

Prof. dr hab. inż. Wojciech Sumelka
Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Instytut Analizy Konstrukcji
ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań
wojciech.sumelka@put.poznan.pl

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 14.09.2026
nr zał:

Poznań, 08.09.2026

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

1. Podstawa formalna recenzji

- Umowa o dzieło UMC/2784/2026 z dnia 07.08.2026 r. zawarta z Politechniką Śląską, reprezentowaną przez dr inż. Katarzynę Mościńską, prof. uczelni, do wniosku numer 2621/UMC/RAU0-3/2026;
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668, z póź. zm.).

2. Sylwetka Doktoranta

Pan mgr inż. Faisal Saleem jest doktorantem w Szkole Doktorskiej Politechniki Śląskiej, afiliowanym w Katedrze Pomiarów i Systemów Sterowania na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Józef Wiora, prof. Pol. Sl., a promotorem pomocniczym dr inż. Alicja Wiora.

W zakresie tematyki rozprawy Kandydat jest współautorem trzech artykułów w czasopismach z listy JCR: w Measurement (IF 5,6; 200 pkt MNIŚW), w Scientific Reports (IF 3,9; 140 pkt) oraz w Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation (IF 3,8; 100 pkt), przy czym w dwóch pierwszych jest pierwszym autorem. Ponadto Doktorant jest współautorem czterech prac konferencyjnych (m.in. Conference on Automation 2024 i 2026, SPA 2025, IMEKO TC-6 2025) oraz jednego opublikowanego abstraktu. Poza tematyką rozprawy Kandydat jest współautorem pięciu dalszych artykułów w czasopismach indeksowanych (PLoS One, Journal of Systems Engineering and Electronics, Frontiers in Energy Research, Energies, Applied Mathematics – A Journal of Chinese Universities).

Na podkreślenie zasługuje udokumentowana współpraca międzynarodowa Kandydata, m.in. z prof. Delfimem F. M. Torresem (University of Aveiro, Portugalia) oraz z prof. Guido Maione i prof. Paolo Lino (Politecnico di Bari, Włochy). Dorobek publikacyjny Doktoranta, wskazuje, iż rozprawa jest efektem systematycznej, wieloletniej pracy badawczej, a jej istotne wyniki uzyskały już pozytywną ocenę recenzentów czasopism o zasięgu międzynarodowym.

3. Charakterystyka rozprawy

3.1. Zawartość i układ rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Faisala Saleema pt. „Measurement uncertainty of quantity modelled with non-integer order differ-integral equations”, przygotowana w dyscyplinie automatyka, elektronika, inżynieria elektryczna i technologie kosmiczne, obejmuje 185 stron numerowanych (plik PDF liczy 221 stron), w tym: strony wstępne (strony tytułowe, dedykacja, oświadczenie autora, oświadczenie o wykorzystaniu narzędzi sztucznej inteligencji, podziękowania, streszczenia w języku angielskim i polskim, wykaz publikacji, spis treści, spisy rysunków, tabel i listingów, wykaz akronimów oraz wykaz oznaczeń), część zasadniczą złożoną z dziewięciu rozdziałów (s. 1–168), załącznik A (s. 169–170) oraz spis literatury (s. 171–185). Praca zawiera 67 rysunków, 28 tabel i 4 listingi. Bibliografia liczy 184 pozycje, w tym osiem współautorstwa Kandydata oraz podstawowe dokumenty normatywne metrologii. Rozdziały 5 i 8 rozwijają treści wcześniej opublikowane przez Kandydata.

W rozprawie nie sformułowano tezy w klasycznym rozumieniu; zdefiniowano natomiast sześć celów badawczych (Obj.1–Obj.6), trzy hipotezy (H.1–H.3) oraz pięć deklarowanych wkładów własnych (C.1–C.5). Powiązanie celów, hipotez, metodyki i wkładów z poszczególnymi rozdziałami zestawiono w tabeli 1.1 – rozwiązanie to Recenzent ocenia jako bardzo dobre i porządkujące lekturę.

Rozdział 1 wprowadza w problematykę niepewności pomiaru wielkości dynamicznych, formułuje problem badawczy (brak eksperymentalnie zweryfikowanych metod oceny niepewności zależnej od czasu dla modeli niecałkowitego rzędu), motywację, cele, hipotezy oraz wkłady własne, a także omawia strukturę pracy.

