

Białystok, 7 września 2023r

dr hab. Ewa Pawłuszewicz, prof. PB

Politechnika Białostocka

Instytut Inżynierii Mechanicznej

Wydział Mechaniczny

ul. Wiejska 45C

15-351 Białystok

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 15. 09. 2023

Zarejestrowano pod nr

Podpis 

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Edyty Gawin pt.

*Zastosowanie rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu w modelowaniu cyfrowym
procesów przewodnictwa cieplnego*

Formalną podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Technologii Kosmicznych dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH z dnia 6 lipca 2023r wystosowane na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Technologii Kosmicznych.

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Oprządkiewicz

1. Tezy i przedmiot rozprawy

Chociaż początki rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu sięgają XVII wieku, to jego rozwój można zaobserwować od XIX wieku. Zdecydowany wzrost zainteresowaniami aplikacjami, w szczególności w teorii sterowania i szeroko pojętej automatyce, nastąpił w drugiej połowie XX wieku. Niewątpliwie duży wpływ na to ma rozwój technik i narzędzi informatycznych. Dziś rachunek niecałkowitego rzędu uważany jest za ważne narzędzie wykorzystywane między innymi w opisie zachowań systemów rzeczywistych. Często wykorzystanie metod i narzędzi tego rachunku prowadzi do lepszych, bardziej odzwierciedlających dynamikę procesów rzeczywistych, wyników modelowania. Do jednych z najpopularniejszych zastosowań aparatu niecałkowitego rzędu należą procesy dyfuzyjne i procesy wymiany ciepła. W tym obszarze można spotkać różne podejścia, w tym różne

propozycje modeli systemów ciągłych niecałkowitego rzędu, metod aproksymacji i dyskretyzacji. W szczególności analizując procesy wymiany ciepła należy zwrócić uwagę na fakt, że mogą być one modelowane za pomocą funkcji transmitancji lub też przy wykorzystaniu cząstkowych równań różniczkowych.

Autorka opiniowanej rozprawy postawiła sobie za cel stworzenie modelu procesu wymiany ciepła w ośrodku jednowymiarowym przy wykorzystaniu pochodnych niecałkowitego rzędu, a także próby implementacji otrzymanych wyników na sterowniku PLC. Jest to złożone i niełatwe, ale też interesujące zadanie. Tezy postawione w pracy przez Panią mgr inż. Edytę Gawin mówią, że:

Teza 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 aproksymacja może być użyta do modelowania procesu cieplnego z użyciem np. środowiska Matlab.

Teza 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.

Teza 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.

Zgodnie z moją wiedzą są to tezy oryginalne. Ich wykazanie prowadzi do stworzenia dobrej podstawy do praktycznych, w tym przemysłowych, implementacji rachunku niecałkowitego rzędu, między innymi w zakresie automatyzacji procesów przemysłowych. Problematyka rozprawy jest aktualna zarówno z teoretycznego jak i praktycznego punktu widzenia.

2. Koncepcja i struktura rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska składa się z czterech zasadniczych rozdziałów Wstępu i Podsumowania. Na końcu zamieszczono Bibliografię zawierającą 94 pozycje z zakresu rachunku niecałkowitego rzędu i jego aplikacji między innymi w teorii sterowania oraz automatyce, procesów dyfuzyjnych i wymiany ciepła, metod aproksymacji, równań różniczkowych cząstkowych, w tym równań niecałkowitego rzędu, programowania systemów przemysłowych, w tym sterowników PLC, dobrze odzwierciedlających istniejący stan wiedzy dotyczący tematu opiniowanej rozprawy. Na końcu pracy są dodane trzy załączniki (tzw. dodatki), zawierające kody źródłowe stworzonego przez Doktorantkę oprogramowania w Matlabie, oprogramowania PLC oraz opis algorytmu kukułki.

W rozdziale pierwszym Doktorantka przedstawia podstawowe pojęcia, w tym definicje różnych typów pochodnych niecałkowitego rzędu, oraz idee z zakresu rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu, konieczne do zrozumienia wyników przedstawionych w dalszej części rozprawy. Omawia również modele systemów dynamicznych, w tym modele transmitacyjne i modele w przestrzeni stanów, niecałkowitego rzędu, sposoby aproksymacji dedykowanych do modelowania transmitancji niecałkowitego rzędu takich jak aproksymacja Oustaloupa, Charefa, aproksymacja oparta o rozwinięcie funkcji w szereg potęgowy oraz o wykorzystanie funkcji generującej $\omega(z^{-1})$.

Kluczowe do udowodnienia postawionych przez Doktorantkę tez są następujące trzy rozdziały. W rozdziale drugim jest szczegółowo omówiony obiekt cieplny z jednym wejściem i trzema wyjściami, który był wykorzystywany w badaniach eksperymentalnych. Jest też omówiony klasyczny model matematyczny całkowitego rzędu, opisujący przewodzenie ciepła w obiekcie jednowymiarowym oraz jego modele zastępcze w postaci transmitacyjnej całkowitego rzędu Kupfmüllera oraz Strejca.

