

prof. dr hab. inż. Ryszard Rybski
Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki
Uniwersytet Zielonogórski
ul. prof. Z. Szafrana 2
65-516 Zielona Góra
email: r.rybski@imei.uz.zgora.pl

Zielona Góra, 16 sierpnia 2024 r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

wpłynęło dnia 21.08.2024

nr zał.

RECENZJA
rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Łukasza Drózdza
pt. „Analiza metrologiczna algorytmów dyskretnej transformacji falkowej”

1. Wstęp

Przedłożona recenzja została opracowana na podstawie Uchwały nr 39/2024 Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej z dnia 21 maja 2024 r. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Jerzy Roj, prof. PŚ.

2. Opinia o tematyce i zakresie rozprawy

Współczesna realizacja cyfrowych pomiarów wielkości analogowych polega na zamianie (przetworzeniu) analogowej wielkości mierzonej na postać cyfrową i wyznaczeniu wartości wielkości mierzonej poprzez cyfrowe przetwarzanie próbek reprezentujących mierzoną wielkość, zgodnie z odpowiednim algorytmem. Operacja przetwarzania analogowo-cyfrowego realizowana jest przez przetwornik analogowo-cyfrowy (A/C). Przy czym dąży się do struktury, w której przetwornik A/C umieszczony jest na wejściu toru pomiarowego. W ten sposób ogranicza się do niezbędnego minimum analogową część toru pomiarowego eliminując w ten sposób wiele nieuniknionych niedoskonałości analogowych układów przetwarzania sygnałów. Tak zarysowana tendencja, w której coraz większą rolę w procesie pomiarowym odgrywają metody i algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów (DSP) ujawniła się w pełni już w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku wraz z upowszechnieniem się komputerów osobistych, komercyjnych kart modułów pomiarowych oraz oprogramowania użytkowego, umożliwiających w stosunkowo prosty sposób zestawianie systemów pomiarowych o bardzo dobrych właściwościach metrologicznych. Obserwowany w ostatnich latach dynamiczny rozwój mikrokontrolerów, zwiększenie stopnia integracji oraz możliwości obliczeniowych tych układów utrwalił i upowszechnił tę tendencję. Opisywane podejście, korzystne również ze względu na niższy koszt oraz łatwiejszy proces projektowania systemu powoduje, że relatywnie łatwiejsze staje się wykorzystywanie różnego rodzaju algorytmów przetwarzania danych.

Dobrze znanymi i powszechnie stosowanymi w cyfrowej technice pomiarowej narzędziami do analizy sygnałów w dziedzinie częstotliwości są algorytmy bazujące na dyskretnym przekształceniu Fouriera (DFT). Algorytmy te nie pozwalają jednak na identyfikację zdarzeń w dziedzinie czasu. Z tego m.in. powodu rozwijane i coraz częściej w praktyce stosowane są metody analizy czasowo-częstotliwościowej opartej na dyskretnym przekształceniu falkowym (DWT). Ze względu na możliwość analizy sygnału jednocześnie w dziedzinie częstotliwości oraz w dziedzinie czasu, algorytmy transformacji falkowej są

wykorzystywane w wielu dziedzinach, np. w diagnostyce medycznej – do analizy sygnału EEG, w technice związanej z przetwarzaniem obrazu i dźwięku, w diagnostyce maszyn, w wykrywaniu i identyfikacji zdarzeń w systemach elektroenergetycznych czy wreszcie w technice pomiarowej do poprawy stosunku sygnału do szumu.

Ważnym i stosunkowo trudnym zagadnieniem jest ocena dokładności cyfrowych pomiarów, realizowanych z zastosowaniem złożonych algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów. Ogólnie rzecz ujmując, ocena ich dokładności musi uwzględniać błędy związane z samym torem pomiarowym i ich propagacją przez wykorzystywane algorytmy DSP, jak i błędy własne tych algorytmów. Standardowym podejściem w ocenie dokładności pomiarów jest wykorzystanie Przewodnika JCGM (*Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. JCGM, 2008*), zawierającego zbiór zaleceń dotyczących wyrażania niedokładności wyników pomiarów przez określenie ich niepewności. Zalecenia te, oparte na koncepcji probabilistycznej, są na tyle ogólne, że obejmują znaczącą większość sytuacji pomiarowych, ale przez tę ogólność nie pozwalają na jednoznaczne rozstrzygnięcie każdej wątpliwości w pomiarach złożonych, a z taką sytuacją mamy do czynienia w przypadku cyfrowych pomiarów z zastosowaniem metod algorytmicznych. Faktem potwierdzającym trudność oceny niepewności pomiarów złożonych w klasycznym analitycznym ujęciu opartym na prawie propagacji niepewności było oficjalne uznanie metody Monte Carlo jako alternatywnego sposobu wyznaczania niepewności.

