

Gliwice, 15. lipca 2024 r.

prof. dr hab. inż. Marian Kampik
Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki
Wydział Elektryczny
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 10
44-100 Gliwice
tel. 32 237 1241
email: marian.kampik@polsl.pl

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Kamila Kontorskiego
pt. „Analiza i badanie właściwości cyfrowych niezerównoważonych komparatorów impedancji”**

1. Wstęp

Przedłożona recenzja została opracowana na zlecenie Senatu Uniwersytetu Zielonogórskiego (Uchwała nr 1097 z dnia 24 kwietnia 2024). Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Ryszard Rybski.

2. Opinia o tematyce i zakresie rozprawy

Najstarszymi układami, wykorzystywanymi do pomiaru impedancji elektrycznej są mostki czteroramienne. Ich równoważenie polega na zmianie wartości nastaw pasywnych elementów występujących w ramionach układu. Przypadku mostków o ekstremalnie dużej precyzji są to zazwyczaj elementy o silnym sprzężeniu magnetycznym. Właściwości metrologiczne tych układów są dość dobrze poznane i opisane w literaturze. Niestety mostki tego rodzaju są zazwyczaj przystosowane są do pomiaru tylko impedancji o jednym określonym charakterze (rodzaju) i w relatywnie niewielkim przedziale częstotliwości. Kolejnymi wadami tych układów są ich skomplikowana budowa oraz problemy z automatyzacją pomiarów, co sprawia, że obsługa tych układów wymaga odpowiednio wykwalifikowanego personelu. Z powyższych powodów mostki czteroramienne są coraz częściej zastępowane przez cyfrowe komparatory impedancji. W ramionach stosunkowych tych układów występują cyfrowe źródła napięcia sinusoidalnego (CŻNS), wytwarzające napięcia sinusoidalne o dużej stabilności ich zespolonego stosunku napięć oraz o odpowiedniej rozdzielczości nastawy amplitud i przesunięcia fazy. Cyfrowe komparatory impedancji można ogólnie podzielić na komparatory zrównoważone, w których napięcie nierównowagi sprowadzane jest do zera przez odpowiedni dobór amplitud i przesunięcia fazy CŻNS, oraz na komparatory niezrównoważone, w których napięcie nierównowagi nie jest sprowadzone do zera, lecz mierzone z odpowiednio dużą dokładnością. W porównaniu z komparatorami zrównoważonymi, komparatory niezrównoważone posiadają dwie ważne zalety. Do pierwszej z nich zaliczyć można istotne skrócenie czasu pomiaru, ponieważ nie jest wymagane sprowadzenie układu do stanu równowagi. Procedura pomiaru wygląda następująco: komparator jest najpierw częściowo równoważony, występujące w przekątnej napięcie niezrównoważenia jest mierzone,

a następnie - na jego podstawie - oblicza się wynik porównania. Drugą zaletą jest brak potrzeby stosowania cyfrowych źródła napięcia sinusoidalnego (CZNS) o dużej rozdzielczości nastawy amplitud i przesunięcia fazowego. Wadą komparatorów nie zrównoważonych jest zwiększenie złożoności równań matematycznych, opisujących te układy. Ponadto uzyskanie wyniku pomiaru o dokładności zbliżonej do dokładności wyniku otrzymanego za pomocą komparatora zrównoważonego, wymaga nie tylko pomiaru napięcia niezrównoważenia, ale również wyznaczenia, z odpowiednią dokładnością, wartości impedancji pasożytniczych. Autor rozprawy proponuje rozwiązanie tego problemu poprzez zastosowanie metody interpolacji, która wymaga nieco bardziej skomplikowanej procedury pomiarowej.

Uważam, iż tematyka rozprawy jest aktualna i posiada istotne znaczenie z punktu widzenia naukowego i technicznego.

Przyjęty w pracy sposób rozwiązania problemu, obejmujący, między innymi, opracowanie, zastosowanie i zbadanie metody interpolacji w zastosowaniu do niezrównoważonego komparatora impedancji sprawia, iż praca posiada duży walor aplikacyjny i stanowi istotny wkład w rozwój metrologii, w tym zwłaszcza w rozwój mostkowych metod pomiaru impedancji.

