

Prof. dr hab. inż. Stefan Domek
Katedra Automatyki i Robotyki
Wydział Elektryczny
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

Szczecin, 15.09.2023 r.

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia **19. 09. 2023**
Zarejestrowano pod nr
Podpis *dm*

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Edyty Gawin
„Zastosowanie rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu
w modelowaniu cyfrowym procesów przewodnictwa cieplnego”

1. PODSTAWA PRAWNA, PRZEDMIOT I ZAKRES RECENZJI

Podstawą sporządzenia recenzji były pismo dr. hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, elektronika i elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 6.07.2023 oraz umowa o dzieło z dnia 20.07.2023 r. podpisana przez dr. inż. Mikołaja Skowrona, Prodziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Edyty Gawin „Zastosowanie rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu w modelowaniu cyfrowym procesów przewodnictwa cieplnego”. Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Krzysztof Oprzędkiewicz.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261) recenzja zawiera ocenę rozprawy doktorskiej pod względem spełnienia warunków określonych w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 z późniejszymi zmianami) stawiane rozprawom doktorskim w odniesieniu do dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych (Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 11 października 2022 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych – Dz. U. z 2022 r., poz. 2202), odpowiadającej wcześniejszej dyscyplinie Automatyka, elektronika i elektrotechnika, określonej w Rozporządzeniu MNiSW z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych – Dz. U. z 2018 r., poz. 1818.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA, ZAKRES I CEL ROZPRAWY

Zdecydowana większość otaczających nas zjawisk, procesów i obiektów, zarówno fizycznych, jak i abstrakcyjnych, charakteryzuje się złożonymi właściwościami dynamicznymi. Użycie do ich opisu klasycznych równań różniczkowych często sprawia, że uzyskane modele matematyczne nie są wystarczająco dokładne. Dotyczy to procesów z różnych dziedzin życia i nauki, na przykład biologicznych, medycznych, społecznych, socjo-kognitywnych czy ekonomicznych, ale również wielu zjawisk występujących w systemach technicznych, transportowych, informacyjnych czy w układach sterowania i nadzoru.

Niewystarczającą precyzję tradycyjnych liniowych modeli dynamicznych szczególnie zauważa się przy próbach opisu procesów wymiany ciepła, układów mechanicznych o małej sztywności i lepko-sprężystych, zjawisk wibroakustycznych, materiałów porowatych i niejednorodnych, mieszanin i aerozoli czy zjawisk elektrochemicznych, na przykład zachodzących w nowoczesnych bateriach litowo-jonowych i tzw. superkondensatorach.

Jednym ze sposobów pokonania tych trudności są próby wykorzystania rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu, będącego uogólnieniem klasycznego rachunku różniczkowego rzędu całkowitego. Mimo iż pierwsze dyskusje teoretyczne dotyczące pochodnych niecałkowitego rzędu pojawiły się już kilka wieków temu, prawdziwy rozwój teorii równań różniczkowych niecałkowitego rzędu nastąpił wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów oraz opracowaniem odpowiednich narzędzi numerycznych. Ukazało się wiele prac wprowadzających rozmaite definicje pochodnych ułamkowych, badających ich właściwości i podających sposoby ich wykorzystania do opisu zjawisk dynamicznych. Wiele jednak problemów, zarówno natury teoretycznej, jak i obliczeniowej, pozostało wciąż nierozwiązanych.

Autorka rozprawy postanowiła zbadać możliwości zastosowania rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu do stworzenia nowych przestrzennych modeli procesu wymiany ciepła w ośrodku jednowymiarowym, konkurencyjnych pod względem efektywności w stosunku do standardowych modeli rzędu całkowitego a także łatwych do implementacji w komputerowych systemach automatyki.

Wybór takiego problemu badawczego uważam za właściwy i w pełni uzasadniony. Zastosowane podejście teoretyczne, metody analizy i narzędzia świadczą o tym, że rozprawa doktorska mgr inż. Ewy Gawin mieści się w zakresie dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne i wpisuje się w aktualny i istotny dla niej nurt badań.

