

W tekście pracy występują również nieliczne uchybienia redakcyjne. Najbardziej istotne z nich wyszczególniono poniżej:

- 1) Na stronie 20 Autor w niefortunny sposób opisał możliwość stłumienia sygnałów występujących w kanałach sąsiadujących z kanałem aktualnie próbkowanym: " W pracy [19] został opisany przełącznik, przy wykorzystaniu którego istnieje możliwość stłumienia sygnałów występujących na kanałach sąsiadujących do kanału aktualnie próbkowanego".



- 2) Zmiana kolejności wyrazów w zamieszczonym na stronie 28 zdaniu: "Wśród metod obejmujących dokładny pomiar, stałych w czasie wartości amplitud i kątów przesunięć fazowych harmonicznych podstawowych sygnałów okresowych próbkowanych niesynchronicznie można wyróżnić dwie często spotykane grupy w czasopiśmie naukowych." wypaczyła jego sens.
- 3) Sens zdania na stronie 83: "Tablica z próbkami jest wysyłana do pamięci karty. Próbkę przed odtworzeniem są dyskretyzowane w dziedzinie wartości." jest niejasny. Czy w pamięci karty nie są zawarte próbki dyskretne?
- 4) Zmiana kolejności wyrazów w zamieszczonym na stronie 84 zdaniu: "Po skończeniu pobierania karta przesyła dane do programu, które są zachowywane do dalszych obliczeń." wypaczyła jego sens.
- 5) W zdaniu zawartym na stronie 101 Autor zastosował niefortunne sformułowanie: "Analizując zależności (6.4-5) można dojść do następującego wniosku, który jest także zaletą metody interpolacji...".

Wyżej wyszczególnione uwagi, częściowo dyskusyjne, nie ujmują i nie podważają w niczym wyniku wysokiej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej.

6. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Zaprezentowana w niej analiza teoretyczna, wyniki badań symulacyjnych i pomiarów, potwierdzają ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w obszarze dyscypliny naukowej elektrotechnika, która zgodnie z obowiązującą klasyfikacją dyscyplin wchodzi w zakres dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Doktorant wykazał się również dużymi umiejętnościami w zakresie analizy układów pomiarowych dużych dokładności i realizacji złożonych badań eksperymentalnych oraz wiedzą i doświadczeniem w zakresie wykorzystania współczesnych technik pomiarowych i narzędzi informatycznych, potwierdzając umiejętność samodzielnego rozwiązywania złożonych problemów badawczych na poziomie naukowym odpowiadającym rozprawom doktorskim w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Oceny tej nie podważają przedstawione uwagi i komentarze.

Opiniowana praca doktorska spełnia zatem wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 859), oraz zgodnie z Ustawą z 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r. poz. 742 ze zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, wnosząc o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Jerzy Augustyn