

Kraków 12 02 2015r.

Dr hab. inż. Krzysztof Oprzędkiewicz, prof. AGH
AGH, Wydział EAIIB
Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej

Recenzja
Rozprawy doktorskiej
Mgr inż. Anny Obrączki
Tytuł:
„Sterowanie procesów cieplnych z wykorzystaniem modeli
niecałkowitego rzędu”



Recenzowana praca powstała pod kierunkiem naukowym Prof. dra hab. inż. Wojciecha Mitkowskiego. Recenzję przygotowano na zlecenie Dziekana Wydziału EAIIB AGH (pismo nr WEAIIB-b/Sekr/49/15) działającego w oparciu o decyzję Rady Wydziału EAIIB z dnia 29 01 2015r.

1. Zakres i cele rozprawy

Rachunek różniczkowy niecałkowitego rzędu znany jest w matematyce od XVII wieku, ale praktyczne próby jego szerszego zastosowania datują się na początek XXI wieku. Obecnie w automatyce można wskazać dwa zasadnicze obszary zastosowań rachunku niecałkowitego rzędu.

Pierwszym z tych obszarów jest modelowanie systemów dynamicznych o złożonej dynamice. Jedną z klas procesów, dla których modele niecałkowitego rzędu są „obietujące” pod względem dokładności opisu procesu od strony fizycznej, są procesy cieplne, stanowiące jedną z najczęściej modelowanych i sterowanych klas procesów w przemyśle i wielu innych dziedzinach (np. w budownictwie).

Drugim obszarem zastosowań rachunku niecałkowitego rzędu jest projektowanie i implementacja praktyczna regulatorów niecałkowitego rzędu, w szczególności ułamkowych regulatorów PID, które w wielu sytuacjach zapewniają lepszą jakość regulacji, niż regulatory „klasyczne”.

Z tego względu cele pracy, podane na stronie 14 rozprawy należy uznać (po „przymknięciu oka” na oczywiste niedociągnięcia językowe w ich sformułowaniu) za w pełni uzasadnione, bardzo interesujące naukowo i dobrze wpisujące się w jeden z obecnych głównych nurtów automatyki. Cele te zostały podane w brzmieniu następującym:

Cel 1: Znalezienie modelu niecałkowitego rzędu, lepiej opisującego proces przepływu ciepła oraz jego weryfikacja.

Cel 2: Zaprojektowanie regulatora PID niecałkowitego rzędu dla procesu przepływu ciepła oraz porównanie go z klasycznym regulatorem PID.

2. Przegląd treści

Recenzowana rozprawa składa się z wstępu (rozdział 1), siedmiu rozdziałów zasadniczych (rozdziały 2 do 7), oraz podsumowania (rozdział 8), wykazu literatury (liczącego 72 pozycje, w tym 2 prace współautorskie Autorki rozprawy – są to

wysoko punktowane prace w czasopismach z Listy Filadelfijskiej) oraz Dodatku prezentującego opis aproksymacji układów ułamkowych stosowanych w testach symulacyjnych. Przegląd treści jest przedstawiony poniżej.

W rozdziale 2 omówiono podstawowe pojęcia z zakresu rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu. W szczególności podano trzy fundamentalne definicje pochodnej ułamkowego rzędu po zmiennej czasowej: Grunwalda-Letnikova, Riemanna-Lionville'a oraz Caputo. Podano także związki pomiędzy tymi definicjami. Podano także definicję pochodnej ułamkowej Riesz (po zmiennej przestrzennej). Omawiane pojęcia zostały zilustrowane prostymi, ale przekonującymi przykładami. W dalszej części rozdziału 2 zdefiniowano pojęcie transformaty Laplace'a dla pochodnej ułamkowego rzędu opisaną definicjami: Riemanna-Lionville'a oraz Caputo. Podano także przykład zastosowania transformaty Laplace'a do rozwiązywania równania stanu niecałkowitego rzędu.