Swoje idee Autorka zawarła w trzyczęściowej tezie rozprawy mówiącej, że:

1. Jest możliwe podanie dokładnego opisu procesu przewodnictwa cieplnego w postaci ciągłego w czasie, nieskończenie wymiarowego równania stanu niecałkowitego rzędu. Model taki spełnia założenie o dekompozycji widma i jego skończenie wymiarowa estymacja może być użyta do modelowania procesu cieplnego z użyciem np. środowiska Matlab.
2. Poprawny opis procesu cieplnego może być także dokonany z użyciem modeli zastępczych w postaci transmitancji hybrydowych, zawierających zarówno część całkowitego rzędu, jak i część rzędu ułamkowego.

3. W przypadku rozważanej klasy systemów rozważane modele ciągłe w czasie mogą zostać przekształcone do postaci modeli dyskretnych o złożoności obliczeniowej umożliwiającej ich implementację na platformie typowego sterownika przemysłowego, np. sterownika PLC z użyciem znormalizowanych narzędzi programistycznych opisanych przez standard 61131.3.

Jej słuszność postanowiła wykazać przeprowadzając szerokie rozważania teoretyczne oraz liczne badania symulacyjne i eksperymenty laboratoryjne podporządkowane uzyskaniu pięciu celów szczegółowych. Zaproponowane metody realizacji postawionych celów oceniam jako oryginalne, trafnie dobrane i dające potencjalną możliwość uzyskania interesujących rezultatów teoretycznych i praktycznych.

3. ZAWARTOŚĆ MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Recenzowana rozprawa liczy łącznie 196 stron. Właściwy tekst pracy o objętości 94 stron poprzedzony jest streszczeniami w języku polskim i angielskim, spisem treści, spisem rysunków i tabel, a zakończony trzema dodatkami oraz wykazem źródeł bibliograficznych.

Merytorycznie pracę można podzielić na kilka części, zgodnie z zakresem zapowiedzianym przez Autorkę w Uwagach wstępnych. Każda część opisuje zagadnienia znane z literatury, ale zawiera również oryginalne dokonania Doktorantki, o charakterze zarówno naukowym, jak i praktycznym. I tak:

Rozdział 1 przywołuje podstawowe pojęcia i definicje rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu, przypomina podstawowe typy frakcyjnych modeli dynamicznych oraz porządkuje informacje na temat ciągłych i dyskretnych aproksymacji całkowitego rzędu, w tym użytych w pracy: aproksymatora różnicy wstecznej – FOBD (ang. Fractional Order Backward Difference), aproksymatora w postaci filtra o nieskończonej odpowiedzi impulsowej – CFE (ang. Continuous Fraction Expansion).

W rozdziale 2 opisano stanowisko laboratoryjne z eksperymentalnym obiektem cieplnym o jednym wejściu i trzech wyjściach służącym do badań procesu wymiany ciepła w ośrodku jednowymiarowym. Podano charakterystyki statyczne i skokowe obiektu oraz klasyczne modele całkowitego rzędu w przestrzeni stanu oraz w postaci transmitancyjnej, dokładnej i zastępczej: Strejca i Küpfmüllera.

Kolejne dwa rozdziały są opisem zasadniczych dokonań Doktorantki. W rozdziale 3 zaproponowano dla omawianego procesu przewodnictwa cieplnego w ośrodku jednowymiarowym:

- oryginalne ciągłe modele rzędu niecałkowitego, zdefiniowane w przestrzeni stanu, oparte na równaniach różniczkowych cząstkowych typu parabolicznego, w trzech wersjach:
 - z niecałkowitymi rzędami dynamiki względem czasu oraz względem długości,
 - z niecałkowitym rzędem dynamiki względem czasu oraz całkowitym rzędem względem długości,

- z całkowitym rzędem dynamiki względem czasu oraz rzędem niecałkowitym względem długości.