3. Przegląd i ocena treści rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska, o objętości 134 stron, zawiera w kolejności: spis treści, spis symboli użytych w pracy, wstęp, pięć zasadniczych rozdziałów, dyskusję, podsumowanie oraz bibliografię zawierającą 98 pozycji literaturowych.

W rozdziale wstępnym, po wprowadzeniu do tematyki pracy, Autor przedstawia jej tezę oraz strukturę.

Rozdział drugi zawiera ogólny przegląd właściwości cyfrowych niezrównoważonych komparatorów impedancji. Doktorant dokonuje w nim podziału tych urządzeń ze względu na metodę pomiaru napięć oraz ze względu na sposób wyznaczenia stosunku impedancji. W odniesieniu do metod pomiaru napięć, Autor opisuje metody sekwencyjnego i jednoczesnego próbkowania oraz układy pomiarowe, za pomocą których są one wykonywane. Następnie omawiane są techniki próbkowania synchronicznego i niesynchronicznego oraz związane z nimi algorytmy i metody wykorzystywane do wyznaczenia amplitudy i kąta przesunięcia fazowego próbkowanych napięć. W dalszej kolejności opisane są dwie metody pomiarowe, różniące się sposobem wykonywania obliczeń stosunku impedancji: klasyczna oraz metoda interpolacji, zaproponowana przez Autora.

W rozdziale trzecim Autor zaprezentował strukturę i matematyczny opis cyfrowego niezrównoważonego komparatora impedancji, uwzględniającego wpływ impedancji pasożytniczych na dokładność pomiaru stosunku impedancji. Następnie przedstawione zostały właściwości metrologiczne zaprezentowanego układu, uwzględniające rodzaj porównywanych impedancji i zakresy ich wartości. W dalszej kolejności Doktorant wyprowadza uproszczoną zależność, umożliwiającą wyznaczenie obu składowych stosunku impedancji, w oparciu o którą przeprowadzona jest również analiza niepewności pomiaru składowych tego stosunku. Następnie Autor przedstawia modele komparowanych impedancji, na podstawie których wyprowadza zależności, umożliwiające oszacowanie niepewności pomiaru stosunku składowych dominujących i różnicy lub sumy składowych resztkowych porównywanych impedancji o różnym charakterze. W dalszym ciągu rozdziału Autor dokonuje analizy niepewności pomiaru składowych zespolonego stosunku napięć (ZSN) przy wykorzystaniu do wyznaczenia amplitudy i kąta przesunięcia fazowego Dyskretnego Przekształcenia Fouriera (*Discret Fourier Transform, DFT*). Analiza ta uwzględnia m.in. błędy kwantyzacji i liniowości układu pomiarowego. Zaprezentowane w

rozdziale zależności matematyczne pozwoliły na określenie warunków pomiaru, wymaganych do osiągnięcia niepewności pomiaru stosunku impedancji, porównywanym z niepewnością uzyskiwaną przy wykorzystaniu układu komparatora zrównoważonego. Zaprezentowane przez Doktoranta w rozdziale trzecim zależności są wykorzystywane są w dalszym ciągu pracy do wyznaczenia niepewności pomiarów stosunku impedancji, zmierzonych za pomocą układów eksperymentalnych.