Nawiązując już bezpośrednio do tematyki rozprawy, koncentrującej się na ocenie właściwości metrologicznych algorytmów dyskretnej transformacji falkowej należy stwierdzić, na podstawie analizy dostępnej literatury przedmiotu, że brak jest jednolitej i uniwersalnej metody pozwalającej oszacować niepewność wyników pomiarów realizowanych w torze pomiarowym wykorzystującym algorytmy dyskretnej transformacji i falkowej.

Uwzględniając przedstawione wyżej argumenty uważam, że podjęte w recenzowanej pracy doktorskiej badania naukowe, których celem jest opracowanie jednolitej i uniwersalnej metody szacowania niepewności wyników pomiarów wykonywanych przez tor pomiarowy wykorzystujący algorytmy dyskretnej transformacji falkowej, i którego realizacja wymaga udowodnienia postawionej w pracy następującej tezy (str. 3 pracy): „*Stosując przedstawiony w pracy model błędów oraz zaproponowaną metodę szacowania wypadkowej wartości niepewności rozszerzonej istnieje możliwość oszacowania wartości niepewności rozszerzonych dla wielkości wyjściowych toru pomiarowego wykorzystującego algorytm dyskretnej transformacji falkowej. Oszacowanie wartości niepewności rozszerzonych dla omawianych wielkości jest możliwe w trakcie działania systemu pomiarowego, również w przypadku zmiany parametrów pracy tego systemu oraz zmiany parametrów modelu błędów.*” są aktualne i ważne oraz mają istotne znaczenie poznawcze i praktyczne dla nauk w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

3. Przegląd i ocena treści rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska w części merytorycznej liczy 179 stron numerowanych i obejmuje w kolejności: spis treści, wykaz oznaczeń, streszczenie w języku polskim, sześć rozdziałów, w tym wstęp i podsumowanie zawierające wnioski z całej pracy. Kończy pracę wykaz cytowanej literatury, który obejmuje 102 pozycje.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym: „Wstęp do pracy” przedstawiono motywację podjętych w ramach rozprawy badań, podkreślając rolę jaką we współczesnych systemach pomiarowych odgrywa

stosowanie algorytmicznych metod pomiarowych, w tym zwłaszcza wykorzystujących algorytmy dyskretnej transformacji falkowej oraz złożoność problematyki oceny niepewności pomiaru w takich systemach pomiarowych. Następnie przedstawiono tezę pracy (podaję ją w części drugiej recenzji) oraz zakres pracy, który przytaczam poniżej za Autorem, ponieważ definiuje on pośrednio, w powiązaniu z tezą pracy, cel pracy. Praca obejmuje:

- definicję modelu błędów opisującego właściwości metrologiczne toru pomiarowego,
- opis metody wyznaczania wypadkowej wartości niepewności rozszerzonej,
- wskazanie właściwości metrologicznych algorytmów transformacji falkowej,
- przedstawienie przykładu aplikacji opisanej w pracy metody analizy,
- symulacyjną i pomiarową weryfikację skuteczności przedstawionej metody.

Uwzględniając przedstawiony wyżej zakres badań można przyjąć, że głównym celem pracy jest opracowanie metody analizy właściwości metrologicznych toru pomiarowego z algorytmem transformacji falkowej, w tym zwłaszcza oceny jego dokładności pomiaru poprzez oszacowanie niepewności rozszerzonej, w oparciu o zaproponowany model błędów charakteryzujących poszczególne elementy tego toru.