Modelem referencyjnym był tu model z całkowitymi rzędami obu dynamik („po czasie” i „po długości”);

- model dyskretny niecałkowitego rzędu w przestrzeni stanu. Dla takiego modelu Doktorantka sformułowała i udowodniła warunki konieczne i dostateczne tzw. praktycznej stabilności oraz przeprowadziła analizę teoretyczną optymalności jego niecałkowitego rzędu i okresu próbkowania;
- wybrane modele zastępcze w postaci transmitancji hybrydowej, częściowo niecałkowitego rzędu i ich skończeniowymiarowe aproksymacje ciągłe i dyskretne.

Dla wszystkich rozważanych modeli Doktorantka dokonała oceny ich dokładności i zbieżności oraz przeprowadziła identyfikację optymalnych parametrów w sensie kryterium MSE (ang. Medium Square Error).

W rozdziale 4 przedstawiono wyniki obszernych badań eksperymentalnych implementacji podstawowego operatora niecałkowitego rzędu s^α na platformach PLC firmy SIEMENS (SIMATIC S7 1200 oraz SIMATIC S7 1500) z użyciem aproksymacji FOBD i CFE. Przeprowadzono optymalizację rzędu i identyfikację parametrów wybranych modeli oraz testy dokładności i szybkości działania tych aproksymacji.

W ostatnim rozdziale podsumowano osiągnięte cele szczegółowe rozprawy oraz wskazano na możliwe dalsze kierunki badań, m.in. na ocenę przydatności wybranych metaheurystycznych metod optymalizacji do poprawy jakości modeli niecałkowitego rzędu. Jedną z takich metod wykorzystano w Dodatku C co wskazuje, że Autorka podjęła próby kontynuacji badań.

W zakończeniu rozprawy podano liczący 94 pozycje spis wykorzystanych źródeł bibliograficznych uporządkowanych w kolejności powoływania się na nie w tekście pracy. Obejmują one artykuły naukowe opublikowane głównie w ostatnich kilkunastu latach, w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych, jak również liczne książki i monografie. Podano także kilka materiałów o charakterze akademickim (np. poz. [57], [58], [73]), co nie jest moim zdaniem odwołaniem właściwym dla rozpraw doktorskich.

Uzupełnieniem rozprawy są trzy dodatki o łącznej objętości 80 stron:

- A – kody źródłowe opracowanego oprogramowania w środowisku Matlab,
- B – automatycznie wygenerowana dokumentacja opracowanego oprogramowania sterownika PLC,
- C – opis wykorzystanego algorytmu optymalizacji heurystycznej Cuckoo Search.

4. OGÓLNA OCENA ROZPRAWY

Głównym celem pracy było opracowanie, analiza teoretyczna i weryfikacja numeryczna kilku różnego typu modeli niecałkowitego rzędu procesu wymiany ciepła w ośrodku jednowymiarowym. Swoje rozważania Doktorantka wywiodła z klasycznego opisu takiego

procesu w postaci równania różniczkowego cząstkowego („po czasie” i „po długości”) typu parabolicznego wykorzystując teorię półgrup Fellera w przestrzeni Hilberta. Nadrzędnym celem było sprawdzenie dokładności zaproponowanych modeli i identyfikacja ich parametrów dla konkretnego stanowiska laboratoryjnego. Autorka przedstawiła szeroką analizę teoretyczną poszczególnych modeli, m.in. sformułowała kilka warunków jakie muszą spełniać wymiar aproksymatora modelu i czas próbkowania aby zapewnić tzw. praktyczną stabilność modelu.

Kolejnym ważnym zadaniem rozprawy miała być weryfikacja modeli po ich zaimplementowaniu w sterowniku PLC. To drugie zadanie zostało wykonane pośrednio – Doktorantka sprawdziła efektywność kilku realizacji podstawowego operatora wchodzącego w skład większości modeli ułamkowego rzędu s^α , formułując wnioski dotyczące dokładności, czasu realizacji i wymaganej pamięci dla dwóch aproksymacji CFE oraz PSE.