W rozdziale czwartym na wstępie przedstawione są wyniki badań symulacyjnych, których celem było określenie wpływu nieuwzględnionych w obliczeniach pojemności pasożytniczych na błąd pomiaru wartości modułu stosunku impedancji o dowolnym charakterze. Następnie przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, których celem było określenie wpływu błędu pomiaru wartości pojemności pasożytniczych na błąd pomiaru wartości modułu stosunku impedancji o dowolnym charakterze. W dalszej kolejności opisano badania symulacyjne, których celem było określenie wpływu niepewności pomiaru składowych względnego napięcia niezrównoważenia i pojemności pasożytniczych na dokładność pomiaru składowych stosunku impedancji dla różnych częstotliwości napięć, odtwarzanych przez cyfrowe źródło napięcia sinusoidalnego. Wykorzystane w obliczeniach wartości napięć, pojemności pasożytniczych i częstotliwości pomiarowych otrzymano przy wykorzystaniu eksperymentalnych układów pomiarowych, opisanych w rozdziale piątym rozprawy. W końcowej części rozdziału zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych niepewności wyników pomiaru składowych rzeczywistej i urojonej ZSN, wyznaczonych przy wykorzystaniu przekształcenia DFT. Rozdział zamyka porównanie wyników badań symulacyjnych oraz z zależności, wyprowadzonych w rozdziale trzecim.

W rozdziale piątym zawarto opis badań eksperymentalnych wybranych układów cyfrowych niezrównoważonych komparatorów impedancji. Celem tych badań było potwierdzenie wyników przeprowadzonych wcześniej badań symulacyjnych i analiz i tym samym udowodnienie tezy rozprawy. W rozdziale tym zaprezentowano układy dwóch fizycznych modeli komparatorów, a następnie wyniki pomiarów stosunku impedancji dwóch rezystancji (R-R), dwóch pojemności (C-C) oraz rezystancji z pojemnością (R-C) dla różnych wartości składowych komparowanych impedancji i przy różnych częstotliwościach pomiarowych. Zamieszczone w rozdziale wykresy przedstawiają wyniki pomiarów wartości stosunku składowych dominujących oraz różnic składowych resztkowych, otrzymanych przy wykorzystaniu komparatorów niezrównoważonych i komparatora zrównoważonego. Uzyskane wyniki pomiarów porównano z wynikami badań symulacyjnych, a następnie w postaci graficznej zaprezentowano niepewności pomiaru dla wybranych typów komparowanych impedancji. Na końcu rozdziału zamieszczono odpowiedź na pytanie, czy niezrównoważony komparator impedancji zapewnia dokładność pomiaru stosunku impedancji osiągalną przy zastosowaniu komparatora zrównoważonego.

W rozdziale szóstym Autor zawarł opis zaproponowanej przez siebie metody interpolacji w pomiarach realizowanych przy wykorzystaniu cyfrowego niezrównoważonego komparatora impedancji. Rozdział ten zawiera analizę dokładności pomiaru składowych stosunku impedancji o różnym charakterze, w tym wyprowadzenie wzorów na niepewność pomiaru składowych stosunku impedancji typu R-R, C-C oraz R-C. Przedstawione zostały dwie metody doboru nastaw CŽNS oraz omówione ich właściwości. Wyniki pomiarów składowych stosunku impedancji różnego typu i dla różnych częstotliwości pomiarowych zostały porównane z wynikami uzyskanymi przy wykorzystaniu zrównoważonego komparatora impedancji. Podane są również oszacowania niepewności wyników pomiaru wybranych typów komparowanych impedancji. Rozdział zamykają wnioski dotyczące dokładności pomiaru stosunku impedancji przy wykorzystaniu zaproponowanej przez Doktoranta metody w odniesieniu do dokładności wyników pomiaru wykonanych komparatorem zrównoważonym.

Ostatni, siódmy rozdział jest podsumowaniem rozprawy doktorskiej. Opisano w nim wkład własny Doktoranta oraz zarysowano przyszłe plany i kierunki dalszych badań.

Oceniając merytorycznie całą rozprawę stwierdzam, iż jest ona napisana na dobrym poziomie. Zawiera właściwie sformułowany i ważny problem naukowo-techniczny i prezentuje jego poprawne rozwiązanie, które Doktorant uzyskał samodzielnie i z zastosowaniem poprawnej metodologii naukowej.

Z przedstawionego omówienia treści całej rozprawy doktorskiej wynika, że jej Autor wykazał się dobrymi umiejętnościami formułowania problemów naukowo-badawczych oraz ich efektywnego rozwiązywania.

