

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Oprzędkiewicz,
AGH, Wydział EAIIB
Katedra Automatyki i Robotyki

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

Kraków 07 09 2026 r.

wpłynęło dnia 11.09.2026

nr zał.

Recenzja

Rozprawy doktorskiej

Mgr inż. Faisala Saleema

Tytuł rozprawy:

„Measurement uncertainty of quantity modelled with non-integer order differ-integral equations”

Dziedzina: nauki inżynieryjno-techniczne

Dyscyplina: Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne

Recenzowana praca powstała pod kierunkiem naukowym dra hab. inż. Józefa Wióry, prof. PŚI oraz dr inż. Alicji Wióry (promotor pomocniczy). Niniejszą recenzję przygotowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny AEEiTK Politechniki Śląskiej nr RDAEETK.512.17.2026z dnia 31 07 2026r.

1. Zakres i cel rozprawy

Obecnie zarówno w nauce, jak i przemyśle obserwuje się coraz większe zapotrzebowanie na opracowanie nowych metod i technik modelowania cyfrowego wielu rzeczywistych systemów fizycznych. Poprawnie opracowane i zweryfikowane modele cyfrowe są niezbędne do budowy „cyfrowych bliźniaków”, obróbki sygnałów pomiarowych lub konstrukcji systemów sterowania.

Obecny stan wiedzy wskazuje także, że w modelowaniu cyfrowym są z powodzeniem stosowane modele bazujące na rachunku różniczkowym niecałkowitego lub ułamkowego rzędu. Modele „ułamkowe” w wielu sytuacjach są dokładniejsze, niż ich odpowiedniki rzędu całkowitego, jednakże w tym obszarze można jeszcze wskazać wiele zagadnień czekających na rozwiązanie.

Jednym z kluczowych etapów budowy modelu każdego rzeczywistego procesu lub obiektu jest identyfikacja jego parametrów na podstawie danych uzyskanych z pomiarów, które ze swojej natury są obarczone niepewnością. Analiza dokładności modelu, implikowanej niepewnością danych pomiarowych jest kluczowa dla określenia jego poprawności i przydatności.

Znane metody analizy niepewności dotyczą stanów ustalonych oraz (w przypadku stanu przejściowego) systemów opisanych równaniami różniczkowymi całkowitego rzędu. Brak jest opracowanej metodyki badań pozwalającej na kompleksową analizę dokładności statycznej i dynamicznej modeli opisanych równaniami niecałkowitego rzędu.

Celem i przedmiotem recenzowanej rozprawy jest analiza niepewności modeli opisywanych modelami ułamkowymi. Praca integruje zagadnienia z zakresu metrologii, identyfikacji modeli, rachunku ułamkowego oraz teorii sterowania. W jej ramach opracowano i zweryfikowano metodykę oceny niepewności modeli rzędu niecałkowitego.

Hipotezy badawcze zostały podane na s. 4 i są one (w wolnym tłumaczeniu) następujące:

H1. Podejście ułamkowe pozwala na dokładny opis złożonych systemów nieliniowych. Model ułamkowy wymaga mniejszej ilości parametrów, niż klasyczne modele rzędu całkowitego,

H2. W przypadku modeli ułamkowych zbudowanych z użyciem definicji Grunwalda-Letnikova (definicja GL) długość pamięci ma istotny wpływ na niepewność pomiarów i dokładność modelu. W szczególności możliwy jest dobór długości pamięci zapewniający zadaną dokładność modelu,

H3. Komponent niepewności związany z identyfikowanymi parametrami może być odseparowany i określony ilościowo w przestrzeni wyjściowej bez konieczności wykonania pośrednich transformacji. Upraszcza to znacznie analizę oraz interpretację wyników.

Pierwsza z powyższych hipotez jest oczywista, gdyż obecnie jednym z głównych zastosowań rachunku ułamkowego jest modelowanie. Dwie pozostałe, odnoszące się do analizy niepewności są sformułowane trafnie i dobrze opisują istniejące luki badawcze, które oceniana rozprawa na za zadanie wypełnić.