Oceniając rozprawę warto podkreślić, że spis literatury obejmuje 16 prac współautorstwa Doktorantki (głównie z promotorem, chociaż nie tylko), ściśle związanych z tematem rozprawy doktorskiej, opublikowanych w znaczących materiałach o zasięgu międzynarodowym. Z jednej strony jest to potwierdzeniem bardzo dużej aktywności badawczej Doktorantki, z drugiej jednak, przy braku precyzyjnego opisu udziału poszczególnych współautorów publikacji utrudnia ocenę istotności wkładu Doktorantki w uzyskanie oryginalnych wyników. Na szczęście Doktorantka sumiennie przywołała poszczególne pozycje literaturowe w tekście rozprawy co pozwala pozytywnie określić znaczenie recenzowanej rozprawy w całości Jej dorobku.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że Autorka rozprawy rozwiązała postawione cele w sposób kompleksowy, właściwie przywołując źródła inspiracji i założenia proponowanych metod. Złożone zagadnienia przedstawiła w formie właściwej dla prac naukowych, tj. podając odniesienia do źródeł literaturowych, formułując odpowiednie założenia, wykazując poprawność sformułowanych twierdzeń oraz projektując odpowiednie moduły oprogramowania i weryfikując ich poprawność. Właściwości proponowanych modeli oceniła teoretycznie i zilustrowała wynikami licznych badań. Zamieściła również krytyczne dyskusje otrzymanych rezultatów.

Za najważniejsze osiągnięcia Doktorantki uważam:

- usystematyzowany opis podstaw teoretycznych rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu;
- zaproponowanie kilku różnych rodzajów i postaci modeli niecałkowitego rzędu dla procesu wymiany ciepła w ośrodku jednowymiarowym;
- analizę właściwości rozważanych modeli w zakresie dokładności oraz identyfikację ich optymalnych parametrów w sensie kryterium MSE (ang. Medium Square Error);
- przeprowadzenie obszernych badań symulacyjnych zaproponowanych modeli i szczegółową prezentację ich wyników w formie graficznej i tabelarycznej;
- przeprowadzenie obszernych badań numerycznych implementacji podstawowego operatora ułamkowego rzędu na sterownikach PLC.

5. UWAGI OGÓLNE I SZCZEGÓŁOWE

Podczas lektury rozprawy nasunęło mi się kilka wątpliwości i uwag natury ogólnej, wartych komentarza Doktorantki:

1. Edycja podrozdziału 3.2 jest nieprecyzyjna. Na przykład wielkości G^+ i A_i^+ określone wzorami (3.41) i (3.42) nie występują w rozwiązaniu (3.40). Odwołanie do wzoru (3.42) jest dopiero w równaniu (3.45), z kolei zależność (3.46) podaje nowe znaczenie G^+ .

Podobnie na stronie 70 powołano się na Twierdzenia 2 i 3, których formalnie nie ma w rozprawie, a dla Propozycji 4 do 7 nie podano żadnego uzasadnienia/dowodu.

Odnosi się wrażenie że cały fragment obejmujący wzory (3.53) – (3.60) jest niestaranną relacją z wcześniejszej publikacji Doktorantki [29]?

2. Podczas testów, inaczej niż napisano na str. 61, nie szacowano skończonego wymiaru modelu N , tylko dla wybranych wartości rzędów N wyznaczano optymalne parametry modelu. Wartości kosztów MSE zebrano w Tab. 3.5 bez podania wartości optymalnych rzędów α i β , które na szczęście umieszczono w opisach rysunków 3.10 do 3.13

Z Tab. 3.5 oraz rys. 3.9 widać, że model optymalny $\alpha \in \mathfrak{R}, \beta = \mathfrak{R}$ jest dokładniejszy niż model $\alpha \in \mathfrak{R}, \beta = 2$, chociaż dają zbliżone wyniki. Model drugi jest jednak niższego rzędu i szybciej zbieżny. Czy dla celów implementacji modelu na sterowniku PLC Autorka rozważała jakieś łączne kryterium optymalności, biorące pod uwagę równocześnie dokładność modelu i jego złożoność numeryczną, a przez to bardziej przydatne w praktyce?