Rozdział 2 stanowi część przeglądową. Przedstawiono podstawy metrologii (niepewność typu A i B, niepewność rozszerzoną, metrologię dynamiczną), definicje operatorów niecałkowitego rzędu (Grünwalda-Letnikowa, Riemanna-Liouville’a, Caputo) oraz metody ich praktycznej realizacji za pomocą aproksymacji całkowitego rzędu (Oustaloup i jego warianty, CFE, metoda Matsudy, metoda Carlsona, metoda Charefa, M-SBL). Rozdział zamyka przegląd literatury dotyczącej modelowania, oceny niepewności dynamicznej i projektowania regulacji oraz jednoznacznie wskazuje na ograniczenia stanu wiedzy.

Rozdział 3 opisuje trzy obiekty badawcze o narastającej złożoności: symulacyjny model inercji ułamkowego rzędu bez opóźnienia, symulacyjny model nieliniowego układu dwuwirnikowego (TRAS) oraz laboratoryjne stanowisko do pomiaru strumienia przepływu wody. Omówiono konfigurację sprzętową, algorytmy akwizycji danych dla wejścia oraz charakter zebranych danych, w tym znaczenie okresu próbkowania.

Rozdział 4 zawiera analizę dokładności siedmiu metod aproksymacji operatorów ułamkowych – w stanie ustalonym, w dziedzinie czasu i w dziedzinie częstotliwości – oraz analizę wpływu wyboru aproksymacji na jakość regulacji, na przykładzie optymalnego regulatora FO-PID zaprojektowanego dla TRAS przy ograniczeniach na przeregulowanie, niedoregulowanie i czas regulacji.

Rozdział 5 przedstawia identyfikację modeli całkowitego rzędu stanowiska przepływowego: modeli trzeciego i drugiego rzędu identyfikowanych metodą SQP, redukcję rzędu z zastosowaniem PCA (Principal Component Analysis) oraz konstrukcję modelu LPV (Linear Parameter Varying), w którym parametry zmieniają się wraz z częstotliwością wejściową, co pozwala opisać cały zakres pracy jednym modelem.

Rozdział 6 jest jednym z dwóch kluczowych rozdziałów rozprawy. Zaproponowano w nim identyfikację modelu ułamkowego rzędu (jeden biegun i jedno zero niecałkowitego rzędu, pięć parametrów) sformułowaną jako zadanie optymalizacji nieliniowej z ograniczeniami, z realizacją operatorów w ujęciu Grünwalda-Letnikowa. Zadanie zaimplementowano w środowisku AMPL i na platformie NEOS-server, wykorzystując przebiegi uczące i pozostałe przebiegi jako zbiór testowy. Zbadano odporność modelu nominalnego na perturbacje parametrów, wpływ rzędu obciążenia współczynników GL oraz wpływ wyboru solwera, a wyniki porównano z modelami całkowitego rzędu drugiego i trzeciego.

Rozdział 7 przedstawia założenia dla regulatora FO-PI dla TRAS t.j. strojenie regulatorów, obliczenie parametrów regulatora oraz sterowanie. Równania modelu rozwiązano wykorzystując oprogramowanie Matlab R2024b wykorzystując zestaw procedur z biblioteki Optimization. Rozdział zamyka analiza wpływu metody aproksymacji operatora ułamkowego (Oustaloup, Matsuda, Charef) na odpowiedź układu zamkniętego.

Rozdział 8 stanowi zasadnicze osiągnięcie rozprawy. Dla trójparametrowego modelu ułamkowego rzędu z opóźnieniem, zidentyfikowanego niezależnie dla 200 przebiegów pomiarowych, wykazano (test Kołmogorowa–Smirnowa, wykresy kwantylowe) normalność rozkładu parametrów, wyprowadzono zależne od czasu współczynniki czułości odpowiedzi modelu względem parametrów i – stosując prawo propagacji niepewności wraz z macierzą kowariancji parametrów – wyznaczono niepewność zależną od czasu. Podejście porównano z metodą filtracji cyfrowej, a następnie rozszerzono na układ zamknięty z regulatorem FO-PI, analizując dodatkowo wpływ implementacji operatora ułamkowego (GL, RL, Caputo) na ocenę niepewności.