Rozdział drugi poświęcony jest modelowi błędów wyników pomiaru. Przedstawione w tym rozdziale definicje, założenia, analiza właściwości metrologicznych typowego toru pomiarowego oraz jej wyniki mają kluczowe znaczenie dla samej rozprawy jak również dla jej oceny, ponieważ zawierają oryginalne wyniki badań Autora. Przyjmując stosunkowo szeroki zakres analizowanych w rozdziale zagadnień Autor wyjaśnia, że wprawdzie tematykę pracy stanowi analiza właściwości metrologicznych algorytmów dyskretnej transformacji falkowej, jednak przedstawienie modelu błędów toru pomiarowego stanowiącego źródło danych dla tego algorytmu jest konieczne, ze względu na określenie jego udziału w procesie przetwarzania danych pomiarowych. Dalej Autor stwierdza, powołując się na swoje wcześniejsze publikacje, że w wielu przypadkach algorytmy te przetwarzają jedynie sygnały błędów zawarte w wielkościach wejściowych, a wprowadzane przez nie błędy własne są pomijalnie małe. W tej sytuacji rola poszczególnych elementów toru pomiarowego, stanowiących źródło przetwarzanych przez analizowany algorytm danych jest kluczowa w ocenie właściwości metrologicznych całości toru pomiarowego. Charakteryzując zagadnienia zawarte w tym bardzo obszernym rozdziale, skoncentruję się na podaniu podstawowych założeń związanych z budową modelu błędów oraz na uzyskanych wynikach. Analizowany tor pomiarowy ma typową strukturę, tzn. składa się z kaskadowo połączonych trzech bloków funkcjonalnych: analogowego, analogowo-cyfrowego i cyfrowego. Ze względu na możliwą zależność właściwości kolejnych elementów toru pomiarowego od widma przetwarzanego sygnału, analizę omawianego toru prowadzona jest w dziedzinie częstotliwości. Każda z omawianych części, poza odpowiednio wyrażoną transmitancją, charakteryzuje się związaną z nią statyczną charakterystyką przetwarzania. Taki opis wykorzystywany jest do oddzielnego analizowania właściwości statycznych i dynamicznych poszczególnych elementów toru pomiarowego. Stworzony przy podanych założeniach model błędów stanowi podstawę do oceny dokładności pomiaru, tzn. oszacowania niepewności rozszerzonej wyników pomiarów. Najbardziej uniwersalnym sposobem na wyznaczenie wypadkowej wartości niepewności rozszerzonej jest, w ogólnym przypadku, metoda Monte-Carlo. Metoda ta wymaga jednak przeprowadzenia wielu iteracji procesu uzyskiwania wartości realizacji analizowanego sygnału błędu i ze względu na czas obliczeń nie może być stosowana do bieżącej oceny właściwości metrologicznych toru pomiarowego, którego parametry zmieniać się będą w czasie – a takie założenie przyjęto formułując cel i tezę pracy. Alternatywę dla metody Monte-Carlo mogą stanowić opisywane, w cytowanej w rozprawie literaturze, metody analityczne. Metody te są jednak skomplikowane i zastosowanie ich dla

zaproponowanego modelu błędów byłoby mniej efektywne niż zastosowanie metody redukcyjnej arytmetyki interwałowej. W związku z tym w dalszej części rozdziału Autor przedstawia własne oryginalne podejście zastosowania wyżej wymienionej metody do oszacowania niepewności rozszerzonej pomiaru, w oparciu o zaproponowany model błędu toru pomiarowego.

Rozdział trzeci poświęcony jest w całości algorytmowi transformacji falkowej. Kolejno charakteryzowany jest algorytm ciągłej transformacji falkowej, dyskretnej transformacji falkowej i jego postać macierzowa, która - podobnie jak w przypadku innych algorytmów przetwarzających ciągi danych, upraszcza problem skomplikowanej analizy ich dokładności. Ponadto postać ta daje możliwość analizy właściwości metrologicznych algorytmu zgodnie z metodą przedstawioną w poprzednim rozdziale tzn. z zastosowaniem modelu błędów zaproponowanego do opisu części cyfrowej toru pomiarowego. Uwzględniając wymienione założenia dalej w rozdziale analizuje się problem propagacji błędów przez algorytm DWT oraz jego błędy własne. W oparciu o wyniki tej analizy stawiana jest hipoteza dotycząca sygnałów błędów własnych wielkości wyjściowych algorytmów dyskretnej transformacji falkowej, która mówi, że w praktyce pomiarowej sygnały te nie będą istotne z punktu widzenia właściwości metrologicznych analizowanych algorytmów. Hipoteza ta uzasadniana jest faktem, że odpowiednio dobrana długość słowa dla liczb zmiennoprzecinkowych powinna pozwolić na uzyskanie odpowiednio małych wartości niepewności rozszerzonych związanych z sygnałami błędu własnego w stosunku do wartości niepewności rozszerzonych związanych z pozostałymi sygnałami błędów. W podsumowaniu rozdziału Autor podkreśla, co było już sygnalizowane we wstępie do rozprawy, że wszystkie przedstawione w rozdziale informacje dotyczące algorytmów transformacji falkowej stanowią podsumowanie rozważań zawartych w literaturze. Osiągnięciem Autora jest natomiast wskazanie istotnych, z punktu widzenia analizy właściwości metrologicznych torów pomiarowych, cech tych algorytmów, a także zaproponowanie jednolitej metody opisu miary niedokładności wyznaczania wartości realizacji ich wielkości wyjściowych. Zaproponowane w pracy podejście do analizy właściwości metrologicznych algorytmów transformacji falkowej oraz wskazanie roli tych algorytmów w procesie propagacji sygnałów błędów ich wielkości wyjściowych nie było dotychczas przedstawione w literaturze.

