

Prof. dr hab. inż. Waldemar Minkina

wpłynęło dnia 11.09.2026 r. Głogów, 09.09.2026 r.

nr zał.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Faisala Saleema
„Measurement uncertainty of quantity modelled with non-integer
order differ-integral equations”

Promotorem pracy doktorskiej jest dr hab. inż. Józef Wiora, prof. PŚI, a promotorem pomocniczym dr inż. Alicja Wiora. Przewód doktorski jest prowadzony w dyscyplinie „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej. Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne”, prof. dr hab. inż. Adama Gałuszki pismem z dnia 31.07.2026 r., (RDAE-ETK.512.16.2026) na podstawie uchwały Rady Dyscypliny „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” nr 56/2026 z dnia 16.06.2026 r. (RDAE-ETK.0211.56.2026).

Praca recenzowana jest zgodnie z zapisami art. 186 oraz 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U z 2022 r. poz. 574 z późniejszymi zmianami oraz Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późniejszymi zmianami).

Recenzja jest wykonana także zgodnie z zaleceniami Przewodniczącego Rady Dyscypliny prof. dr hab. inż. Adama Gałuszki, podanymi mi w w/w piśmie z dnia 31.07.2026 r., (RDAE-ETK.512.16.2026) oraz z uwzględnieniem dobrych praktyk opisanych przez Radę Doskonałości Naukowej (RDN) w poradnikach udostępnionych w zasobach internetowych RDN - data dostępu: 05.07.2023 r. W niniejszej ocenie uwzględniono także najnowsze zalecenia Wiceprzewodniczącego Rady Doskonałości Naukowej prof. dr hab. Grzegorza Węgrzyna który w zakresie oceny pracy doktorskiej zaleca, aby: „W postępowaniach doktorskich podmioty doktoryzujące powinny stosować takie same zasady oceny merytorycznej wniosków, jakie stosowane są przez RDN w rozpatrywaniu wniosków o tytuł profesora”, co sprowadza się do faktu, że „RDN nie oczekuje od recenzentów analizy bibliometrycznej prac naukowych kandydatów ani punktowej oceny ich dorobku. Tego typu analiza nie wymaga żadnych kompetencji ani wiedzy w zakresie danej dyscypliny naukowej i mogłaby być dokonana przez dowolnego pracownika administracyjnego w Biurze RDN.” I dalej zaleca aby: „Wewnętrzne regulaminy podmiotów doktoryzujących nie powinny zawierać limitów ilościowych, w szczególności określających minimalne wysokości wskaźników bibliometrycznych, punktowych”. Oznacza to, że: „RDN oczekuje od recenzentów analizy merytorycznej osiągnięć naukowych kandydatów. Zapoznania się z ich publikacjami i stwierdzenia, czy rezultaty ich aktywności naukowej wniosły istotny wkład do nauki”.

Tytuł rozprawy doktorskiej stanowiącej podstawę ubiegania się o nadanie stopnia doktora

Tytuł rozprawy doktorskiej oraz jej tematyka dotyczy analizy niepewności wielkości opisywanych dynamicznymi równaniami ułamkowymi. Tematyka ta integruje metrologię, identyfikację modeli, rachunek ułamkowy oraz teorię sterowania, jednocześnie wpisując się w tematykę dyscypliny „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne”. W tym zakresie Doktorant opracował autorskie podejście do oceny niepewności w systemach wykazujących właściwości ułamkowego rzędu, koncentrując się na ocenie niepewności propagowanej przez parametry modeli ułamkowego rzędu wyznaczone w procesie identyfikacji. Doktorant opracował bezpośrednie podejście do propagacji niepewności oparte na czasowo zależnych współczynnikach czułości, wyprowadzonych analitycznie z równań różniczkowo-całkowych ułamkowego rzędu. Zaproponowana metoda uwzględnia macierz kowariancji estymowanych parametrów oraz wykorzystuje prawo propagacji niepewności do kwantyfikacji niepewności związanej z tymi parametrami.

Ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Opiniowana praca w oryginalnej wersji angielskiej liczy 185 stron tekstu zasadniczego oraz zawiera streszczenie, zestawienie publikacji Doktoranta, spisy: treści, rysunków, tabel, kodów opracowanych autorskich algorytmów, akronimów oraz listę użytych symboli. Praca zawiera 67 rysunków oraz 28 tabel i została podzielona na 9 rozdziałów głównych co w sumie zamknęło się na 231 stronach.