Rozdział 9 podsumowuje wyniki, zestawia realizację celów i weryfikację hipotez, jawnie formułuje ograniczenia zastosowanych metod oraz definiuje kierunki dalszych badań.

Załącznik A zawiera treść zapytania (promptu) użytego do redakcji językowej tekstu.

3.2. Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Wykorzystane piśmiennictwo Recenzent ocenia jako właściwie dobrane i aktualne. Spis literatury liczy 184 pozycje, w przeważającej części artykuły z czasopism o zasięgu międzynarodowym z ostatnich kilkunastu lat, przy czym istotna ich część pochodzi z lat 2020–2025. Właściwie zestawiono także literaturę „kanoniczną” obu łączonych w rozprawie obszarów: z jednej strony dokumenty normatywne metrologii oraz prace dotyczące niepewności dynamicznej, z drugiej – monografie i prace źródłowe rachunku ułamkowego oraz metod aproksymacji operatorów niecałkowitego rzędu. Przegląd stanu wiedzy w rozdziale 2 jest uporządkowany tematycznie (modelowanie, modele pomiarowe i niepewność dynamiczna, projektowanie regulacji) i – co Recenzent uznaje za jego istotną zaletę – kończy się jawnym

wskazaniem luk badawczych, które następnie przekładają się na cele rozprawy. Sposób cytowania jest jednolity, a odniesienia do prac własnych Kandydata są wyraźnie oznaczone.

W ocenie recenzenta kandydat mógł również bardziej podkreślić literaturę traktującą o metodach identyfikacji parametrów modeli ułamkowego rzędu przy nierównomiernym próbkowaniu oraz metodach bayesowskich i typu Monte Carlo w ocenie niepewności modeli dynamicznych. Metody Monte Carlo są wzmiankowane, jednak nie są dyskutowane jako naturalny punkt odniesienia dla zaproponowanego podejścia.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

4.1. Uwagi ogólne

Tematyka rozprawy jest aktualna i istotna zarówno naukowo, jak i praktycznie. Modele niecałkowitego rzędu są dziś powszechnie stosowane do opisu układów o dynamice rozproszonej, z efektami pamięci oraz o charakterystykach trudnych do odwzorowania modelami klasycznymi; równolegle rośnie zapotrzebowanie na rzetelną, zależną od czasu ocenę niepewności wyników pomiarowych, czego klasyczny aparat GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) nie zapewnia. Zestawienie tych dwóch obszarów, tj. metrologii i rachunku ułamkowego, jest zabiegiem oryginalnym i, zdaniem Recenzenta, wypełnia rzeczywistą lukę w literaturze. Za szczególnie cenne uznaję to, iż rozprawa nie zatrzymuje się na poziomie rozważań teoretycznych: zaproponowane metody zweryfikowano na danych z rzeczywistego stanowiska laboratoryjnego. Spełniona jest zatem triada charakterystyczna dla nauk technicznych, tj. eksperyment, modelowanie matematyczne i walidacja.

Cel pracy sformułowano poprawnie i – co należy podkreślić – rozłożono go na sześć celów szczegółowych (Obj.1–Obj.6) o narastającym stopniu złożoności, powiązanych jawnie z hipotezami H.1–H.3 i deklarowanymi wkładami C.1–C.5. Cel główny, tj. opracowanie spójnego aparatu oceny niepewności pomiaru wielkości opisywanych równaniami różniczkowo-całkowymi niecałkowitego rzędu, został osiągnięty. Recenzent zwraca jednak uwagę, iż układ celów jest niejednorodny: cele Obj.1, Obj.2 i Obj.5 mają charakter analiz pomocniczych (odpowiednio: dokładność aproksymacji, modelowanie całkowitego rzędu, reguły nastawiania regulatora), natomiast właściwy przedmiot rozprawy, wskazany w jej tytule, realizują cele Obj.3, Obj.4 i Obj.6. W konsekwencji rozdziały 4, 5 i 7, obejmujące blisko połowę objętości części zasadniczej, pełnią wobec rozdziałów 6 i 8 rolę przygotowawczą – co jest uzasadnione metodycznie, lecz zaciera proporcje pracy i nie zostało to dostatecznie jasno zaakcentowane we wstępie.