Powyższe tezy miały być udowodnione poprzez realizację następujących zadań badawczych, podanych na s 3:

Z1. Analiza wpływu wybranej aproksymacji na niepewność modelu,

Z2. Opracowanie modelu matematycznego opisującego odpowiedź dynamiczną laboratoryjnego układu pomiarów przepływu,

Z3. Opracowanie modelu niecałkowitego rzędu procesu przepływu z wykorzystaniem równania różnicowego bazującego na definicji GL,

Z4. Analiza jakości i odporności ułamkowego modelu przepływu i porównanie go z modelami rzędu całkowitego,

Z5. Zaproponowanie reguł dostrajania regulatora FOPI i analiza wpływu zastosowanych metod aproksymacji operatora niecałkowitego rzędu na jakość regulacji w rozważanych przypadkach,

Z6. Opracowanie metodyki badań pozwalającej na dynamiczne modelowanie propagacji niepewności wykorzystującego współczynniki wrażliwości zależne od czasu.

2. Przegląd treści rozprawy

Tekst rozprawy liczy łącznie 221 stron i został podzielony na 9 głównych rozdziałów, bibliografię, wykaz skrótów, spisy rysunków i tabel oraz dodatki. Przegląd treści rozprawy jest omówiony poniżej.

Rozprawa rozpoczyna się streszczeniami w języku angielskim i polskim.

Następnie podany jest wykaz publikacji Autora, podzielony na część bezpośrednio związaną z pracą oraz pozostałe. W części bezpośrednio związanej z rozprawą są to 3 artykuły współautorskie w pismach za 200, 140 i 100 punktów, w 2 Autor rozprawy

jest pierwszym autorem oraz 4 współautorskie referaty konferencyjne. W części nie związanej z dysertacją wykazano 5 artykułów o różnej punktacji.

Kolejno podany jest spis treści, oraz spisy rysunków, tabel i akronimów.

Rozdział 1 stanowi wstęp, w którym wskazano istniejącą lukę badawczą, której istotą jest brak opracowanej metodologii do dynamicznej analizy niepewności systemów opisanych modelami niecałkowitego rzędu, identyfikowanych na podstawie zaszumionych danych zbieranych ze zmiennymi okresami próbkowania.

Wskazana luka pozwoliła na sformułowanie celów pracy, którymi są opracowanie ujednoliconego framework'a do dynamicznej analizy niepewności pomiarowej w systemach opisanych równaniami niecałkowitego rzędu oraz opracowanie na tej podstawie reguł dostrajania ułamkowego regulatora PI (FOPI) z aproksymowaną częścią całkującą.

W końcowej części tego rozdziału omówiono zawartość pracy wraz z odniesieniem poszczególnych zadań do poszczególnych rozdziałów (Tabela 1.1).

Rozdział 2 zawiera podstawowe tło teoretyczne oraz obszerną analizę „state of the art” z zakresu pracy. Na początku omówiono podstawowe pojęcia z metrologii, niezbędne do prezentacji głównych osiągnięć pracy.

Później zaprezentowano podstawowe pojęcia z rachunku niecałkowitego rzędu, niezbędne do opisu i prezentacji głównych rezultatów rozprawy.

Następnie omówiono znane podejścia do modelowania, zarówno całkowitego jak i niecałkowitego rzędu. Omówiono także liczne przykłady modeli wielu rzeczywistych procesów i zjawisk.

W dalszej części omówiono modele pomiarów uwzględniające dynamikę oraz opis niepewności i zakłóceń mierzonych wielkości.

Dalej omówiono metody projektowania zamkniętych systemów regulacji z regulatorami PID zarówno całkowitego, jak i niecałkowitego rzędu, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu zastosowanych aproksymacji na jakość regulacji w układzie.

W końcowej części tego rozdziału przedyskutowano ograniczenia i wyzwania stawiane rozważanym modelom przez niepewność i zakłócenia pomiarów.