W rozdziale trzecim, są podane i szczegółowo omówione proponowane modele niecałkowitego rzędu rozważanego obiektu względem czasu oraz względem długości, ciągle w czasie, zarówno w przestrzeni stanu jak też modele zastępcze w postaci hybrydowej niecałkowitego rzędu. Są też omawiane własności modeli częściowo niecałkowitego rzędu, czyli modeli, w których jedna z pochodnych względem czasu lub względem długości jest pochodną rzędu całkowitego. Celem praktycznej implementacji otrzymanych wyników analizowane są modele z czasem dyskretnym rozważanego obiektu, badana jego praktyczna stabilność, optymalny rząd oraz okres próbkowania. We wszystkich omawianych przypadkach została dokonana identyfikacja parametrów proponowanych modeli oraz zweryfikowana dokładność tych modeli.

W czwartym rozdziale jest omówiona implementacja podstawowego operatora niecałkowitego rzędu s^α na platformie PLC przy wykorzystaniu platform SIEMENS SIMATIC S7 1200 oraz SIEMENS SIMATIC S7 1500. Operator ten jest aproksymowany za pomocą znanych przybliżeń PSE (ang. *power series expansion*) i CFE (ang. *continuous fractional expansion*), otrzymane w ten sposób wyniki zostały przeanalizowane i porównane.

3. Oryginalne osiągnięcia i znaczenie wyników Autora dla dyscypliny

Celem pracy było

1. opracowanie, analiza teoretyczna i weryfikacja doświadczalna ciągłych modeli niecałkowitego rzędu w przestrzeni stanu opisujących proces przewodnictwa cieplnego. Modele te powinny bazować na dobrze znanych wynikach i być ich uogólnieniem niecałkowitego rzędu;
2. opracowanie nowej, efektywnej obliczeniowo dyskretnej metody rozwiązywania równań stanu niecałkowitego rzędu, bazującej na aproksymacji CFE;

3. opracowanie, analiza teoretyczna i weryfikacja doświadczalna modeli dyskretnych w przestrzeni stanu, wykorzystujących aproksymacje dyskretne FOBD (ang. *fractional order backward difference*) i CFE;
4. opracowanie i weryfikacja doświadczalna owych modeli transmitacyjnych niecałkowitego rzędu dla rozważanego procesu przewodnictwa cieplnego. Modele te mają mieć postać hybrydowych (zawierających część całkowitego i niecałkowitego rzędu) transmitancji ciągłych i dyskretnych;
5. implementacja na sterowniku PLC podstawowego elementu ułamkowego z użyciem aproksymacji FOBD i CFE oraz testy dokładności i szybkości działania tych aproksymacji.

Do głównych osiągnięć przedstawionych przez Autorkę rozprawy należy zaliczyć:

- porównanie modelu klasycznego całkowitego rzędu i opracowanych modeli niecałkowitego rzędu procesu przewodnictwa cieplnego określonych w przestrzeni stanu oraz ich weryfikacja eksperymentalna;
- zaproponowanie modeli dyskretnych procesu przewodnictwa cieplnego w dziedzinie czasu przy wykorzystaniu dyskretnych aproksymacji FOBD i CFE oraz podanie nowej, efektywnej obliczeniowo metody rozwiązywania równań różnicowych bazującej na aproksymacji CFE;
- opracowanie i eksperymentalna weryfikacja hybrydowych modeli transmitacyjnych niecałkowitego rzędu;
- przeprowadzenie testowych badań dyskretnych implementacji na sterowniku PLC podstawowego elementu niecałkowitego rzędu (przy użyciu dyskretnych aproksymacji FOBD oraz CFE) i wykazanie tym samym, że może on być zaimplementowany na platformie PLC ze spełnieniem wymagań dotyczących dokładności i długości pamięci.

Dorobek naukowy Doktorantki obejmuje 16 współautorskich publikacji, z czego 5 to artykuły w czasopismach indeksowanych w bazie JCR takich jak *Archives of Control Sciences*, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences*, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 6 rozdziałów w serii monografii *Advances in Intelligent Systems and Computing* wydawnictwa Springer, a pozostałe to publikacje między innymi w materiałach cyklicznych konferencji międzynarodowych takich jak *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, indeksowanych między innymi w bazach Web of Sciences i Scopus, oraz w materiałach innych konferencji z zakresu automatyki.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Podczas analizy opiniowanej rozprawy nasuwają się pewne uwagi krytyczne wynikające głównie z szerokiego zakresu pracy.