Zastosowane metody badawcze są dobrane właściwie i zastosowane kompetentnie. Są to: analiza dokładności aproksymacji operatorów ułamkowych w dziedzinie czasu i częstotliwości (symulacje w środowisku MATLAB/Simulink), identyfikacja typu „czarna skrzynka” sformułowana jako zadanie optymalizacji nieliniowej z ograniczeniami – rozwiązywane solwerem IPOPT na platformie NEOS-server w środowisku AMPL, a także procedurami fminsearch i lsqnonlin w MATLAB, redukcja rzędu modelu z użyciem PCA/SVD, projektowanie regulatorów FO-PI metodą częstotliwościową, statystyczna weryfikacja

rozkładów parametrów (test Kołmogorowa-Smirnowa, wykresy kwantylowe) oraz prawo propagacji niepewności wraz z macierzą kowariancji parametrów zgodnie z GUM. Konsekwentne stosowanie tych samych obiektów badawczych w kolejnych rozdziałach oraz jednolitych wskaźników jakości (np. RMSE, MAE, MAPE, analiza residuów) sprawia, że wyniki są porównywalne. Bardzo dobrze oceniam także jawne przedstawienie kodu konfiguracji stanowiska i akwizycji danych (listingi 3.1–3.3) oraz pseudokodu zadania optymalizacji (listing 6.1) – jest to praktyka sprzyjająca powtarzalności badań.

Wykorzystanie darmowej platformy NEOS-server do rozwiązywania zadania identyfikacji uznaję za pomysłowe i praktyczne. Jednocześnie, jako element metodyki, wymaga ono komentarza: przetwarzanie danych pomiarowych na zewnętrznej platformie obliczeniowej oraz brak kontroli nad wersją solwera ograniczają odtwarzalność wyników w dłuższym horyzoncie czasowym. Rozprawa zyskałaby na dodaniu informacji o wersjach oprogramowania i wartościach parametrów sterujących solwera, przy pomocy których uzyskano prezentowane rezultaty.

Rozprawa jest napisana zrozumiałym językiem angielskim i poprawnie zredagowana pod względem technicznym (spójna numeracja, dobra jakość rysunków, kompletne wykazy akronimów i oznaczeń). Na osobną uwagę zasługuje przejrzyste oświadczenie o wykorzystaniu narzędzi sztucznej inteligencji wyłącznie do redakcji językowej, wraz z załączeniem treści użytego zapytania (załącznik A) – jest to praktyka wzorcowa. Paradoksalnie jednak przyjęte w tym zapytaniu wytyczne (m.in. wymóg, aby zdania nie przekraczały 15 słów) odbiły się niekorzystnie na warstwie stylistycznej: znaczna część tekstu ma charakter bardzo krótkich, oderwanych od siebie zdań, w wielu miejscach powtarzających tę samą treść (por. np. początki rozdziałów 6 i 8 oraz podsumowania rozdziałów). Utrudnia to śledzenie wywodu, szczególnie w partiach wyprowadzeń, gdzie potrzebne jest zdanie złożone wyrażające zależność przyczynową. W przypadku ewentualnej przyszłej publikacji pracy warstwę językową należałoby pod tym względem przeredagować.

4.2. Oryginalne osiągnięcia rozprawy

Do oryginalnych osiągnięć Kandydata Recenzent zalicza w szczególności:

- sformułowanie zadania identyfikacji modelu niecałkowitego rzędu jako zadania optymalizacji nieliniowej z ograniczeniami, w którym operatory ułamkowe realizowane są bezpośrednio w ujęciu Grünwalda-Letnikowa, z uwzględnieniem obszaru przejściowego i ustalonego w funkcji celu oraz z dodatkowym członem wygładzającym wymuszającym zgodność prędkości zmian odpowiedzi modelowanej i mierzonej (rozd. 6, wzory (6.9)–(6.11)); wraz z eksperymentalną weryfikacją, że tak zidentyfikowany model nominalny odwzorowuje odpowiedź stanowiska dokładniej niż modele całkowitego rzędu drugiego i trzeciego, przede wszystkim w obszarze przejściowym;
- wyprowadzenie reguł nastawiania regulatora FO-PI prowadzących do układu trzech równań na parametry regulatora, wraz z odwzorowaniem wymagań czasowych (czas regulacji, przeregulowanie) na wymagania częstotliwościowe oraz analizą wpływu metody aproksymacji operatora ułamkowego na jakość regulacji (rozd. 7);