Rozdział 3 prezentuje systemy dynamiczne wykorzystane do wygenerowania danych doświadczalnych oraz walidacji proponowanych rozwiązań. W tym celu wykorzystano: dwie transmitancje inercyjne rzędu ułamkowego bez opóźnienia, zamodelowane w środowisku MATLAB/SIMULINK, laboratoryjny model śmigłowca (system TRAS) oraz laboratoryjny system pomiaru przepływu.

Jako przykłady realnych systemów opisanych transmitancją ułamkowego rzędu podano układy z masami wirującymi połączone elastycznie oraz omówiono problem jednostek czasu opisujących pseudo stałe czasowe w modelach, który wciąż jest kwestią dyskusyjną podczas stosowania modeli ułamkowych.

W przypadku systemu TRAS podano jego model nieliniowy, jego linearyzację w otoczeniu punktu równowagi oraz macierz transmitancji operatorowych. Dla rozważanych modeli podano też wartości liczbowe parametrów opisujących rzeczywisty model laboratoryjny.

W przypadku laboratoryjnego modelu systemu przepływowego podano dokładne schematy sprzętowe, oprogramowanie i algorytmy prowadzenia pomiarów i ich implementację w MATLAB-ie oraz przykładowe wyniki pomiarów.

W Rozdziale 4 (s 45, s 81 w pdf) omówiono zagadnienia dokładności aproksymacji stosowanych w modelowaniu i sterowaniu niecałkowitego rzędu. Zagadnienie to jest jednym z fundamentalnych w rozważanej rozprawie.

Najpierw omówiono dokładność aproksymowanych transmitancji ułamkowych. Na początku podano definicje błędów analizowanych w dalszej części rozprawy: są to błędy statyczne w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz wskaźnik jakości IAE oraz norma H1 stosowane do szacowania dokładności przebiegów przejściowych.

W dalszej kolejności podano wzory opisujące uchyby ustalone dla wszystkich rozważanych w rozprawie transmitancji aproksymujących modele ułamkowe.

Następnie zaprezentowano wykresy odpowiedzi skokowych transmitancji ułamkowych dla różnych rzędów i rozważanych metod aproksymacji.

Kolejno omówiono i zaprezentowano bardzo dokładną analizę numeryczną dokładności w sensie charakterystyk częstotliwościowych Nyquista, której miarą są błędy wzmocnienia i fazy. Jako referencję przyjęto wartości wzmocnienia i fazy dla modelu dokładnego.

Później dokonano analizy dokładności modelu.

Rozdział 5 opisuje modele całkowitego rzędu procesu przepływu w postaci transmitancji 2 i 3 rzędu. Opisano sposób identyfikacji parametrów modeli z użyciem funkcji kosztu MAE i sposób otrzymania modelu zredukowanego. Następnie dokonano analizy dokładności proponowanych modeli.

Rozdział 6 prezentuje proponowane przez Autora modele niecałkowitego rzędu dla procesu przepływu cieczy. Proponowany model bazuje na definicji Grunwalda-Letnikova, a jego parametry są identyfikowane na podstawie odpowiedzi skokowej z wykorzystaniem zbudowanego przez Autora framework-a.

W początkowej części tego rozdziału jest zamieszczony przegląd „state of the art.” z zakresu ułamkowego modelowania przepływów.

Następnie zaproponowano model procesów przepływu w postaci prostej transmitancji ułamkowego rzędu z jednym zerem i jednym biegunem. Proponowany model ma 5 parametrów wymagających identyfikacji i ma za zadaniem opisać zachowanie się odpowiedzi modelowanego procesu, ale jego parametry nie mają fizycznej interpretacji.

Zaproponowany model ułamkowy został następnie porównany z modelami rzędu całkowitego: modelem 3 rzędu bez opóźnienia oraz modelem 2 rzędu z opóźnieniem. W celu implementacji cyfrowej zbudowano model AMPL, który następnie wykorzystano do identyfikacji z wykorzystaniem serwera NEOS.

W dalszej kolejności omówiono identyfikację parametrów wszystkich modeli (całkowitego i niecałkowitego rzędu) na podstawie danych doświadczalnych oraz przeprowadzono dokładną analizę ich dokładności, odporności, wrażliwości na zaburzenia parametrów oraz błędów numerycznych podczas ich użycia.

