

Kielce, 14.08.2024 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

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Biuro Rady Dyscypliny  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne  
wpłynęło dnia 23.08.2024  
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 roku. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Jerzy Roj, prof. PŚ.

**2. Opinia o tematyce i zakresie rozprawy**

Analiza właściwości metrologicznych współczesnych systemów przetwarzania sygnałów pomiarowych, zawierających w swojej strukturze zarówno przetwarzanie sygnałów analogowych, jak również złożone algorytmy przetwarzania próbkowanych wartości chwilowych tych sygnałów, jest ważnym zagadnieniem w wielu obszarach zastosowań takich układów. Powszechnie używaną miarą oceny dokładności wyniku pomiaru jest niepewność standardowa, związana z oszacowaniem odchylenia standardowego poszczególnych źródeł niepewności pomiaru. Ze względu na zróżnicowany charakter błędów wpływających na końcowy wynik pomiaru, ostateczna ocena niepewności musi uwzględniać ponadto typ rozkładów prawdopodobieństwa związanych z poszczególnymi źródłami błędów, ich wzajemne skorelowanie, jak również wpływ właściwości poszczególnych elementów toru pomiarowego na charakterystyki propagowanych błędów. W takich sytuacjach zalecaną procedurą szacowania niepewności pomiaru jest probabilistyczna metoda Monte Carlo, polegająca na próbkowaniu przestrzeni rozwiązań dla losowo określonych danych wejściowych. Ze względu na wymaganą dużą liczbę iteracji, metoda ta jest czasochłonna, zwłaszcza dla złożonych torów pomiarowych, w których występuje wiele źródeł błędów. Uwzględniając przedstawione wyżej argumenty uważam, że podjęte w recenzowanej pracy doktorskiej badania naukowe, których celem jest opracowanie:



- jednolitego modelu błędów umożliwiającego ilościowy opis wypadkowego sygnału błędu na wyjściu toru pomiarowego, zawierającego w swej strukturze algorytm cyfrowego przetwarzania sygnału,
  - metody o niskiej złożoności obliczeniowej szacowania wypadkowej wartości niepewności rozszerzonej, zapewniającej możliwość jej zastosowania w czasie rzeczywistym, również w przypadku zmiany parametrów modelu błędów,
  - metody analizy właściwości metrologicznych algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów na przykładzie dyskretnej transformacji falkowej (DWT),
- 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 179 stron, zawiera 6 rozdziałów zasadniczych, wykaz ważniejszych symboli użytych w pracy oraz bibliografię obejmującą 102 pozycje, w tym najważniejsze publikacje odnoszące się do stanu badań w zakresie tematycznym rozprawy.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawia aktualny stan techniki w obszarze szacowania niepewności wyznaczania wartości wielkości wyjściowych toru pomiarowego, proponowany sposób podejścia do tego zagadnienia, uwzględniający z jednej strony ograniczenia metody Monte Carlo, a z drugiej dopuszczalną rozbieżność oszacowania niepewności rozszerzonej w porównaniu z tą metodą, nie przekraczającą 5%. Doktorant ogranicza zakres pracy do analizy sygnałów błędów o zerowej wartości oczekiwanej i symetrycznej względem osi rzędnych postaci funkcji gęstości prawdopodobieństwa, wskazując jednocześnie na możliwość uogólnienia analizy na przypadki sygnałów błędów o niesymetrycznym kształcie związanych z nimi funkcji gęstości prawdopodobieństwa. W rozdziale pierwszym została również sformułowana teza pracy, uwzględniająca przedstawione motywacje, oraz omówiona struktura rozprawy.

