

Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki

Politechnika Łódzka

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY DYSCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ**

Tytuł oryginalny: Zastosowania pochodnych ułamkowych w elektromagnetyzmie i teorii obwodów.

Tytuł w języku angielskim: Applications of Fractional Derivatives in Electromagnetism and Circuit Theory.

Autor rozprawy: mgr inż. Damian Trofimowicz

1. Jaki jest problem naukowy (teza) Rozprawy i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

Badania naukowe prezentowane w Rozprawie dotyczyły możliwości zastosowania pochodnych ułamkowego rzędu w analizie pól elektromagnetycznych oraz obwodów elektrycznych. Biorąc pod uwagę fakt, że istnieje wiele definicji tego typu pochodnych, nie wszystkie z nich mogą być użyte w rozważanych przez Doktoranta aplikacjach. W tym celu należało określić odpowiednie warunki stosowalności tego typu pochodnych i zbadać, które z rozważanych definicji je spełniają. Wyniki przeprowadzonych analiz teoretycznych wykazały, że pochodna ułamkowego rzędu wg definicji Marchaud spełnia wszystkie niezbędne warunki, co pozwoliło sformułować Autorowi następującą tezę badawczą:

- zastosowanie pochodnej ułamkowej w dziedzinie czasu opartej o definicję Marchaud zapewnia poprawność modelowania matematycznego systemów elektromagnetycznych i obwodów elektrycznych ułamkowego rzędu.

2. Czy Autor rozwiązał postawiony problem i czy użył do tego właściwych metod dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metrologią prowadzenia badań naukowych?

Główne osiągnięcia Doktoranta zostały przedstawione w Rozdziałach 2-4. Rozpoczął On swoje badania od określenia 7 właściwości pochodnych ułamkowego rzędu niezbędnych do zastosowań w elektromagnetyzmie oraz teorii obwodów. Następnie Autor przeprowadził ewaluację wybranych definicji tego rodzaju pochodnych, Liouville'a, Liouville'a-Caputo, Riemanna-Liouville'a, Caputo, Marchaud oraz Grünwalda-Letnikova wykazując ostatecznie, że pochodna wg definicji Marchaud posiada wszystkie wymagane właściwości. Pochodna ta wykorzystuje w swojej definicji funkcję gamma Eulera rozszerzającą pojęcie silni na zbiór liczb rzeczywistych i zespolonych.

W Rozdziale 3 na wstępie Autor zaprezentował równania Maxwella sformułowane przy użyciu pochodnych czasowych ułamkowego rzędu wg definicji Marchaud. W drugiej części tego rozdziału przedstawił On równania elementów obwodów opisane przez modele ułamkowego rzędu takie jak rezystor, cewka i kondensator. Doktorant wykazał, że szczególnie ważne jest spełnienie własności półgrupy dotyczącej łączności i przemienności wykonywanych działań, a jej niespełnienie prowadzi w dziedzinie czasu do sprzeczności w opisie pól elektrycznego i magnetycznego, bądź też napięcia i prądu w linii transmisyjnej.

Natomiast w Rozdziale 4 Doktorant przedstawił metody rozwiązywania równań Maxwella dla nieustalonych pól elektromagnetycznych opisanych przez pochodne ułamkowego rzędu skupiając się na powszechnie stosowanej numerycznej Metodzie Różnic Skończonych (MRS) oraz schemacie Cranka-Nicolsona, w którym wykorzystuje się średnią arytmetyczną pochodnej obliczonej w dwóch kolejnych chwilach czasowych. W szczególności Doktorant zbadał warunki stabilności tej metody określając maksymalny rozmiar kroku czasowego przy użyciu algorytmu globalnego znajdowania pierwiastków i biegunów zespolonych (ang. Global Roots and Poles Finding - GRPF). Wykorzystał On też funkcję Mittag-Lefflera będącą uogólnieniem funkcji wykładniczej wprowadzając do niej jednocześnie pewne uproszczenia, co umożliwiło mu symulację problemów opisanych macierzami znacznych rozmiarów. Podsumowując należy zatem stwierdzić, że Autor udowodnił sformułowaną w Rozprawie tezę używając do tego właściwych metod i dowodząc tym samym, że posiada znaczne umiejętności związane z metodyką prowadzenia badań naukowych.

3. Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?

Tematyka poruszana w Rozprawie przez Doktoranta jest ze wszech miar aktualna. Pochodne ułamkowego rzędu są ważnym narzędziem w modelowaniu matematycznym złożonych systemów, gdyż umożliwiają one uwzględnianie efektów pamięciowych związanych z ich historią. Pochodna ułamkowa oparta na definicji Marchaud umożliwia modelowanie efektów dyspersyjnych, a także pewnych efektów pamięciowych w elementach obwodów elektrycznych, w tym zjawisko histerezy. Ponadto niektóre elementy układów elektronicznych, w tym superkondensatory czy też memrystory powinny być modelowane z wykorzystaniem pochodnych rzędu ułamkowego.