Dokonano również analizy wpływu zastosowanych solverów na dokładność otrzymanych wyników oraz czasy obliczeń podczas optymalizacji i wyznaczania odpowiedzi skokowych.

Rozdział 7 jest poświęcony konstrukcji układu sterowania z regulatorem FOPI dla systemu TRAS. Zaproponowano analityczno – numeryczną metodę wyznaczania parametrów regulatora, bazującą na zadanych własnościach częstotliwościowych układu zamkniętego a następnie porównano jakość regulacji z jakością uzyskaną z regulatora PI całkowitego rzędu, dostrojonego z użyciem narzędzia *pidsune* dostępnego w środowisku MATLAB.

Dokonano także analizy jakości i odporności regulacji w zależności od zastosowanej metody aproksymacji operatora niecałkowitego rzędu, przy czym rozważano aproksymacje ORA, Charefa oraz Matsudy.

W Rozdziale 8 omówiono propagację dynamicznej niepewności pomiarów w modelach ułamkowego rzędu opisujących przepływ cieczy. W celu jej opisu zbudowano model dynamiki rozważanego procesu z wykorzystaniem definicji GL i podano analityczną formułę na wyznaczenie odpowiedzi modelu na dowolne wymuszenie. Parametry tego modelu wyznaczono na podstawie danych doświadczalnych poprzez minimalizację funkcji kosztu Mean Square Error (MSE) opisującej różnicę pomiędzy odpowiedzią skokową modelu i rzeczywistego obiektu.

Otrzymany model wykorzystano następnie do wyznaczenia propagacji niepewności pomiarowej powstałej podczas numerycznej identyfikacji parametrów modelu. Jej miarą są zaproponowane dynamiczne wskaźniki wrażliwości każdego z parametrów modelu na niepewność danych doświadczalnych, które zostały wyprowadzone analitycznie (w postaci gotowej do zastosowania) oraz ich własności zostały uzasadnione teoretycznie.

W dalszej części rozważono propagację błędów i niepewności w zamkniętym układzie regulacji zawierającym obiekt ułamkowego rzędu z opóźnieniem oraz regulator FOPI. W tym wypadku również zaproponowano dynamiczne wskaźniki wrażliwości układu regulacji na niepewność parametrów modelu obiektu.

Następnie zaprezentowano dynamiczne wskaźniki wrażliwości układu regulacji w sytuacji, gdy operator niecałkowitego rzędu jest opisany definicjami Riemanna-Liouville'a lub Caputo. Rozważono zastosowanie tych samych definicji i do opisu regulatora i obiektu lub opis obiektu i regulatora przez różne definicje.

Rozdział 9 stanowi podsumowanie oraz prezentację planów dalszych badań rozważanej tematyki. Na początku przypomniano treść wszystkich wcześniejszych rozdziałów i podsumowano najważniejsze osiągnięcia naukowe rozprawy.

W następnej kolejności przedyskutowano ograniczenia proponowanych metod, którymi są:

- ✓ duża złożoność obliczeniowa wynikająca z konieczności wyliczania współczynników definicji GL przy jednoczesnym braku możliwości adaptacyjnego wyznaczenia rzędu definicji,
- ✓ analiza ograniczona do układu SISO, którego parametry są opisane rozkładem normalnym. Brakuje analizy w sytuacji, gdy parametry są opisane innym rozkładem,
- ✓ W rozprawie analizowana jest tylko propagacja niepewności pomiarowej związana z identyfikowanymi parametrami modelu. Nie dokonano analizy niepewności pochodzącej z innych źródeł,
- ✓ nie przeanalizowano także propagacji niepewności w systemach opisanych równaniami różniczkowymi niecałkowitego rzędu.

Należy tu podkreślić, że powyższa krytyczna analiza prezentowanych osiągnięć bardzo dobrze świadczy o dojrzałości naukowej Autora rozprawy.