- opracowanie bezpośredniego, działającego w dziedzinie czasu aparatu oceny niepewności propagowanej przez parametry zidentyfikowanego modelu niecałkowitego rzędu, opartego na zależnych od czasu współczynnikach czułości odpowiedzi modelu względem parametrów oraz na macierzy kowariancji parametrów, z zastosowaniem prawa propagacji niepewności (rozdz. 8, wzory (8.7)–(8.13)). Zdaniem Recenzenta jest to zasadnicze osiągnięcie rozprawy;
- eksperymentalne wykazanie – na podstawie 200 niezależnych przebiegów pomiarowych – że parametry identyfikowane opracowaną procedurą podlegają rozkładowi normalnemu, co uprawnia ich probabilistyczny opis, oraz wykazanie, że wyznaczone tą metodą pasmo niepewności obejmuje zmierzone odpowiedzi układu;
- rozszerzenie zaproponowanego aparatu na układ zamknięty, tj. wyprowadzenie współczynników czułości odpowiedzi układu z regulatorem FO-PI i ocenę niepewności propagowanej w dynamice regulowanej, wraz z analizą porównawczą trzech implementacji operatora ułamkowego (Grünwalda-Letnikowa, Riemanna-Liouville’a, Caputo) i wykazaniem spójności otrzymywanych wyników;
- systematyczną analizę porównawczą siedmiu metod aproksymacji operatorów ułamkowych oraz wykazanie, że wybór metody i jej rzędu wpływają nie tylko na dokładność odwzorowania dynamiki, lecz również na zapasy stabilności i jakość regulacji – wraz ze wskazaniem kompromisu między dokładnością a złożonością implementacji (rozdz. 4).

Osiągnięcia te mają wymiar zarówno teoretyczny, jak i użyteczny, a zdefiniowane w rozdziale 9 kierunki dalszych badań (adaptacyjny dobór rzędu obciążenia, regularyzacja, podejście bayesowskie, rozkłady inne niż normalny, układy wielowymiarowe) pozwalają stwierdzić, iż tematyka może być przez Kandydata rozwijana i stanowić podstawę budowy własnego zespołu badawczego.

4.3. Uwagi krytyczne i pytania

Poniższe uwagi mają charakter dyskusyjny i w większości sprowadzają się do pytań, na które oczekuję odpowiedzi w trakcie publicznej obrony. Nie umniejszają one wartości naukowej rozprawy.

1. Właściwość transmitancji modelu z rozdziału 6. Na s. 92 Doktorant stwierdza, iż „the corresponding TF is constrained to be proper in order to preserve the causality”, natomiast w zadaniu (6.9) narzucono ograniczenie $\alpha \geq \beta + \varepsilon$. Dla struktury (6.1), tj. $G(s) = K(s^\alpha + a)/(s^\beta + b)$, warunek ten oznacza, że stopień licznika przewyższa stopień mianownika, a więc transmitancja jest niewłaściwa. Potwierdzają to zidentyfikowane wartości średnie (rys. 6.4): $\bar{\alpha} = 1,54$ przy $\bar{\beta} = 0,189$. Jest to sprzeczność wewnętrzna, którą należy wyjaśnić.

2. Nierównomierne próbkowanie a implementacja operatora Grünwalda-Letnikowa. W rozdziale 3 (s. 38) Doktorant przekonująco argumentuje, że zmienny okres próbkowania jest głównym źródłem niepewności danych, a przepróbkowanie do stałej siatki wprowadzałoby dynamikę nieobecną w układzie fizycznym. Tymczasem definicja (8.1) oraz obliczenia w rozdziałach 6 i 8 zakładają jednorodny krok, przyjęty jako $\Delta t = 0,03$ s, a jednocześnie – jak podano na s. 38 – wartość średnia okresu próbkowania jest wynikiem przepróbkowania.