Rozdział czwarty poświęcony jest w całości weryfikacji postawionej tezy metodą symulacji komputerowych. Przedmiotem badań jest przykładowy tor pomiarowy składający się z wejściowego przetwornika analogowego, wzmacniacza pomiarowego dopasowującego poziom sygnału na wyjściu przetwornika wejściowego do zakresu przetwarzania przetwornika analogowo-cyfrowego, który jest kolejnym elementem toru oraz części cyfrowej przetwarzającej sygnał wyjściowy przetwornika A/C, zgodnie z algorytmem dyskretnej przekształcenia falkowego. Planując i realizując eksperyment symulacyjny przyjęto, że przetwarzanemu wejściowemu sygnałowi użytecznemu towarzyszy szum biały o stałej widmowej gęstości mocy. Przyjęto, że właściwości dynamiczne zarówno przetwornika wejściowego jak i wzmacniacz opisane są przez pasmo ograniczone przez górną częstotliwość graniczną. Natomiast ich właściwości statyczne określone są przez liniową charakterystykę przetwarzania, przy czym w przypadku charakterystyki przetwornika wejściowego uwzględniono dodatkowo błąd nieliniowości. Założono również, że uwzględniony zostanie temperaturowy dryft zera obydwu elementów. Ponadto przyjęto, że zastosowany przetwornik analogowo-cyfrowy wprowadza do sygnału wyjściowego jedynie błąd związany z kwantowaniem przetwarzanej wielkości, natomiast algorytm transformacji falkowej wprowadza do wielkości wyjściowych błąd własny związany z wykonywaniem operacji arytmetycznych. Podczas badań na wejście toru pomiarowego podawano sygnał poliharmoniczny o częstotliwości harmonicznej podstawowej 1 kHz. Wyniki badań uzyskane za pomocą zaproponowanego w rozprawie modelu błędów porównywano z wynikami uzyskanymi metodą Monte-Carlo, stosując 100 000 powtórzeń procesu wyznaczenia wartości wielkości wyjściowej. Dla każdego z badanych elementów toru wyznaczono budżet

niepewności jego wielkości wyjściowej. Jako miarę oceny wyników eksperymentu przyjęto błąd względny oszacowania wartości niepewności rozszerzonej uzyskany przy użyciu metody redukcyjnej arytmetyki interwałowej, odniesiony do wartości niepewności rozszerzonej wyznaczonej metodą Monte-Carlo. Wyniki eksperymentów potwierdziły poprawność zaproponowanego w rozprawie modelu błędów oraz skuteczność stosowanej metody redukcyjnej arytmetyki interwałowej. We wszystkich przeprowadzonych eksperymentach wartość błędu względnego oszacowania wartości wypadkowej niepewności rozszerzonej nie przekraczała wartości 5 %, co zgodnie z przyjętym na wstępie pracy założeniem potwierdza poprawność opracowanego modelu szacowania niepewności.