Należy podkreślić, że tematyka niniejszej pracy doktorskiej dotyczy wieloletnich prac i stanowi znaczące rozwinięcie osiągnięć jej promotora, profesora Józefa Wiory.

Praca składa się z następujących części składowych:

Rozdział 1: *Wprowadzenie (Introduction)*, gdzie przedstawiono w skrócie główne treści pracy, omówiono problem, który zostanie rozwiązany w dalszej części, uzasadniono jego znaczenie dla nauki i dlatego Doktorant podjął się jego rozwiązania.

Rozdział 2: *Podstawy teoretyczne i przegląd literatury (Background and Literature Review)*, gdzie przedstawiono podstawy teoretyczne oraz kluczowe definicje związane z metrologią i rachunkiem FO (ang. *Fractional-Order*). Zawarto tutaj także definicje popularnych metod aproksymacji wykorzystywanych do praktycznej realizacji operatorów FO. Ponadto omówiono wybrane prace literaturowe związane z celami niniejszej rozprawy.

Jest to bardzo obszerne studium literaturowe. Szkoda, że w tym miejscu Doktorant nie odniósł się do prac profesorów: Adama Żuchowskiego i Stanisława Skoczowskiego z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. W tym zakresie, między innymi, prof. Żuchowski napisał wiele prac dotyczących układów dynamicznych z ułamkowym rzędem dynamiki (inercji), tzw. modeli Strejca, będąc jednocześnie twórcą obszaru wiedzy w metrologii dotyczącego „miernictwa dynamicznego”. Zestawienie niektórych z tych prac można przykładowo znaleźć na stronie: https://yadda.icm.edu.pl/baztech/search/page.action?qt=SEARCH&q=sc.general*c_0keywords_0eqs.model%2BStrejca*1_0. Model Strejca, posiada tylko trzy parametry: współczynnik statycznego wzmocnienia K , stałą, czasową T , oraz rząd dynamiki α , np. ułamkowy – patrz wzór (3.3) w pracy Doktoranta. W pracach tych przedstawiono między innymi koncepcję tworzenia modelu Strejca z ułamkowym rzędem inercji wyrażonym za pomocą funkcji sklepanych. Model Strejca nadaje się także do opisu i identyfikacji dynamiki obiektów o charakterystykach skokowych rosnących monotonicznie.

Dobrze, że chociaż w tym zakresie Doktorant w spisie literatury umieścił niektóre moje publikacje dotyczące modeli Strejca, tj. układów dynamicznych z ułamkowym rzędem dynamiki. Tutaj warto zaznaczyć, że model Strejca dotyczy liniowych układów dynamiki, zaś Doktorant w swojej pracy doktorskiej rozważył także nieliniowe modele dynamiki i to dodatkowo w warunkach występowania zakłóceń.

Rozdział 3: *Studia przypadków i dane eksperymentalne (Case Studies and Experimental Data)*, gdzie przedstawiono studia przypadku wykorzystane do walidacji proponowanych metod. Rozważono trzy układy: dwa modele symulacyjne w środowisku MATLAB/Simulink oraz jedno stanowisko laboratoryjne. Pierwszym układem jest model inercyjny pierwszego rzędu typu Single-Input Single-Output (SISO) bez opóźnienia. Transmittancja TF tego układu wykorzystywana jest do oceny błędów w stanie ustalonym oraz niedokładności dynamicznych wynikających z aproksymacji IO. Drugim układem jest TRAS, który funkcjonuje jako układ Multi-Input Multi-Output (MIMO). Jego nieliniowy model w środowisku Simulink służy do oceny jakości projektowania regulatorów FO (ang. *Fractional-Order*, rząd ułamkowy) oraz wpływu metod aproksymacji IO. Trzecim rozważanym układem jest nieliniowy laboratoryjny system pomiaru natężenia przepływu typu SISO.

Rozdział 4: *Dokładność metod aproksymacyjnych (Accuracy of Approximation Methods)* opisuje analizę dokładności metod aproksymacji IO (ang. *Integer-Order*) stosowanych do realizacji modeli i regulatorów FO. W rozdziale tym rozwinięto wyniki opublikowane w jednej z wcześniejszych prac Doktoranta.