Regulatory oparte na pochodnych ułamkowego rzędu umożliwiają też modelowanie systemów energetycznych zawierających odnawialne źródła energii, w szczególności dotyczy to ich dynamiki wynikającej z nieciągłości produkcji energii i wahań obciążenia sieci, co wydatnie poprawia ich stabilność. Pochodne ułamkowe usprawniają także analizę sygnałów o właściwościach fraktalnych i niestacjonarnych, np. sygnałów biomedycznych.

4. Na czym polega oryginalny dorobek Autora i jakie jest jego znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?

Rozprawa ma co prawda charakter teoretyczny, lecz Autor wyraźnie wskazał możliwe obszary praktycznego zastosowania wyników przeprowadzonych przez Niego badań w dyscyplinie, której dotyczy Rozprawa. W szczególności do dorobku własnego Autora można zaliczyć:

- określenie warunków stosowalności pochodnych ułamkowego rzędu w elektromagnetyzmie oraz teorii obwodów,
- wykazanie, że pochodna wg Marchaud spełnia sformułowane uprzednio wymagania,
- znalezienie rozwiązań analitycznych równań Maxwella zawierających pochodne ułamkowego rzędu,
- zaproponowanie uproszczonego sposobu obliczania funkcji Mittag-Lefflera dla argumentów macierzowych, co wydatnie ułatwia symulacje problemów opisanych macierzami o znacznych rozmiarach,
- użycie algorytmu GRPF do badania stabilności MRS w symulacjach stanów nieustalonych dla problemów opisanych równaniami zawierającymi pochodne ułamkowego rzędu,
- implementację w MRS bezwzględnie stabilnego schematu rozwiązywania Cranka-Nicolsona do symulacji propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku opisanym równaniami Maxwella zawierającymi pochodne ułamkowego rzędu.

5. Czy Rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autora, wiedzy na zaawansowanym poziomie, o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk technicznych oraz o charakterze szczegółowym, odpowiadającej obszarowi prowadzonych badań naukowych?

Niewątpliwie Autor w teoretycznej części Rozprawy wykazał się bardzo dobrą znajomością obszarów wiedzy ogólnej z zakresu matematyki prezentując obszerny rys historyczny dotyczący rozwoju rachunku różniczkowo-całkowego, poczynwszy od czasów starożytnych do teraźniejszości. Omówił On też przykładowe zastosowania pochodnych ułamkowego rzędu w różnych dziedzinach nauki. Doktorant posiada także dużą wiedzę o charakterze szczegółowym dotyczącą bezpośrednio tematyki Rozprawy, o czym świadczy to, że z powodzeniem przeprowadził symulacje uzyskując rozwiązania równań Maxwella zawierających pochodne ułamkowego rzędu.

6. Czy Rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury naukowej z dyscypliny której dotyczy?

Rozprawa zawiera 96 numerowanych stron. Na wstępie zamieszczono niezbędne oświadczenia, streszczenia w języku polskim i angielskim, podziękowania, a także spis treści oraz nomenklaturę. Zasadnicza część Rozprawy jest podzielona na 5 rozdziałów, a na jej zakończenie zamieszczono bibliografię oraz spisy rysunków i tabel, a także dodatek ilustrujący metodę obliczania wartości funkcji Mittaga-Lefflera dla argumentów macierzowych. Lista cytowanych w Rozprawie źródeł bibliograficznych liczy 107 pozycji o różnorodnym charakterze: książki, artykuły w czasopismach naukowych i konferencyjne oraz strony internetowe, w tym 22 opublikowane po 2020 r. Doktorant jest współautorem 8 cytowanych w Rozprawie publikacji.

Pochodne ułamkowego rzędu są obecnie jednym z najdynamiczniej rozwijających się działów matematyki i znajdują swoje zastosowania w różnych dyscyplinach naukowych. W recenzowanej Rozprawie Autor skupił się na możliwości ich wykorzystania w analizie pól elektromagnetycznych oraz obwodów elektrycznych. Biorąc pod uwagę mnogość istniejących definicji tych pochodnych Doktorant wytypował pochodną zgodną z definicją Marchaud, jako tę która nie narusza głównych zasad modelowania systemów elektromagnetycznych i obwodów elektrycznych oraz zgodną dla pewnych wartości jej parametrów z definicją pochodnej Grünwalda-Letnikova. Niewątpliwie Autor we właściwy sposób dokonał wyboru źródeł, a ich analiza pozwoliła uzasadnić aktualność podjętej w Rozprawie tematyki, a także sformułować tezę badawczą, co świadczy o Jego dobrej znajomości tematyki, której dotyczy Rozprawa.