W rozdziale piątym przedstawiono wyniki badań doświadczalnych właściwości metrologicznych toru pomiarowego, zbudowanego przez Autora w celu weryfikacji eksperymentalnej opracowanej w ramach rozprawy metody szacowania niepewności. Tor składa się z wejściowego wzmacniacza napięciowego oraz mikrokontrolera z rodziny STM, który realizuje konwersję analogowo-cyfrową oraz algorytm dyskretnej transformacji falkowej, z wykorzystaniem instrukcji „DSP” dostępnych dla zastosowanego mikrokontrolera. Ważnym etapem przeprowadzonego eksperymentu była identyfikacja parametrów toru pomiarowego niezbędnych do zweryfikowania opracowanej metody. Parametry te wyznaczono wykorzystując zarówno dane katalogowe producentów elementów zastosowanych w torze pomiarowym, jak i przyrządów pomiarowych wykorzystanych w przeprowadzonych pomiarach. Szczegółowo opracowane i przeanalizowane wyniki badań eksperymentalnych porównano z wynikami otrzymanymi z wykorzystaniem metody Monte-Carlo. Mimo, że przyjęte odnośnie zastosowanego modelu błędów parametry pozwoliły na wyznaczenie niepewności wielkości wejściowych algorytmu dyskretnej transformacji falkowej z błędem na poziomie $\pm 5\%$, względny błąd oszacowania wartości niepewności wielkości wyjściowych algorytmu okazał się znacznie większy. Tę rozbieżność wyjaśnia się właściwościami częstotliwościowymi algorytmu DWT, które mogą powodować, że pewne sygnały błędów, w zależności od ich charakterystyki widmowej, mogą być wzmacniane a inne – tłumione. W podsumowaniu rozdziału Autor stwierdza, że celem przeprowadzonego eksperymentu było jedynie potwierdzenie zawartej w pracy tezy odnośnie wpływu dokładności wyznaczania parametrów modelu błędów na dokładność szacowania wartości wypadkowej niepewności rozszerzonej dla analizowanego toru pomiarowego.

Rozprawę zamyka rozdział 6 - podsumowanie, w którym Autor formułuje najważniejsze wnioski potwierdzające udowodnienie postawionej tezy, podkreśla oryginalne osiągnięcia oraz wskazuje na kierunki dalszych badań.

Zamieszczony na końcu rozprawy wykaz cytowanej literatury obejmuje pozycje o bardzo różnicowanym charakterze (artykuły naukowe, w tym 6, których współautorem jest Autor rozprawy, monografie, podręczniki, noty katalogowe i aplikacyjne). Wykaz zawiera pozycje reprezentatywne dla aktualnego stanu wiedzy i obejmuje najnowsze osiągnięcia, co świadczy o szerokiej wiedzy Autora z zakresu merytorycznego rozprawy oraz reprezentowanej dyscypliny.

Dokonując merytorycznej oceny całej rozprawy stwierdzam, że jest ona napisana na dobrym poziomie. Zawiera właściwie sformułowany i ważny problem naukowy oraz prezentuje poprawne rozwiązanie tego problemu, które zostało uzyskane przez Autora samodzielnie i z zastosowaniem odpowiedniej metodologii naukowej. Na podstawie przedstawionego omówienia treści całej rozprawy doktorskiej należy odnotować, że jej Autor wykazał się umiejętnościami formułowania problemów naukowo-badawczych oraz ich efektywnego rozwiązywania, wykorzystując przy tym wiedzę z zakresu metrologii, cyfrowego przetwarzania sygnałów, modelowania oraz badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

4. Oryginalne osiągnięcia

Udowadniając sformułowaną tezę oraz realizując wyznaczone cele badawcze, Autor rozprawy uzyskał kilka oryginalnych wyników naukowych, do których między innymi zaliczam:

1. Opracowanie jednolitego modelu błędów toru pomiarowego, umożliwiającego opis właściwości sygnałów błędów, zarówno o charakterze deterministycznym, jak i losowym. Zaproponowany model może być stosowany zarówno do opisu właściwości części analogowej, jak i cyfrowej toru pomiarowego, przy czym kolejne elementy tego toru przedstawiane są w postaci obiektów, opisanych za pomocą zaproponowanego modelu.
2. Opracowanie modelu błędów algorytmu dyskretnej transformacji falkowej, umożliwiającego wyznaczanie parametrów sygnałów błędów na jego wyjściu oraz uwzględnienie sygnałów błędów własnych algorytmu. Przy czym ważną zaletą zaproponowanego modelu jest fakt, że jego parametry mogą być określone analitycznie oraz eksperymentalnie, z wykorzystaniem istniejących implementacji algorytmu. Takie podejście powoduje, że użytkownik algorytmu nie musi być ekspertem w dziedzinie transformacji falkowej, aby stosować zaproponowany model.
3. Opracowanie metody wyznaczania wartości wypadkowej niepewności rozszerzonej w sposób alternatywny dla opisanego w Przewodniku JCGM. Zaproponowana w rozprawie metoda, bazująca na redukcyjnej arytmetyce interwałowej, została zmodyfikowana w stosunku do znanej z literatury i dotychczas stosowanej metody w sposób, który umożliwia uzyskanie istotnie dokładniejszych wyników. Dotychczas oryginalna metoda stosowana była tylko i wyłącznie podczas analizy budżetu niepewności algorytmów przetwarzających ciągi danych, natomiast w pracy zaproponowano jej znacznie szersze zastosowanie. Metoda cechuje się bardzo dobrym kompromisem pomiędzy stopniem skomplikowania obliczeń oraz dokładnością uzyskiwanych wyników
4. Opracowanie oraz realizacja badań symulacyjnych i doświadczalnych, które pozwoliły zweryfikować zaproponowany w pracy model błędów toru pomiarowego, którego wielkości wyjściowe wyznaczone są z wykorzystaniem algorytmu dyskretnej transformacji falkowej i tym samym potwierdzić postawioną w pracy tezę. Należy podkreślić, że na potrzeby przeprowadzenia wymienionych badań symulacyjnych i doświadczalnych stworzony został prototyp toru pomiarowego, którego właściwości opisano stosując zaproponowany model błędów.

Oryginalność wymienionych osiągnięć potwierdza fakt, że dotychczas w literaturze nie zaproponowano modelu błędów algorytmu transformacji falkowej. Dostępne publikacje, poruszające problem niepewności wielkości wyjściowych tych algorytmów skupiają się na pojedynczej rodzinie falek, przez co proponowana w nich metoda nie znajduje bezpośredniego zastosowania w praktyce pomiarowej. Dodatkowo metody te wymagają od projektanta toru pomiarowego specjalistycznej wiedzy na temat właściwości stosowanego algorytmu. W związku z powyższym, analiza właściwości metrologicznych torów pomiarowych stosujących omawiane algorytmy jest pomijana.

Mając na uwadze wyżej wymienione oryginalne osiągnięcia naukowe uważam, że Pan mgr inż. Łukasz Drózdź zrealizował założony cel badawczy 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 z nauk inżynierjno-technicznych.

5. Uwagi i komentarze

Podtrzymując pozytywną ocenę całej rozprawy doktorskiej można jednak sformułować następujące uwagi natury ogólnej i szczegółowej:

1. W rozprawie zaproponowano metodę szacowania wypadkowej niepewności rozszerzonej w oparciu o redukcyjną arytmetykę interwałową, nie wskazano jednak w sposób bezpośredni motywacji dla stosowania tej metody w miejsce stosowanego najczęściej podejścia zaproponowanego w Przewodniku JCGM.
2. Autor w rozprawie wskazuje, że zaproponowana metoda szacowania wypadkowej niepewności rozszerzonej może być stosowana dla dowolnego poziomu ufności, przy czym w pracy stosowany jest wyłącznie poziom ufności 95%. Jak można wyjaśnić tę sytuację ?
3. W pracy nie poruszono szczegółowo zagadnienia, w którym analizowane sygnały błędów są ze sobą skorelowane, natomiast nie występuje pełna korelacja tych sygnałów, jak również przypadku sygnałów błędów o niesymetrycznym rozkładzie wartości ich realizacji i niezerowej wartości oczekiwanej. Nasuwa się wobec tego pytanie, czy również w wymienionych sytuacjach zaproponowana metoda może być wykorzystana ?
4. Podczas pomiarowej weryfikacji tezy pracy parametry statyczne badanego toru pomiarowego zostały wyznaczone z wystarczającą dla zaplanowanego eksperymentu dokładnością – zastosowano odpowiedni kalibrator i multimetr. Właściwości dynamiczne wyznaczono znacznie mniej dokładnie, stosując generator przebiegów sinusoidalnych i oscyloskop, co miało istotny wpływ na uzyskaną stosunkowo dużą wartość względnego błędu oszacowania wartości niepewności wielkości wyjściowych algorytmu. Czy w zaistniałej sytuacji nie należało dokładniej zidentyfikować parametrów charakteryzujących właściwości dynamiczne toru pomiarowego?
5. W pracy zauważono kilka nieprecyzyjnych określeń, błędów i pomyłek. Do istotniejszych można zaliczyć:
 - a) W tezie pracy (cytuję tu jej fragment): „*Stosując przedstawiony w pracy model błędów oraz zaproponowaną metodę szacowania wypadkowej wartości niepewności rozszerzonej ...*” pojawia się ważne dla całości rozprawy określenie „wypadkowa wartość niepewności rozszerzonej”. Niestety, w pracy Autor nie stosuje konsekwentnie tego określenia. Np. na stronach 30, 31, 124, 125 stosowane jest określenie „wartość wypadkowej niepewności rozszerzonej”. Te dwa pojęcia nie są tożsame, a treść rozprawy wskazuje, że powinno być stosowane drugie z wymienionych określeń.
 - b) W rozprawie Autor posługuje się określeniem „wzmacniacz pomiarowy”, zarówno w części poświęconej badaniom symulacyjnym, opisując budowę i analizując właściwości metrologiczne przykładowego toru pomiarowego, jak również w rozdziale poświęconym badaniom eksperymentalnym, analizując właściwości zbudowanego toru pomiarowego z wejściowym wzmacniaczem napięciowym. Należy przyjąć, że określenie „wzmacniacz pomiarowy” jest w pracy stosowane ze względu na funkcję jaką spełnia ten wzmacniacz w ww. analizach. Natomiast określenie „wzmacniacz pomiarowy” (lub instrumentalny) w technice przetwarzania sygnałów pomiarowych oznacza specjalnie wykonany wzmacniacz do zadań pomiarowych, często o dość złożonej strukturze, w skład której wchodzi kilka wzmacniaczy operacyjnych. Zastosowany w opracowanym przez Autora torze pomiarowym wzmacniacz jest wzmacniaczem operacyjnym ogólnego przeznaczenia.
 - c) W wielu miejscach pracy (np. str. 167) Autor używa określeń „dokładność”, „dokładność pomiaru”, przy czym pojęcia te używane są łącznie z podaniem wymiaru liczbowego. Pojęcia te mają wyłącznie charakter jakościowy, natomiast miarą, którą należy w taki przypadku stosować jest „błąd” lub „niepewność”.
 - d) Na str. 75 jest następujący fragment zdania „... na wejście filtru podawane są różne numery

próbek wielkości wejściowych ...”, powinno być raczej „... na wejście filtra podawane są próbki wielkości wejściowych o różnych numerach ...”.

- e) Na str. 78, w odniesieniu do charakterystyki przetwarzania przetwornika pomiarowego użyto niezręcznego określenia: „charakterystyka nie jest idealnie liniowa”. Autor miał zapewne na myśli charakterystykę z założenia liniową, natomiast obarczoną błędem nieliniowości.
- f) Zauważono następujące błędy literowe: str. 5 wiersz 1 od góry "liściowej oceny niedokładności", powinno być "ilościowej oceny niedokładności "; str. 46 wiersz 17 od góry "sygnały wpływające na dokładność", powinno być "sygnały wpływające na dokładność ", str. 50 wiersz 3 od góry "pod kątem możliwości", powinno być "pod kątem możliwości", str. 66, wiersz 8 od góry "do druga wartość jest odrzucana", powinno być "co druga wartość jest odrzucana", str. 68, wiersz 13 od dołu „wcześniejszej część rozdziału”, powinno być „wcześniejszej części rozdziału”, str. 76, wiersz 8 od góry „stosują transformacje falkową”, powinno być „stosują transformację falkową”, str. 77, wiersz 12 od góry „metoda Monet-Carlo”, powinno być „metoda Monte-Carlo”, str. 76, wiersz 4 od dołu jest $e_{s,s}(t)$, powinno być $e_{s,d}(t)$, str. 166, wiersz 8 od dołu „przeprowadzono aproksymacje charakterystyki”, powinno być „przeprowadzono aproksymację charakterystyki”.

Praca pod względem redakcyjnym jest poprawnie opracowana, zawiera niewielką liczbę tzw. błędów literowych, które mają pomijalny wpływ na prezentowane w pracy treści.

Wyżej wyszczególnione w recenzji uwagi, 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. Przedstawione w niej analizy teoretyczne, wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych potwierdzają ogólną wiedzę Doktoranta w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz duże umiejętności w zakresie analizy układów pomiarowych wykorzystujących algorytmiczne metody pomiarowe oraz realizacji złożonych badań symulacyjnych i doświadczalnych. 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 inżynierijno-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:

Recenzowana rozprawa spełnia kryteria stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Łukasza Drózdza do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.