Rozdział 5: *Integer-Order Modeling* przedstawia podejście modelowania zastosowane dla

układu przepływowego analizowanego w rozprawie. Ze względu na to, że układ wykazuje odmienną dynamikę dla różnych częstotliwości pobudzenia, z danych eksperymentalnych wejście-wyjście IOD (*ang. Input-Output Data*) wyznaczono oddzielne transmitancje trzeciego rzędu. Dodatkowo, oszacowano modele drugiego rzędu w celu umożliwienia ich porównania. Przedstawiono podejście modelowania FO dla laboratoryjnego układu pomiaru natężenia przepływu, charakteryzującego się nieliniową dynamiką, niepewnością pomiarową oraz zmiennymi odstępami próbkowania. Jest to bardzo obszerny rozdział pracy.

Rozdział 6: *Modelowanie systemu/układu FO (Fractional-Order Modeling)* przedstawia ramy modelowania FO dla laboratoryjnego układu pomiaru natężenia przepływu przy stałym sygnale wejściowym, charakteryzującego się nieliniową dynamiką, niepewnością pomiarową oraz zmiennymi odstępami próbkowania. Zaproponowany autorski algorytm uwzględnia nieliniowy charakter układu oraz związany z nim składnik niepewności, poprzez konstrukcję modelu nominalnego FO. Zadanie identyfikacji modelu zostało sformułowane jako problem optymalizacji, w którym parametry modelu wyznaczono bezpośrednio na podstawie danych eksperymentalnych.

Rozdział 7: *Projekt sterownika FO (FO controller design)* - zaproponowano tutaj proste reguły strojenia parametrów regulatora FO-PI, oparte na metodach w dziedzinie częstotliwości. Podejście to unika nadmiernej złożoności, zachowując jednocześnie zalety dynamiki ułamkowego rzędu. Przedstawiono uporządkowaną procedurę doboru parametrów regulatora. Projektowanie uwzględnia zadanie częstotliwości granicznej wzmocnienia, marginesu fazy oraz płaskości charakterystyki fazowej, co zapewnia odporność układu zamkniętego.

Rozdział 8: *Dynamiczna propagacja niepewności w modelach FO (Dynamic uncertainty propagation of FO models)* - zaproponowano tutaj konstrukcję czasowo zależnych współczynników wrażliwości na podstawie probabilistycznego opisu zidentyfikowanych parametrów modelu FO oraz przedstawiono bezpośrednie podejście do oceny składnika niepewności pomiarowej propagowanej poprzez parametry zidentyfikowane w dynamicznym modelu FO.

Rozdział 9: *Wnioski i kierunki dalszych badań (Conclusions and future directions)* podsumowuje wyniki badań, wkłady naukowe oraz ograniczenia metod zaprezentowanych w poszczególnych rozdziałach rozprawy. Doktorant podsumował osiągnięcia uzyskane podczas realizacji pracy doktorskiej. Przedstawia również kierunki dalszych badań pozwalające na przezwyciężenie zidentyfikowanych ograniczeń. Wskazano, że przyszłe badania mogą uwzględniać adaptacyjny dobór rzędu obciążenia jako zmiennej decyzyjnej w optymalizacji GL (Grünwald-Letnikov). Podejście to może ograniczyć czas obliczeń i umożliwić zastosowanie czasu rzeczywistego.

Struktura pracy jest zasadniczo poprawna, drobne uwagi w tym zakresie opiszę w dalszej części niniejszej recenzji. Praca napisana jest dobrym językiem naukowo-technicznym, przy czym jej oryginał jest napisany w języku angielskim. Praca jest bardzo obszerna (231 stron), dlatego można było materiał podać w sposób bardziej skondensowany i rozmiar pracy ograniczyć do 120 ÷ 150 stron, który jest typowym rozmiarem dla rozpraw doktorskich.

Mimo tych drobnych uwag, należy stwierdzić, że Doktorant wykazał się umiejętnością pisania prac o charakterze naukowym.

Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Dobór piśmiennictwa jest prawidłowy. Niemniej jednak, recenzent zauważył, że Doktorant nie odniósł się do prac profesorów Adama Żuchowskiego i Stanisława Skoczowskiego. O tym napisałem wyżej. Szkoda, gdyż ci profesorowie wcześniej zajmowali się podobną tematyką dotyczącą dynamicznych równań ułamkowych. Nowością wniesioną do nauki przez Doktoranta w tym zakresie jest jednak autorskie podejście do oceny niepewności w systemach wykazujących właściwości ułamkowego rzędu, koncentrując się na ocenie niepewności propagowanej przez parametry modeli ułamkowego rzędu wyznaczone w procesie identyfikacji.

Ponadto, Doktorant w swojej pracy doktorskiej rozważył także nieliniowe modele dynamiki i to dodatkowo w warunkach występowania zakłóceń. Jest to nowatorskie podejście do

rozwiązania tego problemu.

Wskazanie oraz ocena celu pracy doktorskiej Doktoranta

Celem pracy było zbadanie, czy modelowanie FO może skutecznie odwzorować złożone nieliniowe zachowanie układu.

Pomiary w systemach dynamicznych dotyczą zarówno stanów przejściowych, jak i ustalonych. Analiza tylko i wyłącznie stanu ustalonego może prowadzić do pominięcia efektu wzmocnienia czy wzajemnego oddziaływania występującego w stanach przejściowych. Jest to niekorzystne, gdyż w wielu systemach odpowiedzi przejściowe dominują nad ogólnym zachowaniem układu i wpływają zarówno na dokładność modelowania, jak i pracę regulatorów w układach zamkniętych. Znane prace koncentrują się głównie na dokładności nominalnej lub strojeniu regulatorów, oferując ograniczony wgląd w mechanizmy propagacji niepewności. Ponadto, wpływ aproksymacji IO na propagację niepewności również wymaga pogłębionej analizy. Niedostatek ten ma istotne znaczenie, gdyż każdy z tych czynników wpływa bezpośrednio na wiarygodność modelowanego zachowania systemu. Oprócz tego, modelowanie dynamiki układów fizycznych napotyka trudności wynikające z nieliniowości oraz obecności szumu pomiarowego.

Tę problematykę Doktorant rozważał i poprawnie rozwiązał w swojej pracy.

Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

Jest to bardzo rozbudowana praca teoretyczna, ale poparta badaniami eksperymentalnymi na podstawie stanowiska badawczego zbudowanego przez Doktoranta i przedstawionego na rys. 3.3 ÷ 3.5, dotycząca opracowania metody oceny niepewności propagowanej przez parametry modeli FO.

Zastosowany aparat matematyczny oraz zastosowane metody badawcze są prawidłowe.

Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Doktorant zaproponował zintegrowane podejście do modelowania, sterowania oraz oceny niepewności propagowanej przez parametry modeli FO. Praca przedstawia wkład w rozwój podstaw teoretycznych oraz praktycznych zastosowań metod FO w modelowaniu, sterowaniu i metrologii. W tym zakresie oryginalnymi osiągnięciami Doktoranta są:

- opracowanie ram koncepcyjnych oceny niepewności propagowanej przez parametry modeli FO,
- sformułowanie zaleceń praktycznych dla integracji modelowania FO z analizą niepewności,
- opracowanie reguł strojenia regulatorów FO-PI metodami częstotliwościowymi oraz ich weryfikację dla dwóch przypadków badawczych,
- sformułowanie modelowania FO jako problemu optymalizacji, uwzględniającego niepewność pomiarową oraz jego walidację eksperymentalną,
- analizę wpływu implementacji operatorów FO na propagację niepewności.

Szkoda, że w tym zakresie Doktorant nie odniósł się do prac profesorów Adama Żuchowskiego oraz Stanisława Skoczowskiego – o tym pisałem wcześniej.

Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Dokładne wyznaczanie przepływu cieczy ma kluczowe znaczenie w wielu zastosowaniach praktycznych, od instalacji domowych po wielkoskalowe procesy przemysłowe. Poprawne działanie systemów dystrybucji i uzdatniania wody uzależnione jest od wiarygodnej regulacji przepływu. Analogiczne wymagania występują przykładowo w systemach ogrzewania, kondensacji oraz nawadniania, a także w układach dozowania i odprowadzania cieczy. W wielu

zastosowaniach wymagane jest utrzymanie zadanego przepływu w stanie ustalonym. Możliwość realizacji tego zadania zapewnia inteligentny system sterowania. Metody projektowania regulatorów opierają się na dokładnych modelach matematycznych, które umożliwiają syntezę sterowania gwarantującą pożądane zachowanie układu. Z tego względu odpowiedni model dynamiczny procesu stanowi kluczową informację, niezbędną do skutecznego projektowania i implementacji układów sterowania.

W tym celu przedstawiono porównanie regulatorów zaprojektowanych z wykorzystaniem zaproponowanego podejścia z klasycznymi regulatorami IO oraz FO typu PID. Przeprowadzona analiza wykazała, że zastosowane metody aproksymacji mają istotny wpływ na zachowanie układu zamkniętego oraz jego odporność. Przedstawione wyniki dostarczają zarówno podstaw teoretycznych, jak i praktycznych wytycznych do projektowania efektywnych i możliwych do implementacji regulatorów FO dla nieliniowych układów dynamicznych.

W tym właśnie istnieje możliwość praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań.

Informacje o nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

W czasie lektury ocenianej pracy doktorskiej recenzent nie zauważył żadnych nieprawidłowości.

Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Tak, oceniana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Opis oryginalnych, autorskich rozwiązań problemów naukowych oraz zastosowanych oryginalnych, autorskich metod badawczych podano wyżej w punkcie dotyczącym *oceny części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań*

Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Powyższe stwierdzenie potwierdzają dodatkowo, bardzo dobre publikacje Doktoranta, opublikowane razem z promotorem oraz promotorem pomocniczym w prestiżowych czasopismach, takich jak: „*Measurement*” (200 punktów MNiSW), „*Scientific Reports*” (140 punktów MNiSW) czy „*Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*” (100 punktów MNiSW) w czasopismach przypisanych do tej dyscypliny. Ponadto dobre publikacje Doktorant opublikował w materiałach cyklicznych, uznanych konferencji międzynarodowych: „*Conference On Automation 2024 oraz 2026*”, „*Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications 2025*” czy „*IMEKO, TC-6 International Conference on Metrology and Digital Transformation 2025*”.

Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Faisala Saleema będąca podstawą wniosku o uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych jest napisana poprawnie. Układ pracy i kolejność cytowania poszczególnych publikacji jest właściwa. Doktorant słusznie uwypukla własne dokonania. ***Na podstawie wnikliwej analizy pracy mogą stwierdzić, że nie nasuwają się zasadnicze uwagi krytyczne o charakterze merytorycznym.***

Przedstawione wyżej niewielkie uwagi mają na celu inspirację i zachęcenie Doktoranta do kontynuowania prac w tej dziedzinie. Recenzowana praca doktorska mgr inż. Faisala Saleema pod tytułem „*Measurement uncertainty of quantity modelled with non-integer order differ-*

integral equations”, stanowi dobry, samodzielny wkład doktoranta w nauki techniczne, w szczególności w zakresie podstaw teoretycznych oraz praktycznych zastosowań metod FO w modelowaniu, sterowaniu i metrologii. Uzyskane rezultaty mają istotne znaczenie poznawcze i mogą być wykorzystane w dalszych pracach badawczych w tym zakresie.

Na tej podstawie należy stwierdzić, że Doktorant dysponuje ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej „*Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*”, podjął się rozwiązania oryginalnego zadania i rozwiązał je stosując poprawne metody badawcze oraz wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Stwierdzam więc, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska, będąca podstawą wniosku o uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych dla mgra inż. Faisala Saleema nie wymaga uzupełnień ani poprawek i spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 187 ustęp 1 i ustęp 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce* (Dz. U z 2022 r. poz. 574 z późniejszymi zmianami oraz Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późniejszymi zmianami).

Uwzględniając bardzo dobry dorobek naukowy Doktoranta, poparty bardzo dobrymi publikacjami, opublikowanymi w bardzo dobrych czasopismach oraz materiałach konferencyjnych oraz oryginalne metody rozwiązania postawionego problemu naukowego, wnoszę jednocześnie o wyróżnienie Jego pracy doktorskiej.

.....
(Waldemar Minkina)