7. Jakie są wady i słabe strony Rozprawy?

Niewątpliwie główną wadą recenzowanej Rozprawy jest to, że została ona napisana w sposób utrudniający identyfikację wkładu własnego Doktoranta. W niektórych podrozdziałach początkowo informuje On co prawda, że powstały one na podstawie publikacji, których jest współautorem (min. [25, 60, 75-6, 81-2]), lecz następnie większość referencji w tych podrozdziałach odnosi się do prac innych naukowców (np. [77-8, 80, 83-6]), w tym Promotora Rozprawy ([69], [71], [73], [87], [93]). Wszystko to sprawia, że można odnieść wrażenie, iż Doktorant nie omawia własnych osiągnięć.

Ponadto pełne zrozumienie tekstu Rozprawy i jej rzetelną ocenę utrudnia częste odwoływanie się Autora do innych publikacji, np. „dokładne wzory można znaleźć w tabeli 9.1 w [1]” (s. 19), „patrz dyskusja na początku Rozdziału 2 w [1]” (s. 19), „patrz rozdział 19 w [1] ... patrz rozdział 5.4 w [1] i rozdział 1.3.1 w [31]” (s. 19), „omówiona jest w rozdziale 3.2 w [33] ... kontrprzykłady (związane z ułamkowymi równaniami różniczkowymi) są przedstawione w [38] (Przykład 6.2 Uwaga 5)” (s. 22), „([39] Propozycja 11, 12)” (s. 22), „(równanie (9) w [74])” (s.37-8), „odwołajmy się do twierdzenia 6.1 w [84] i równania (4) w [85]” (s. 50), „przypadek omówiony w twierdzeniu 5 w [92]” (s. 95), „na podstawie twierdzenia 6 w [107]” (s. 95). Należałoby chociaż pokrótce omówić treści, do których Doktorant się odnosi, aby umożliwić weryfikację poprawności prezentowanych stwierdzeń.

Inne, mniej ważne uwagi szczegółowe dotyczące strony formalno-merytorycznej recenzowanej Rozprawy można przedstawić następująco:

- w Podrozdziale 1.1 wyraźnie odczuwa się brak referencji literaturowych, szczególnie dotyczy to równań (1.1-4),
- uwzględnienie ładunku i prądu magnetycznego w równaniach Maxwella jest dyskusyjne, gdyż pole magnetyczne jest bezźródłowe (Równania 3.1-4 na s. 29),
- nie do końca wiadomo na czym polega metoda referencyjna do której wielokrotnie odwołuje się Autor, min. w podpisie do Rys. 4.3, a także czym różni się ona od tej zaproponowanej przez Doktoranta w Rozprawie,
- czym kierował się Autor przy wyborze konkretnych wymuszeń w symulacjach, których wyniki zaprezentowano na Rys. 4.3-4 oraz 4.10,
- prezentowane w Rozprawie wyniki symulacji ograniczone do przypadków jednowymiarowych, powstaje zatem pytanie czy zaproponowane przez Autora rozwiązania można by zaadaptować i wykorzystać do analizy struktur wielowymiarowych,
- zamieszczenie materiału dotyczącego obliczania funkcji Mittag-Lefflera dla argumentów macierzowych w Dodatku A wydaje się niecelowe, doskonale wkomponowuje on się w treść Rozdziału 4 na s. 60.

Pod względem edytorskim Rozprawa jest przygotowana bardzo starannie, choć można mieć pewne zastrzeżenia, szczególnie co do dość niekonwencjonalnego sposobu zamieszczania referencji literaturowych, niezgodnego z kolejnością występowania poszczególnych pozycji, np. [26], [1], [27] (s. 19), [28, 37, 29] (s. 21), [35], [33], [34] (s. 28), [75, 25, 76] (s. 42). Poza tym odwołania takie jak [11, 12, 13, 14] (s. 13) można zapisać jako [11]-[14], lub [11-14]. Ponadto zasadnicza część tekstu Rozprawy prawie czterdzieści razy w różnych formach fleksyjnych zawiera odwołanie do „elektromagnetyzmu i (teorii) obwodów (elektrycznych)”, czasami nawet wielokrotnie w tym samym akapicie (np. s. 16 i 80). Prawdopodobnie zostało to spowodowane tym, że Doktorant starał się uzasadnić stosowalność uzyskanych wyników badań w dyscyplinie, której dotyczy Rozprawa. Inne szczegółowe uwagi dotyczące strony edytorsko-językowej Rozprawy zestawiono poniżej:

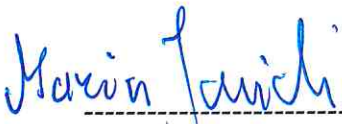
- w planie pracy (Podrozdział 1.4) Autor mówi o elementach RLC ułamkowego rzędu, raczej należałoby mówić o elementach opisywanych relacjami ułamkowego rzędu,
- wrażenie „teza głoszona w rozprawie” (s. 15, ostatni akapit) jest nazbyt pompatyczne, może sformułowana w rozprawie,
- dalej w tym samym akapicie „spełnia wymagane wcześniej właściwości”, może lepiej posiada omawiane wcześniej właściwości,
- René Descartes najczęściej po polsku nazywany jest Kartezjuszem (s. 17),
- bezpośrednio po Równaniu (2.1) należałoby także przytoczyć definicję funkcji Gamma Eulera oraz wyjaśnić jej znaczenie,
- sformułowanie „podstawą, na której bazuje wprowadzenie do tematu” (s. 19, 2 akapit), nie jest zbyt zreżne,
- „definicja pochodnej ułamkowej Marchaud może być obliczona” (s. 25), definicji nie można obliczać,
- stosowanie litery C do oznaczenia ścieżki całkowania w Podrozdziale 3.3 jest nieco mylące, szczególnie że w Podrozdziale 3.3.2 ta sama litera oznacza pseudopojemność,
- prędkość fali elektromagnetycznej występuje już w Równaniu 3.57, a zatem powinna ona być zdefiniowana nieco wcześniej na s. 39,

- pod koniec Rozdziału 3 autor trzykrotnie wspomina o równaniach telegraficznych, w literaturze znane są one raczej jako równania telegrafistów,
- co Autor rozumie przez sygnał analityczny (bezpośrednio przed Rys. 4.1, s. 48),
- Rysunek 4.2 nie prezentuje żadnych jednostek na obu osiach, nie wiadomo czy jest to skutek przeprowadzenia normalizacji wspomnianej na s. 45, należałoby dokładnie wyjaśnić znaczenie przedstawionych liczb,
- Autor stwierdza, że „Pierwszy punkt pokazuje klasyczny sposób uzyskiwania rozwiązania dla modeli całkowitego rzędu. Następny punkt prezentuje nowe podejście do modeli ułamkowego rzędu” (Podrozdział 4.2.1 s. 49 na dole). Po pierwsze zaprezentowano tu tylko modele rzędu ułamkowego, a wspomniany układ treści został użyty dopiero w Podrozdziale 4.2.2,
- pod koniec s. 59 Autor dwukrotnie użył pierwszej osoby liczby mnogiej, kogo miał na myśli,
- wykresy na Rys. 4.3-4, jak również 4.10 są nieczytelne, zbyt mały rozmiar czcionki, nie widać nakładających się linii (np. można było dla jednej metody użyć cienkich linii czarnych, a dla drugiej grubszych zielonych, aby uwidocznili oba przebiegi),
- „macierzami dwuprzekątnymi danymi odpowiednio przez (1) i (2)” (linia pod Rys. 4.3), można się tylko domyślać, że chodzi o równania, informacja o tym, że można je znaleźć w Dodatku A, jest podana później,
- skąd biorą się narastające fluktuacje zmierzonych wartości czasu obliczeń względem modelu widoczne na Rys. 4.5, jaka jest wartość współczynnika determinacji, jak wygląda wykres błędu względnego,
- osie na Rys. 4.6-7 są niewidoczne,
- algorytm GRPF dwukrotnie, na s. 70 i s. 72, nazwany jest GPRF,
- „przebiegi mierzone” (s. 76, w. 7 od dołu), prezentowane są wyniki symulacji a nie pomiarów,
- Göttingen powinno być napisane z wielkiej litery (referencja [20]),
- Marchaud powinno być napisane z wielkiej litery (referencja [41]),
- Leibnitz powinno być napisane z wielkiej litery (referencja [46]),
- przydałyby się w Dodatku A referencje do Równań (1)-(2) definiujących macierze **P** i **Q**.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę?

Chociaż tematyka Rozprawy dotyczy teorii matematycznych metod modelowania, Doktorant udowodnił ich przydatność w różnych zastosowaniach praktycznych przynależących do dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne dziedziny nauk inżyniersko-technicznych. Doktorant bez wątplenia wykazał się bardzo dobrą znajomością tematyki Rozprawy, a teza badawcza sformułowana na wstępie została udowodniona. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają jedynie charakter konstruktywny i nie obniżają zdecydowanie pozytywnej oceny Rozprawy.

W konkluzji należy stwierdzić, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zatytułowana „Zastosowania pochodnych ułamkowych w elektromagnetyzmie i teorii obwodów” przygotowana przez mgr. inż. Damiana Trofimowicza w świetle Art. 186 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2023 poz. 212) spełnia kryterium c), tzn. zadowalająco spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.



Podpis