3. Z czego może wynikać oscylacyjny charakter zależności MSE od rzędu N niezależnie od długości zastosowanej pamięci L widoczny w Tab. 3.9 oraz na rys. 3.16?

Podobnie czym wytłumaczyć drastyczną zmianę optymalnego modelu (3.61) w Tab. 3.10 dla wartości rzędu 2 i 3, łącznie ze zmianą różniczkowania ułamkowego rzędu na całkowanie?

4. Wyniki uzyskane przy użyciu algorytmu kukułki optymalizacji metaheurystycznej w Dodatku C są uzupełnieniem wyników pokazanych w podrozdziale 3.4, uzyskanych przy użyciu funkcji *fminsearch* Matlaba. Co mogło być przyczyną tak dużych różnic wyników obu metod, np. pokazanych w Tab. 15 i Tab. 3.13, czujnik 3? Wartości kryterium MSE są podobne, a wartości parametrów znacząco różne. Czy mogą to być minima lokalne? Która metoda optymalizacji była szybsza?

Redakcja rozprawy co do zasady jest bardzo staranna. W czasie lektury zauważyłem jedynie bardzo drobne niedociągnięcia edytorskie, np.:

- str. 15: zamiast formy osobowej „przedstawił np. [15]” powinno być „przedstawiono np. w [15]”, podobnie „zajmowali się m.in. [16], [8], [17]”;
- str. 16: znaczenie akronimów, nawet powszechnie znanych, takich jak FOBD i CFE, powinno być wyjaśnione przy pierwszym użyciu w tekście rozprawy, albo w osobnym wykazie akronimów i skrótów;

- str. 33: „na stronie [57] oraz [58]” zamiast „w pracy [57] oraz [58]”;
- str. 44: k jest wzmocnieniem modelu (2.15), a nie „współczynnikiem w stanie ustalonym”;
- str. 45: trzy ważne dla pracy wzory definiujące proponowane modele podano bez numerów;
- str. 48: zamiast „są podane w (2.2)” powinno być „są podane w podrozdziale 2.2”;
- str. 49: powinno być „wektor wyjścia” a nie „macierz wyjścia”;
- str. 82: niepoprawne sformułowania „próby czasu” i „czas próby” zamiast „okres próbkowania”;
- str. 187: niepoprawne odwołanie do równań „(3.65) i (3.65)” zamiast „(3.65) i (3.66)”;
- str. 188: w opisie Tabeli 16 powtórzono błędnie opis Tabeli 15; ten sam błąd popełniono w spisie tabel na str. 14.

Uwagi o charakterze ogólnym i zauważone błędy edycyjne w żadnym stopniu nie obniżają mojej pozytywnej oceny całości rozprawy a tym samym nie powodują konieczności jej zmian ani uzupełnień.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Mgr inż. Edyta Gawin wykazała się szeroką ogólną wiedzą w zakresie wykorzystania rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu do modelowania rzeczywistych procesów fizycznych i technologicznych.

Zadanie naukowe określone w tytule i tezach rozprawy zostało jasno sformułowane a następnie poprawnie rozwiązane przy użyciu właściwej metodyki oraz potwierdzone na drodze licznych badań symulacyjnych i eksperymentalnych wykonanych za pomocą właściwych narzędzi informatycznych i nowoczesnego sprzętu automatyki. Tym samym postawione w rozprawie cele zostały osiągnięte a teza udowodniona.

Uważam, że dokonania Doktorantki przedstawione w rozprawie stanowią zauważalny wkład w rozwój praktycznej implementacji modeli dynamicznych niecałkowitego rzędu. Autorka rozprawy wykazała, że posiada niezbędną wiedzę w zakresie reprezentowanej dyscypliny oraz że ma wystarczające predyspozycje do prowadzenia badań.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Edyty Gawin spełnia wymogi określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 z późniejszymi zmianami) stawiane rozprawom doktorskim w odniesieniu do dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, dziedzina nauk inżynierijsko-technicznych i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Edyty Gawin do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.