Jaki kierunki dalszych badań wskazano między innymi:

- ✓ Rozważenie rzędu aproksymacji wykorzystującej definicję GL jako dodatkowej zmiennej decyzyjnej przy identyfikacji w celu zmniejszenia złożoności obliczeniowej,
- ✓ Zastosowanie aproksymacji Bayesa do identyfikacji,
- ✓ Rozważenie innych źródeł niepewności danych pomiarowych

Dodatek A prezentuje prompta Microsoft Copilot wykorzystanego do korekty językowej tekstu pracy w postaci kodu źródłowego LaTeX'a.

Na końcu pracy znajduje się bardzo obszerna Bibliografia. Liczy ona 184 pozycje i jest dobrana w sposób trafny i w pełni potwierdza dobre osadzenie problematyki pracy w aktualnym stanie badań.

3.Osiągnięcia rozprawy

Osiągnięcia rozprawy zostały krótko opisane przez jej Autora na s.4 (C1-C5), jednakże przygotowanie recenzji wymaga ich wskazania na podstawie analizy treści.

Zgodnie z powyższym stwierdzam, że główne osiągnięcia rozprawy są omówione w rozdziałach 4 – 8. W szczególności są one następujące:

(O1) Dokonanie bardzo dokładnej analizy porównawczej dokładności różnych metod aproksymacji transmitancji ułamkowego rzędu w sensie charakterystyk częstotliwościowych.

(O2) Zaproponowanie nowego modelu niecałkowitego rzędu opisującego proces przepływu cieczy oraz dokonanie jego identyfikacji oraz wnikliwej analizy dokładności, wrażliwości na niepewność parametrów oraz błędów numerycznych.

(O3) Opracowanie analityczno-numerycznej metody dostrajania regulatora FOPI dla systemu nieliniowego opisanego przybliżonym modelem liniowym i analiza wpływu wybranej metody aproksymacji na jakość regulacji w układzie.

(O4) Zaproponowanie dynamicznych wskaźników wrażliwości modelu oraz układu regulacji na niepewność danych doświadczalnych, wyprowadzenie analitycznych wzorów na te współczynniki oraz ich analiza teoretyczna. Model obiektu ma postać transmitancji inercyjnej ułamkowego rzędu, jako regulator rozważono regulator FOPI. Wskaźniki wrażliwości zostały zbudowane dla operatora niecałkowitego rzędu opisanego przez trzy najczęściej stosowane definicje: Grunwalda-Letnikova, Riemanna-Liouville'a oraz Caputo.

Należy tu zaznaczyć, że wskaźniki te mogą być zastosowane do analizy każdego modelu i układu regulacji niecałkowitego rzędu, co zdecydowanie podnosi ich wartość naukową.

4. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Podczas lektury recenzowanej rozprawy nasunęły się również pewne uwagi o charakterze dyskusyjnym. Część z nich ma naturę bardziej ogólną, pozostałe są szczegółowe. Są one podane poniżej.

4.1. Uwagi ogólne

(UO1) W rozdziale 5 omówiono i dokładnie przeanalizowano modele całkowitego rzędu tylko dla procesu przepływu. Zdecydowanie tu brakuje analogicznej analizy dla modelu systemu TRAS.

(UO2) W rozdziale 3 wskazano obiekt opisany transmitancją niecałkowitego rzędu jako osobno rozważany obiekt regulacji, wraz z podaniem przykładów systemów, które mogą nim być opisane. W dalszej części pracy transmitancje tego typu są stosowane jako modele zastępcze dwóch pozostałych, rzeczywistych obiektów.

4.2. Uwagi szczegółowe

(US1) W rozdziale 3 opis obiektów jest niespójny. Z punktu widzenia matematyki najdokładniej jest opisany model systemu TRAS, ale tu przydałoby się więcej szczegółów technicznych. Brakuje też wstępnych, przykładowych danych pomiarowych, takich, jak w przypadku systemu przepływowego.

Z kolei z punktu widzenia sprzętowo-pomiarowego najdokładniej jest opisany system z przepływomierzem, ale tu z kolei brakuje choćby najprostszego modelu matematycznego procesu przepływu.