4. Oryginalne osiągnięcia

Autor rozprawy opracował model matematyczny cyfrowego niezrównoważonego komparatora impedancji z pomiarem zespolonego stosunku napięć, umożliwiający badanie właściwości metrologicznych układu, w tym m.in. przeprowadzenie symulacyjnych badań wpływu najważniejszych źródeł błędów na dokładność porównania oraz wyprowadzenie wzorów, umożliwiających oszacowanie niepewności pomiaru składowych stosunku impedancji typu R-R, C-C i R-C. Doktorant dokonał analizy niepewności pomiaru zespolonego stosunku napięć metodą próbkowania synchronicznego z wykorzystaniem dyskretnego przekształcenia Fouriera (DFT), uwzględniając m.in. wpływ błędów kwantyzacji, błędów liniowości toru pomiarowego oraz zewnętrznych zakłóceń. Ponadto Doktorant zaproponował wykorzystanie metody interpolacji w procesie równoważenia komparatora. Ta część pracy obejmuje m.in. opracowanie sposobu doboru nastaw cyfrowych źródeł napięć sinusoidalnych oraz analizę niepewności pomiaru składowych impedancji.

Do oryginalnych osiągnięć naukowych Autora rozprawy zaliczyć można w szczególności:

- 1) sklasyfikowanie cyfrowych niezrównoważonych komparatorów impedancji ze względu na metodę pomiaru napięć i sposobu wyznaczenia stosunku impedancji na ich podstawie,
- 2) wyprowadzenie zależności wykorzystywanych do określenia niepewności pomiaru składowych stosunku impedancji o różnym charakterze,
- 3) analizę niepewności pomiaru stosunku składowych dominujących i różnicy lub sumy składowych reszkowych porównywanych impedancji o różnym charakterze,
- 4) sformułowanie zależności, wykorzystywanych do określenia niepewności pomiaru ZSN przy próbkowaniu synchronicznym z wykorzystaniem DFT przy uwzględnieniu m.in. błędów kwantyzacji i błędów liniowości toru pomiarowego oraz zewnętrznych zakłóceń,
- 5) wyprowadzenie wzorów opisujących niepewność pomiaru składowych stosunku impedancji typu R-R, C-C i R-C przy wykorzystaniu metody interpolacji w cyfrowym niezrównoważonym komparatorze impedancji,
- 6) dokonanie analizy i wykonanie badań symulacyjnych wpływu impedancji pasożytniczych i dokładności ich pomiaru na dokładność porównania, realizowanego za pomocą cyfrowego niezrównoważonego komparatora impedancji,
- 7) przeprowadzenie badań symulacyjnych wpływu niepewności pomiaru składowych względnego napięcia niezrównoważenia i pojemności pasożytniczych na dokładność pomiaru składowych stosunku impedancji o różnym charakterze;
- 8) zbudowanie prototypów dwóch układów cyfrowych niezrównoważonych komparatorów impedancji oraz wykonanie badań eksperymentalnych z ich wykorzystaniem, polegających na:

- a) pomiarze stosunku impedancji różnych typów i porównanie wyników z tymi, które zostały otrzymane za pomocą komparatora zrównoważonego,
 - b) zastosowaniu proponowanej przez Autora metody interpolacji i porównanie uzyskanych wyników z wynikami, które zostały otrzymane przy wykorzystaniu komparatora zrównoważonego;
- 9) opracowanie sposobu doboru nastaw CŽNS przy wykorzystaniu metody interpolacji w cyfrowym niezrównoważonym komparatorze impedancji;
- 10) opracowanie budżetów niepewności dla wyników pomiarów, otrzymanych za pomocą klasycznych komparatorów niezrównoważonych oraz dla komparatorów wykorzystujących metodę interpolacji.

Mając na uwadze wyżej wymienione oryginalne osiągnięcia naukowe i techniczne uważam, że Doktorant zrealizował założony cel badawczy oraz uzasadnił słuszność sformułowanej tezy. Ponadto wykazał się umiejętnością samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych z wykorzystaniem właściwych metod badawczych i na poziomie naukowym odpowiadającym wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim z obszaru nauk technicznych.