Rozdział drugi Autor poświęcił przedstawieniu zaproponowanego modelu błędów dla kolejnych elementów toru pomiarowego, związanych z przetwarzaniem analogowym, analogowo-cyfrowym i cyfrowym. Przeprowadził klasyfikację błędów występujących w torze pomiarowym, uwzględniającą jego właściwości statyczne i dynamiczne, podając sposób szacowania ich wariancji. Istotną z punktu widzenia, opartej na arytmetyce interwałowej, proponowanej metody szacowania wypadkowej wartości niepewności rozszerzonej, analizę metody wyznaczania wartości współczynników koherencji, zawarł w punkcie 2.4 rozprawy. Autor zaproponował algorytm umożliwiający wyznaczenie wartości współczynników kształtu dla par sygnałów o typowych postaciach funkcji gęstości prawdopodobieństwa oraz współczynnik korekcyjny, uwzględniający dysproporcje pomiędzy wartościami niepewności rozszerzonych związanych z tymi sygnałami. Po uwzględnieniu dodatkowo korekty wynikającej z centralnego twierdzenia granicznego, zaproponował zależność (2.100) umożliwiającą oszacowanie wartości współczynników koherencji, niezbędnych do wyznaczenia wypadkowej wartości niepewności rozszerzonej. Ważną dla całościowego opisu błędów występujących w torze pomiarowym jest, przeprowadzona w punkcie 2.5 pracy, analiza błędów algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów, których działanie można opisać macierzą transformacji.

Rozdział trzeci zawiera przegląd literatury, zestawiający informacje dotyczące właściwości metrologicznych wybranych algorytmów transformacji falkowej, istotne z



punktu widzenia możliwości wykorzystania zaproponowanego modelu błędów. Autor rozprawy, na przykładzie algorytmu Malata, przedstawił proces dekompozycji i rekonstrukcji sygnału dyskretnej transformacji falkowej, jako proces filtracji, wykorzystujący banki filtrów o skończonej odpowiedzi impulsowej. Wnioskiem z analizy błędów algorytmu DWT, jest możliwość pominięcia jego błędów własnych, związanych z zaokrągleniem wyników obliczeń, w przypadku wykorzystania liczb zmiennoprzecinkowych o odpowiednio dobranej długości słowa.

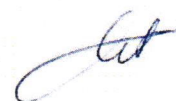
W obszernym rozdziale czwartym przedstawiono wyniki badań symulacyjnych weryfikujących skuteczność zaproponowanej metody szacowania niepewności rozszerzonych wielkości wyjściowych toru pomiarowego, w którym wykorzystywany jest algorytm DWT. Autor przedstawia założenia dotyczące parametrów sygnału wejściowego oraz poszczególnych bloków funkcjonalnych, realizujących przetwarzanie analogowe (przetwornik pomiarowy, wzmacniacz napięcia), przetwarzanie analogowo-cyfrowe oraz algorytm DWT. Następnie opisuje związki pomiędzy zidentyfikowanymi źródłami błędów i wykorzystując zaproponowaną metodę redukcyjnej arytmetyki interwałowej, dokonuje oszacowania wartości niepewności rozszerzonych wielkości wyjściowych algorytmu DWT, porównując uzyskane wyniki z otrzymanymi metodą Monte Carlo. Uzyskana zbieżność wartości oszacowanych niepewności wyznaczonych tymi metodami jest potwierdzeniem poprawności zaproponowanego modelu błędów oraz przyjętej metody szacowania niepewności.

Rozdział piąty zawiera wyniki badań eksperymentalnych zbudowanego toru pomiarowego, w którym do przetwarzania analogowo-cyfrowego oraz implementacji algorytmu DWT wykorzystano mikrokontroler STM32F411, a źródłem sygnału wejściowego był generator przebiegów arbitralnych. Na podstawie dostępnych w dokumentacjach producentów danych zostały zidentyfikowane właściwości elementów toru pomiarowego, opracowano model jego błędów i wyznaczono wartości niepewności rozszerzonej dla wybranej wielkości wyjściowej algorytmu DWT. Pomiar i obliczenia wykonano dla sygnału monoharmonicznego i poliharmonicznego.

Rozdział szósty jest krótkim 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 stosowanych metod szacowania niepewności pomiaru, w tym metodę redukcyjnej arytmetyki interwałowej, pozycje dotyczące transformacji falkowej oraz dokumentację techniczną wykorzystywanych przez Doktoranta układów elektronicznych i przyrządów pomiarowych. Współautorem sześciu zamieszczonych pozycji literaturowych, zawierających częściowe wyniki badań powiązanych z tematyką rozprawy doktorskiej, jest mgr inż. Łukasz Drózd.