(US1) s 11 Równanie (2.12) – w definicji GL suma jest nieskończona. W przypadku sumy skończonej jest to aproksymacja PSE lub FOBD.

(US2) s 17 na dole – Warto dodać, że aproksymacja Charefa opisuje bardzo specyficzną klasę transmitancji ułamkowych w postaci zbliżonej do transmitancji Strejca, ale rzędu ułamkowego. Wzór na tę transmitancję powinien być tu podany.

(US3) s 46 – błędy (4.3) i (4.4) można próbować wyliczyć analitycznie – czy były takie próby?

(US4) s 47 - warto tu zaznaczyć, że uchyby (4.8), (4.10) są liczone z wykorzystaniem tw o wartości końcowej (Final Value Theorem - FVT).

(US5) s 48, (4.12) – tu powinno być duże K (wzmocnienie statyczne)?

(US6) s. 50 Tabela 4.1 – jaki jest sens testowania błędów dla rzędu CFE równego $N=1$? Takiego niskiego rzędu nie ma sensu stosować. Tu dużo więcej można się dowiedzieć przy teście dla $N=3$. Dalej – warto też zrobić podobne testy dla niskiego rzędu ułamkowego, np. równego 0.2 (rozważone są 0.5 i 0.8).

(US7) s 52 - napisano, że analityczne formuły na odpowiedzi skokowe rozważanych transmitancji inercyjnych nie są znane. Nie jest to prawda, gdyż odpowiednie wzory są znane od lat i można je znaleźć w literaturze (np. R. Caponetto, G Dongola, L. Fortuna, I. Petráš Fractional Order Systems. Modeling and Control Applications, World Scientific 2010). W rozważanym wypadku mogą one być stosowane jako referencja do szacowania dokładności aproksymacji np. z wykorzystaniem funkcji IAE. W związku z tym wykresy 4.1 – 4.5 nie mogą być w żadnym wypadku uznane za miarodajne w kwestii dokładności aproksymacji.

(US8) s 64 i dalej Tabela 4.6 nie prezentuje rozwiązania równania (4.21) tylko wyniki jego numerycznej minimalizacji. To samo – s 75, tabela 5.1 i równanie (5.1),

(US9) s 71 Rozdział 5.1 – omówiona jest identyfikacja modelu całkowitego rzędu, podczas gdy sam model nie był nigdzie podany wcześniej. Modele w postaci transmitancji (5.2) i (5.3) są podane na następnej stronie, ale bez uzasadnienia ich postaci. Wejście i wyjście systemu oraz przebiegi odpowiedzi skokowej są podane znacznie wcześniej, w rozdziale 3 i należałoby tu zamieścić odpowiednie odsyłacze.

(US10) s 75 tabela 5.1 – parametry modelu nie są otrzymane poprzez rozwiązanie równania (5.1) opisującego funkcję kosztu MAE, lecz poprzez numeryczną minimalizację tej funkcji.

(US11) s 92. W ostatnim zdaniu sekcji 6.1.2 podano, że odpowiedź jest otrzymana przez rozwiązanie równania (6.8), ale brakuje tu analitycznej formuły użytej do rozwiązania oraz szczegółów implementacji numerycznej (okres próbkowania i długość pamięci L).

(US12) s 93 – wzory (6.12) i (6.13) są powtórzone. W jakim celu?

(US13) s 93 – model z opóźnieniem (6.14) nie był identyfikowany w rozdziale 5. Jakie są jego parametry?

(US14) s 96 – błąd w stanie ustalonym może być wyznaczony analitycznie, było to pokazane w rozdziale 4. W jaki celu jest on liczony numerycznie?

(US15) s117, 118 tabela 6.5 – W typowej sytuacji zastosowanie definicji GL do poprawnego modelowania pochodnych ułamkowych wymaga zastosowania rzędu aproksymacji co najmniej równego 100. Dlaczego tu bada się bardzo niskie rzędy, równe $m=2...6$?

(US16) s 119 -121, rys. 6.18-6.20 – tu do porównania należało dodać przebiegi doświadczalne.