Pytania: (i) jak formalnie uzasadnić stosowanie stałokrokowej aproksymacji GL do danych o zmiennym okresie próbkowania; (ii) jaki jest udział tak wprowadzonego błędu w całkowitym budżecie niepewności; (iii) czy rozważano warianty operatora GL na siatce nierównomiernej lub interpolację z jawnym uwzględnieniem jej wkładu do niepewności? W obecnej postaci składowa ta nie jest kwantyfikowana, co osłabia wniosek o „konserwatywności” proponowanej oceny.

3. Sposób wyznaczenia współczynników czułości. Streszczenie oraz rozdział 8 deklarują, iż zależne od czasu współczynniki czułości „derived analytically from FO differ-integral equations”. Na s. 146, pod wzorami (8.8)–(8.10), znajduje się natomiast stwierdzenie: „This work calculates the partial derivatives numerically using the forward-difference scheme in MATLAB”. Deklaracja i realizacja nie są zatem zgodne i wymagają ujednolicenia. Czy wynik uzyskany metodą różnic skończonych wprzód porównano z różnicą centralną lub z różniczkowaniem złożonym (complex-step) w celu kontroli błędu obcięcia i zaokrągleń?

4. Weryfikacja normalności rozkładów parametrów. W tabeli 8.1 podano wartości p wyznaczone funkcją `kstest` w środowisku MATLAB. Funkcja ta w wywołaniu domyślnym weryfikuje hipotezę o zgodności ze standardowym rozkładem normalnym $N(0, 1)$; dla parametrów o wartościach średnich rzędu 1,18 czy 0,19 hipoteza taka zostałaby odrzucona. Proszę zatem o wyjaśnienie, czy dane standaryzowano przed wykonaniem testu. Rozstrzygnięcie tej kwestii jest istotne, ponieważ założenie (A2) leży u podstaw całego aparatu.

5. Opóźnienie w modelu z rozdziału 8. Na s. 142 przyjęto „an arbitrary delay time of $\tau = 2,2$ s”, podczas gdy identyfikacja w rozdziale 6 dała wartość średnią $\bar{\tau} = 2,08$ s przy rozrzucie od ok. 1,6 do 2,4 s (rys. 6.8). Opóźnienie nie wchodzi do wektora parametrów $p = [\alpha, a, K]$, a zatem jego zmienność nie jest uwzględniana w bilansie niepewności, choć – jak pokazuje rys. 6.8 – jest ona porównywalna z rozrzutem pozostałych parametrów. Zatem dlaczego τ ustalono arbitralnie, a nie identyfikowano wraz z pozostałymi parametrami?

6. Redukcja rzędu z zastosowaniem PCA (rozd. 5). Analizę głównych składowych zastosowano nie do sygnałów, lecz do zbioru parametrów modeli zidentyfikowanych dla różnych częstotliwości wejściowych. Nie jest jasne, w jaki sposób rzutowanie w przestrzeni parametrów modelu trzeciego rzędu (sześć parametrów) prowadzi do modelu drugiego rzędu (cztery parametry) – rzutowanie zmienia bowiem wartości parametrów, a nie strukturę i rząd transmitancji. Ponadto zapis (5.4)–(5.9) jest niespójny wymiarowo: przy $P \in \mathbb{R}^{(p_n \times Q)}$ oraz rozkładzie $P = USV^T$ macierz U ma wymiar $p_n \times p_n$, tymczasem w tekście przyjęto $U \in \mathbb{R}^{(n_r \times p_n)}$, a rekonstrukcję zapisano jako $\tilde{P} = U^T \hat{P}$, co nie odtwarza wymiaru zbioru pierwotnego. Proszę o uporządkowanie tego spostrzeżenia i o wyjaśnienie relacji między liczbą zachowanych składowych n_r a rzędem otrzymanego modelu.

7. Weryfikacja hipotez i sformułowanie „100% verified”. W tabeli 1.1 zadeklarowano, że hipotezy H.1 i H.2 zostały zweryfikowane jako „(100% verified)”. Takie sformułowanie jest zbyt kategoryczne dla wyników uzyskanych na jednym stanowisku laboratoryjnym. Istotniejsze jest jednak, iż w odniesieniu do H.1, tj. tezy o dokładniejszym odwzorowaniu układu nieliniowego mniejszą liczbą parametrów, przedstawione dowody nie są rozstrzygające: model ułamkowy ma pięć parametrów, a więc dokładnie tyle samo, co model całkowitego rzędu

(6.13), przy czasie obliczeń wyższym ok. dwukrotnie (tab. 6.11) i przy jakości porównywalnej w stanie ustalonym. Proszę o precyzyjne wskazanie, w jakim zakresie hipotezę H.1 uznano za potwierdzoną.