- Dlaczego do opisu modelu niecałkowitego rzędu rozważanego obiektu są używane dwa różne typy pochodnych: w odniesieniu do czasu jest to pochodna Caputo, a w odniesieniu do długości – pochodna Rieszsa?
- W definicji operatora Caputo-Fabrizio (Definicja 11) pojawia się współczynnik $M_n(\alpha)$, o którym wiemy tylko, że jest funkcją normującą. Brakuje dokładnej definicji tego współczynnika. Czy istnieje relacja między tym współczynnikiem a współczynnikiem M_α występującym w formule (1.18)?
- Formuły (3.4), (3.5) i (3.15) wymagają, choćby szkicowego, uzasadnienia.
- W dowodzie Propozycji 1 (zamiast „Propozycja” może lepszym sformułowaniem jest „Stwierdzenie”?) nie jest jasne, które wyrażenia reprezentują funkcjonal liniowy gęsto zdefiniowany na $H^2(0,1)$ (druga linia pod wzorem (3.23)).
- Skąd wynika, że dla każdej długości pamięci rozwiązanie równania (3.49) przyjmuje postać (3.51)?
- Należałoby uściślić zakres rzędu α : informacja pod podpisem rys. 1.4 sugeruje, że $\alpha \in (0; 1)$, natomiast w tekście jest jedynie informacja, że $\alpha < 1$.
- Założenie $\gamma \neq 1$ w definicji pochodnej przestrzennej Rieszsa rzędu niecałkowitego (definicja 17) należałoby rozszerzyć do $\gamma \neq 2k, k \in \mathbb{Z}$.
- Uwagi edycyjne: drobne przeoczenia typu zgubione indeksy w oznaczeniu parametrów μ, ν w linii pod wzorem (1.35); w 6 linii od dołu na stronie 50 powinno być (3.18) zamiast (3.32); Doktorantka czasem też stosuje język potoczny typu „funkcja grzejnika”, „funkcja czynnika”; brakuje konsekwencji w stosowanej terminologii: raz jest używane pojęcie „ułamkowy rząd”, innym razem „niecałkowity rząd”; tabela 4.4 i rysunek 4.3 mogłyby być bardziej czytelne; w Bibliografii pozycje [26] i [27] dotyczą tej samej publikacji.

5. Podsumowanie recenzji i wniosek końcowy

Przedstawiona rozprawa doktorska jest interesującą i ważną próbą wykorzystania pochodnych niecałkowitego rzędu do modelowania i analizy procesu rozchodzenia się ciepła w ośrodku jednowymiarowym. Zastosowanie pochodnych niecałkowitego rzędu, z jednej strony jest tu dużym wyzwaniem, z drugiej zdecydowanie lepiej niż klasyczne pochodne cząstkowe pozwala opisać model rzeczywisty, co też Doktorantka pokazała w przedstawionej rozprawie. W tym celu przeanalizowała między innymi dokładność proponowanego modelu w sensie funkcji kosztu minimalno-

kwadratowego, dokonała identyfikacji parametrów modelu, zbadala zbieżność oraz dokładność testowanych modeli. W celu cyfrowej implementacji modeli ciągłych Doktorantka sformułowala warunki analityczne dotyczące zapewnienia praktycznej stabilności rozważanego układu w zależności od rozmiaru modelu, czasu próbkowania i długości pamięci (Propozycje 4 -7) przy zapewnieniu akceptowalnej dokładności prezentowanego dyskretnego modelu niecałkowitego rzędu. Warunki te są bardzo istotne, w szczególności, z aplikacyjnego punktu widzenia. Doktorantka zaprezentowała też implementację podstawowego operatora niecałkowitego rzędu s^α , decydującego m.in. o czasie wykonania operacji, na platformie PLC, rezygnując przy tym z badania całej transmitancji $\frac{1}{Ts^{\alpha+1}}$. Co jest ważne, szczególnie z punktu widzenia aplikacji przemysłowych, do przy implementacji testowanego elementu niecałkowitego rzędu do oprogramowania sterownika PLC użyła standardowych elementów dostępnych na platformie TIA PORTAL v13. Wyniki przeprowadzonych testów i analiz pokazują, że implementacja na sterowniku PLC elementu niecałkowitego rzędu przy zastosowaniu aproksymacji CFE może być rekomendowana do stosowania, szczególnie tam, gdzie implementacje elementu rzędu całkowitego są trudne.

Praca została skomponowana poprawnie, wykazuje, że Doktorantka posiada podstawową i rozszerzoną wiedzę oraz kompetencje w zakresie rachunku niecałkowitego rzędu i jego implementacji w układach i systemach automatyki, ze szczególnym zwróceniem uwagi na sterowniki PLC, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Otrzymane w rozprawie wyniki pokazują, że została one wykonana w obszarze dyscypliny **automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**, postawiony cel został osiągnięty, a tezy wykazane. Należy dodać, że przedstawione w poprzednim punkcie uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają pozytywnej oceny opiniowanej rozprawy doktorskiej.

W związku z przedstawioną powyżej oceną rozprawy doktorskiej stwierdzam, że rozprawa doktorska *Zastosowanie rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu w modelowaniu cyfrowym procesów przewodnictwa cieplnego* spełnia wymogi określone w artykule 13, ust. 1, Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65 z 4 marca 2003 poz.595 z późniejszymi zmianami). W związku z artykułem 179 ust.1 Ustawy z dnia 3 lipca 2018r Przepisy wprowadzające ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 30 sierpnia poz.1669 z późniejszymi zmianami) wnioskuję o dopuszczenie Pani mgr inż. Edyty Gawin do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

E. Paulusowa