(US17) s 142, równanie (8.3.) – sumowanie powinno „wystartować” od 1 a nie od 0? Dalej – jaka długość pamięci M była stosowana?

(US18) s 148 równanie (8.14) – jest tu rozważany obiekt rzędu ułamkowego z opóźnieniem. Opisuje on obiekt (8.2) z M opóźnieniami w stanie, ale zastąpienie go modelem z jednym opóźnieniem musi być dokładniej wyjaśnione. W typowej sytuacji model pierwszego rzędu w postaci (8.2) z M opóźnieniami jest zastępowany przez model M tego rzędu bez opóźnienia.

5. Strona formalna

Tekst rozprawy przygotowany w języku angielskim. Od strony formalnej tekst rozprawy nie budzi większych zastrzeżeń, językowo jest generalnie poprawny i „łatwy w czytaniu”. Można sformułować następujące uwagi redakcyjne:

(R1) Spis treści jest zlokalizowany po podziękowaniach, streszczeniach w języku polskim i angielskim i liście publikacji. Nie ułatwia to czytania.

(R2) W mojej opinii zbędne jest 3 poziomowe „zagnieżdżanie” podrozdziałów, podział tekstu na rozdziały główne i podrozdziały byłby wystarczający.

Poza tym od strony edytorskiej praca jest przygotowana starannie, w trakcie czytania dostrzeżono nieliczne błędy językowe, „literówki” i błędy interpunkcyjne, przykładowo:

(L1) Pierwsze zdanie streszczenia w języku polskim brzmi: *„Systemy czasu rzeczywistego wymagają pracy regulowanej w celu zapewnienia zadanej jakości działania, co zazwyczaj jest realizowane za pomocą regulatorów ze sprzężeniem zwrotnym”*. Treść tego zdania oczywiście wymaga gruntownej poprawy. Zostało ono prawdopodobnie napisane przez narzędzie AI zastosowane do automatycznego tłumaczenia, ale w takiej sytuacji tłumaczenie zawsze powinno być sprawdzone i w razie potrzeby skorygowane.

(L2) s3 - Objective 1 – nie jest jasne, wpływ czego na co jest analizowany? Można się domyślić, że chodzi o wpływ wyboru metody aproksymacji na dokładność modelu, ale jest to zupełnie niejasne.

(L3) s 19⁷ – „modeling” jest powtórzone,

(L4) s 20¹ – lepiej: „fractional”

(L5) s 23₂₄ – „Python”

(L6) s 24₁₃ – powinno być „determines”,

(L7) s 24₂ – powinno być „related”,

(L8) s 43_{13,14} – powinno być „presents”, „describes”,

(L9) s 51₄ – powinno być: „...using approximated models...”,

(L10) s 69⁸ – powinno być: „addresses”,

(L11) s 71 – tytuł sekcji 5.1: powinno być „...reduced order”,

(L12) s 76² – powinno być „isolate”,

(L13) s 85₅ – powinno być „shows”.

6.Podsumowanie

Na podstawie przeglądu treści rozprawy stwierdzam, że jej Autor posiada głęboką wiedzę teoretyczną z zakresu metrologii, systemów automatyki, modelowania systemów dynamicznych i rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu.

Wykazał się także kreatywnością i umiejętnością krytycznej analizy zarówno istniejących, jak i własnych rozwiązań, co wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Rozprawa prezentuje oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego, którym jest opracowanie nowej, autorskiej metody analizy niepewności modeli i systemów sterowania niecałkowitego rzędu. Otrzymane wyniki stanowią znaczący wkład w obszarze zastosowań rachunku niecałkowitego rzędu w automatyce.

Jednocześnie zdecydowanie stwierdzam, że uwagi dyskusyjne i krytyczne podane w punktach 4 i 5 nie umniejszają wartości ocenianej rozprawy.

Podsumowując, recenzowana rozprawa spełnia w mojej opinii wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą z 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r. poz. 574 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Wnioskuje zatem do Wysokiej Komisji powołanej przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej w Gliwicach o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora, mgr inż. Faisala Saleema do publicznej obrony.