8. Wpływ aproksymacji operatora na ocenę niepewności. Rozdział 4 wykazuje, iż metoda aproksymacji operatora ułamkowego istotnie wpływa na odpowiedź układu, a rozdział 7 – że wpływa również na jakość regulacji. W rozdziale 8 porównano natomiast wyłącznie trzy definicje operatora (GL, RL, Caputo), pomijając wpływ realizacji aproksymacyjnej (np. filtrów Oustaloupa), która w praktyce implementacyjnej jest nieunikniona. Skoro deklarowanym celem Obj.1 była właśnie analiza wpływu aproksymacji, domknięcie tego wątku w ocenie niepewności byłoby naturalne. Czy taka analiza była prowadzona?

5. Praktyczne zastosowanie uzyskanych wyników

Wyniki rozprawy mają wyraźny wymiar użyteczny. Zaproponowany aparat oceny niepewności zależnej od czasu może być stosowany bezpośrednio w metrologii dynamicznej – wszędzie tam, gdzie wynik pomiaru raportowany jest jako przebieg czasowy, a nie jako pojedyncza wartość: w układach przepływowych, napędach, robotyce oraz w systemach monitorowania procesów przemysłowych.

Wartość praktyczną mają również wyniki pomocnicze. Analiza porównawcza metod aproksymacji operatorów ułamkowych (rozdz. 4) dostarcza projektantowi konkretnych przesłanek doboru metody i jej rzędu, wraz z ilościowym opisem kompromisu między dokładnością a złożonością implementacji. Reguły nastawiania regulatorów FO-PI (rozdz. 7) są gotowe do zastosowania w praktyce inżynierskiej i – co potwierdzono na dwóch obiektach – zapewniają płaskość charakterystyki fazowej, a więc odporność na ograniczone zmiany parametrów obiektu. Wyniki dotyczące wpływu rzędu obciążenia współczynników GL oraz doboru solvera (rozdz. 6) mają bezpośrednie znaczenie dla implementacji modeli ułamkowych w układach czasu rzeczywistego, w których zasoby obliczeniowe są ograniczone. Za wartościowe uznaję też jawne wskazanie granic stosowalności proponowanego modelowania (s. 124) – modeli ułamkowego rzędu nie należy stosować do obiektów o dobrze opisanej dynamice całkowitego rzędu ani w zastosowaniach o ostrych ograniczeniach czasu obliczeń.

Zauważalny potencjał aplikacyjny mają wreszcie prace Kandydata dotyczące cyfrowych bliźniaków oraz konfiguracji stanowiska pomiarowego wraz z akwizycją danych – opisane na tyle szczegółowo (listingi, schemat P&ID, wykaz aparatury), że umożliwiają odtworzenie eksperymentu w innym laboratorium.

6. Uwagi szczegółowe i edytorskie

Rozprawa jest zredagowana starannie, poniższe uwagi mają zatem charakter porządkowy (numery stron odnoszą się do numeracji rozprawy):

- s. 8: „The uncertainty component are evaluated as Type A and Type B” (niezgodność liczby) oraz „the inability to perform infinite measurements limits enforces the use” – zdanie wymaga przeredagowania;