Przedstawiona do recenzji rozprawa została napisana na dobrym 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 duża umiejętność formułowania problemów badawczych oraz ich efektywnego rozwiązywania, przy wykorzystaniu wiedzy z zakresu metrologii, teorii obwodów, modelowania i badań symulacyjnych oraz umiejętność praktycznego wykorzystania wiedzy i kompetencji inżynierskich do przeprowadzania złożonych badań eksperymentalnych.



#### 4. Oryginalne osiągnięcia

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

1. opracowanie jednolitego, spójnego modelu błędów toru pomiarowego, złożonego z elementów realizujących przetwarzanie analogowe, analogowo-cyfrowe i cyfrowe, z uwzględnieniem jego właściwości statycznych i dynamicznych,
2. opracowanie metody szacowania wypadkowej wartości niepewności rozszerzonej toru pomiarowego, zapewniającą uzyskanie wyników zbieżnych z wyznaczonymi metodą Monte Carlo, przy znacznie mniejszej złożoności obliczeniowej,
3. analizę właściwości metrologicznych algorytmu transformacji falkowej, umożliwiającą traktowanie takiego algorytmu jako fragmentu cyfrowej części toru pomiarowego, w sposób spójny z analizą pozostałych jego części,
4. opracowanie budżetów niepewności wielkości wyjściowych poszczególnych elementów toru pomiarowego: przetwornika pomiarowego, wzmacniacza pomiarowego, przetwornika analogowo-cyfrowego i algorytmu DWT, uwzględniającą zaproponowany model błędów,
5. bardzo szczegółową weryfikację eksperymentalną opracowanego modelu błędów, pokazującą wpływ zależności pomiędzy poszczególnymi źródłami błędów na wartość wypadkowej niepewności rozszerzonej.

Mając na uwadze wyżej wymienione oryginalne osiągnięcia naukowe uważam, że Pan mgr inż. Łukasz Drózdź 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 inżynieryjno-technicznych.

#### 5. Uwagi i komentarze

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

- 1) Autor rozprawy wykorzystuje różne rodzaje falek podczas analizy błędów własnych algorytmu DWT, podczas realizacji badań symulacyjnych oraz pomiarowej weryfikacji tezy pracy. Analiza wariancji błędu zaokrągleń dotyczy falki "coif5", badania symulacyjne przeprowadzono dla falki "db2", a pomiarowa weryfikacja została zrealizowana dla falki "spline4:4". Ponadto zastosowane falki charakteryzują się różną liczbą wielkości wyjściowych. Wydaje się, że wnioski wynikające z przeprowadzonych badań zyskałyby na wiarygodności, gdyby zostały oparte na jednakowych falkach.
- 2) W przedstawionym na rysunku 2.2 modelu części analogowej toru pomiarowego, w pierwszej kolejności, na podstawie transmitancji obiektu, analizowane są właściwości dynamiczne, a następnie, na podstawie równania przetwarzania - jego właściwości statyczne. Wprawdzie w treści rozprawy analizowany jest jedynie przypadek liniowej funkcji przetwarzania, jednak Autor w jej treści dopuszcza również możliwość wystąpienia nieliniowości. W tym kontekście nasuwa się pytanie o właściwą kolejność analizy właściwości obiektu. Nieliniowa funkcja przetwarzania spowoduje pojawienie się dodatkowych składowych w widmie analizowanego sygnału.



- 3) W badaniach weryfikujących tezę rozprawy, jej Autor wykorzystuje sygnał mono- i poliharmoniczny. Czy przedstawione w pracy wnioski z ich analizy dotyczą również sygnałów nieharmonicznych?
- 4) W kilku fragmentach pracy Autor używa niefortunnego sformułowania wiążącego pojęcie transmitancji z sygnałem, a nie z obiektem. Na przykład na stronie 39 poniżej wzoru (2.106) używa sformułowania "...transmitancji wielkości wyjściowych algorytmu...", a na stronie 75, w ostatnim zdaniu punktu 3.7, pisze: "...każda z wielkości wyjściowych cechować się będzie inną transmitancją...".
- 5) Omawiając, na stronie 138 rozprawy elementy zastosowanego układu pomiarowego, Autor stwierdza, że "...zastosowano oscyloskop RIGOL ... w połączeniu z dwiema identycznymi sondami P61009". Wyciąga z tego wniosek o identyczności błędów pomiaru napięć i przesunięć fazowych obu kanałów pomiarowych oscyloskopu i o ich wzajemnym skompensowaniu. Należy zwrócić uwagę, że, z punktu widzenia metrologii, wszystkie elementy układu pomiarowego, nawet o nominalnie takich samych parametrach, różnią się, co jest oceniane poprzez podawanie wartości ich niepewności aparaturowych. Stąd ich pełna kompensacja w omawianym przypadku jest mało prawdopodobna.
- 6) Analizując wyniki pomiarów charakterystyk częstotliwościowych wzmacniacza pomiarowego przedstawionych na rysunku 5.3, Autor stwierdza, że "model zaproponowany w równaniach (5.26) oraz (5.27) stanowi akceptowalne przybliżenie charakterystyki analizowanego wzmacniacza pomiarowego, natomiast model dany równaniem (5.25) odbiega od niej znacząco, przez co nie może być stosowany". Powyższe subiektywne stwierdzenia Autora powinny zostać poparte odpowiednimi wskaźnikami ilościowymi.