5. Uwagi i komentarze

Zachowując dobrą ocenę całej rozprawy doktorskiej można sformułować następujące uwagi natury ogólnej i szczegółowej:

1. Komparator, którego model matematyczny przedstawiono w rozprawie, może być wykorzystywany do porównań impedancji o wartościach modułów rzędu 10... 100 k Ω . Wyprowadzone na podstawie tego modelu zależności mogą posłużyć m.in. do oszacowania niepewności pomiaru stosunku impedancji o różnym charakterze (R, C, L). Zależności te wyprowadzono przy założeniu, że wartość względnego napięcia niezrównoważenia będzie mniejsza od około 1 mV/V, co jest uzasadnione w przypadku pomiarów dokładnych. Czy przedstawione w pracy wzory pozwalają na porównywalnie dokładne wyznaczenie wartości stosunku porównywanych impedancji oraz oszacowanie niepewności pomiaru tego stosunku w przypadku, gdy wartość względnego napięcia niezrównoważenia będzie większa od 1 mV/V?
2. Zaprezentowany w pracy model matematyczny cyfrowego komparatora impedancji umożliwia modelowanie i badanie jego właściwości przy częstotliwości nie większej od ok. 10 kHz. Czy dla wyższych częstotliwości model nie będzie bardziej skomplikowany od zaproponowanego w rozprawie? W pracy nie przedstawiono propozycji rozbudowy wspomnianego modelu w sposób umożliwiający wyznaczenia wartości stosunku porównywanych impedancji oraz oszacowanie niepewności pomiaru tego stosunku przy wyższych częstotliwościach. O jakie główne elementy należało by ten model rozbudować?
3. Badania eksperymentalne zrealizowane w pracy przeprowadzono przy wykorzystaniu dwóch układów pomiarowych, różniących się sposobem pomiaru napięcia niezrównoważenia. W pierwszym z nich do pomiaru tego napięcia wykorzystywana jest próbkująca karta akwizycji danych, natomiast w drugim woltomierz typu lock-in. W tym drugim przypadku nie ma możliwości oszacowania niepewności pomiaru z zastosowaniem wzorów wyprowadzonych w pracy ze względu na to, że próbki napięcia niezrównoważenia nie są dostępne. Jaką metodę, umożliwiającą pełniejsze zweryfikowanie poprawności zaproponowanego sposobu szacowania niepewności, zaproponowałby Doktorant w tym drugim przypadku?

4. W pracy wyprowadzone zostały wzory, na podstawie których można oszacować wartość i niepewność pomiaru stosunku porównywanych impedancji, kiedy jedna z nich ma charakter indukcyjny. Poprawność tych wzorów nie została zweryfikowana doświadczalnie. Prosiłbym o podanie powodu oraz o odpowiedź na pytanie, czy takie pomiary są trudniejsze do wykonania.

W pracy zauważyłem drobne błędy o charakterze edytorskim, głównie tzw. „literówki”. Jednak ogólnie rozprawa jest starannie opracowana pod względem redakcyjnym i napisana poprawną polszczyzną.

Uwagi wyszczególnione w recenzji, częściowo dyskusyjne, nie ujmują i nie podważają w niczym wyniku pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej.

6. Podsumowanie

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Zaprezentowane w niej wyniki badań potwierdzają ogólną wiedzę Doktoranta w dyscyplinie naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne oraz duże umiejętności w zakresie analizy układów pomiarowych i realizacji złożonych badań eksperymentalnych. Autor rozprawy wykazał się również 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 z dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych. Oceny tej nie podważają przedstawione uwagi i komentarze.

Uwzględniając wyżej wymienione uwagi i komentarze oraz całość rozprawy doktorskiej wraz z oryginalnymi osiągnięciami naukowo-badawczymi stwierdzam, że:

1. Opiniowana praca doktorska spełnia 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. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. - Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.
2. Wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.



Signed by /
Podpisano przez:

Marian Paweł
Kampik
Politechnika Śląska

Date / Data: 2024-
07-16 18:43