- s. 33, wzór (3.9): w mianowniku transmitancji kąta odchylenia zapisano „ $s^3 + 6s + 5,01s$ ” – brakuje potęgi przy jednym ze składników (zapewne $6s^2$);
- nie wyjaśniono, dlaczego w rozdziale 4 nie uwzględniono metody CA;
- niekonsekwentne stosowanie skrótów np. XO-XOM; RO-ROM etc.
- s. 92: granice parametrów zapisano jako „ $0,1 \leq \alpha\beta \leq 5$ ”, co należy rozumieć jako $0,1 \leq \alpha, \beta \leq 5$; zapis wymaga poprawienia, tym bardziej że zidentyfikowane wartości α przekraczają 1;
- s. 140: „implementable FO-FO controllers” – powinno być FO-PI;
- s. 146: w definicji współczynnika czułości zapisano $\partial y_e / \partial k$, podczas gdy parametrem jest K;
- s. 162: „the proposed provides provides a more conservative estimate” – zdanie niekompletne i z powtórzeniem;
- streszczenie (wersja angielska): „the covariance matrix of the the normally distributed parameters” oraz „GrünwaldLetnikov” – brak łącznika w nazwisku; podwojone „the the” występuje także na s. 48, 62, 74 i 121;
- w tabeli 1.1 sformułowania „Achieved” i „100% verified” zestawione w jednej kolumnie mieszają dwie różne kategorie (realizacja celu i weryfikacja hipotezy) – czytelniejsze byłoby ich rozdzielenie;
- rysunki przeniesione z prac własnych (m.in. 3.3–3.5) są prawidłowo oznaczone jako reprodukcje, jednak wskazane byłoby jednolite podanie warunków licencji w podpisach;
- warstwa językowa – zgodnie z uwagą ogólną w podrozdziale 4.1 – zyskałaby na zmniejszeniu liczby bardzo krótkich zdań i usunięciu powtórzeń między wprowadzeniami i podsumowaniami rozdziałów 6, 8 i 9.

7. Podsumowanie

Opiniowana rozprawa doktorska zasługuje na pozytywną ocenę. Sformułowane powyżej uwagi krytyczne i pytania mają na celu wyłącznie doprecyzowanie wyводу oraz jego pogłębienie w trakcie publicznej obrony i nie umniejszają wartości naukowej pracy. Kandydat podjął zagadnienie trudne, wymagające swobodnego poruszania się w czterech obszarach jednocześnie – metrologii, identyfikacji układów, rachunku ułamkowym i teorii sterowania – i wykazał, że opisowi wielkości modelowanych równaniami różniczkowo-całkowymi niecałkowitego rzędu można nadać rygorystyczną formę metrologiczną. Na podkreślenie zasługuje spełnienie triady charakterystycznej dla nauk technicznych, tj. eksperymentu, modelowania matematycznego i walidacji, a także konsekwentne, uczciwe wskazywanie ograniczeń proponowanych metod – co Recenzent uznaje za świadectwo dojrzałości naukowej Doktoranta.

Stwierdzam, iż rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Do oryginalnych rezultatów należą przede wszystkim: bezpośredni, działający w dziedzinie czasu aparat oceny niepewności propagowanej przez parametry zidentyfikowane modeli niecałkowitego rzędu, oparty na zależnych od czasu współczynnikach czułości i macierzy kowariancji parametrów, wraz z jego eksperymentalną weryfikacją oraz rozszerzeniem na

układ zamknięty; sformułowanie identyfikacji modelu ułamkowego jako zadania optymalizacji z operatorami w ujęciu Grünwalda-Letnikowa; a także reguły nastawiania regulatorów FO-PI wyprowadzone metodą częstotliwościową.

Stwierdzam również, iż rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie automatyka, elektronika, inżynieria elektryczna i technologie kosmiczne oraz Jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Za dowody tego uznaję: kompetentny przegląd stanu wiedzy zamknięty jawnym wskazaniem luk badawczych, prowadzenie eksperymentów na stanowisku laboratoryjnym wraz z opracowaniem procedur akwizycji danych, poprawne stosowanie aparatu statystycznego i metrologicznego oraz dorobek publikacyjny obejmujący trzy artykuły w czasopismach z listy JCR w tematyce rozprawy.

Rozprawa jest pracą samodzielną i nie stanowi wyodrębnionej części pracy zbiorowej, a udział Kandydata w powstaniu prac stanowiących jej podstawę uznaję za wiodący.

8. Wniosek końcowy

Stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgr. inż. Faisala Saleema pt. „Measurement uncertainty of quantity modelled with non-integer order differ-integral equations” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a Kandydat wykazał ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, inżynieria elektryczna i technologie kosmiczne oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Faisala Saleema pt. „Measurement uncertainty of quantity modelled with non-integer order differ-integral equations” spełnia warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668, z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

.....
Prof. dr hab.  ż. Wojciech Sumelka