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

- 1) Na stronie 28, w zdaniu poniżej wzoru (2.86), zabrakło zakończenia: ...czy probabilistycznie.
- 2) Na rysunku 2.4 d) wprowadzono, nie występujące w innych częściach rozprawy, oznaczenie rozkładu dwumodalnego symbolem "s" zamiast "d".
- 3) We wzorach (4.8) i (4.67), opisujących sygnał błędu statycznego związany ze zmianą temperatury, Doktorant oczekiwaną wartość temperatury określił w °C, natomiast wartość sygnału błędu wyraża w mV/K, co skutkuje formalną niezgodnością wymiaru.
- 4) W Tabeli 4.5 błędnie zapisano, że źródłem błędu dynamicznego własnego przetwornika pomiarowego jest "transmitancja wzmacniacza", który na schemacie toru pomiarowego występuje za przetwornikiem pomiarowym.
- 5) W pierwszym akapicie rozdziału 5 Autor zastosował błędny zapis obustronnie domkniętego przedziału, określającego zakres zmian wartości chwilowej sygnału napięciowego. Prawidłowy zapis przedziału  $x \in [a, b]$ , musi spełniać warunek  $a \leq x \leq b$ .
- 6) Wykres zależności wartości wielkości wyjściowej przetwornika analogowo-cyfrowego w funkcji wartości napięcia wejściowego przedstawiony na rysunku 5.2 nie przedstawia większej wartości informacyjnej. Zależność różnicy pomiędzy uśrednioną wartością wielkości wyjściowej przetwornika analogowo-cyfrowego, a jej aproksymacją w funkcji wartości napięcia wejściowego umożliwiłoby pełniejszą ocenę nieliniowości.



- 7) We wzorze (5.74), w ułamku określającym argument funkcji arctan zamieniono miejscami zmienne występujące w liczniku i mianowniku.
- 8) W ocenianej rozprawie Autor stosuje błędną pisownię przymiotników złożonych z członów nierównorzędnych znaczeniowo. Zamiast występującego w pracy połączenia łącznikiem, obowiązująca jest pisownia łączna. Dotyczy to nazw filtrów (dolnoprzepustowy, górnoprzepustowy, pasmowoprzepustowy). Z kolei poprawny zapis metody Monte Carlo nie zawiera łącznika pomiędzy oboma członami nazwy dzielnicy stolicy Księstwa Monako.
- 9) Na stronie 142 pracy Autor stosuje błędną pisownię rozłączną podwielokrotności jednostek napięcia.
- 10) W tekście rozprawy, Autor błędnie rozdziela przecinkiem spójniki złożone: jako że i mimo że.

Wyżej wyszczególnione uwagi, częściowo dyskusyjne, nie ujmują i nie podważają w niczym pozytywnej 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 automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Doktorant wykazał się również dużymi umiejętnościami w zakresie analizy właściwości metrologicznych torów przetwarzania sygnałów pomiarowych, identyfikacji źródeł błędów pomiaru i oceny niepewności wyników pomiaru układów, zawierających algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów. Podczas realizacji swojej pracy doktorskiej zrealizował złożone badania eksperymentalne, wykorzystując współczesne techniki pomiarowe i narzędzia informatyczne, 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.

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.