W rozdziale 3 omówiono modele matematyczne procesu ciepłoprzewodnictwa w stanie ustalonym i nieustalonym.

Analizę rozpoczęto od modeli całkowitego rzędu. Podano ogólne nieliniowe równanie Fouriera-Kirchhoffa i jego uproszczenie do postaci równania Poissona, a później do postaci równania Laplace'a. Następnie omówiono podstawowy model procesu przepływu ciepła w stanie nieustalonym, którym jest równanie Fouriera. Równanie to w zależności od przyjętych warunków brzegowych i początkowych może przyjąć różną postać.

W dalszej części rozdziału 3 przedstawiono uogólnienia modelu Fouriera na przypadki rzędu ułamkowego (pochodne ułamkowe po czasie i zmiennej przestrzennej). Ta część 3 rozdziału jest niezwykle istotna dla dalszej części pracy, gdyż prezentowane modele będą w dalszej części pracy identyfikowane a następnie wykorzystane do syntezy algorytmów sterowania rzeczywistym obiektem cieplnym.

Rozdział 4 opisuje zaproponowaną przez Doktorantkę metodykę eksperymentów identyfikacyjnych, pozwalających na wyznaczenie liczbowych wartości parametrów modeli ułamkowych zaproponowanych w rozdziale 3.

Pierwsza część tego rozdziału prezentuje proste stanowisko doświadczalne wykorzystywane przez Doktorantkę do identyfikacji i weryfikacji rozważanych w pracy modeli ułamkowego rzędu. Stanowisko składa się z cegły ceramicznej podgrzewanej grzejnikiem elektrycznym na jednym z boków, przestrzenny rozkład temperatury wzdłuż boku prostokątnego do grzejnika jest odczytywany z użyciem kamery termowizyjnej FLIR SYSTEMS SC-660. Na podstawie obrazu z kamery można odczytać rozkłady przestrzenne temperatury na boku cegły w postaci macierzowej. Odpowiedni wybór wierszy lub kolumn tej macierzy pozwala na odczyt rozkładów temperatury wzdłuż tylko jednej zmiennej przestrzennej, co zostało później wykorzystane przez Doktorantkę. Należy tu podkreślić, że stanowisko doświadczalne, pomimo swojej prostoty, dzięki zastosowaniu termowizji pozwala na realizację wielu interesujących eksperymentów, co zostało potwierdzone w dalszej części rozprawy.

W drugiej części rozdziału 4 zaprezentowano modele zdyskretyzowane po czasie i zmiennej przestrzennej. Spośród wielu metod dyskretyzacji operatorów ułamkowych, znanych z literatury wybrano: metodę GMMP dla pochodnej Caputo oraz metodę „Shifted Grunwald” (SG) dla pochodnej Riesz. Wyboru metod dyskretyzacji dokonano na podstawie porównania rozwiązań zdyskretyzowanych po jednej lub po obu zmiennych (czas i długość) z rozwiązaniami analitycznymi równań ciągłych.

W trzeciej części rozdziału 4 dokonano identyfikacji parametrycznej zaproponowanego modelu, przy czym jednym z istotnych parametrów podczas testów było zapewnienie odporności na zakłócenia i niepewności pomiarowe. Problem identyfikacji w rozważanym wypadku sprowadza się do znalezienia zestawu parametrów modelu, minimalizujących kwadratową funkcję kosztu, która jest miarą dopasowania proponowanego modelu do rozkładu czasowo-przestrzennego temperatury otrzymanego w wyniku eksperymentów na obiekcie rzeczywistym. Z formalnego punktu widzenia poszukiwanie parametrów modelu optymalnych w sensie założonej funkcji kosztu sprowadza się do rozwiązania nieliniowego problemu najmniejszych kwadratów. Do rozwiązania tego problemu Autorka zastosowała trzy metody: metodę Levenberga-Marquardta, Gaussa-Newtona oraz metodę Simplex bazującą na algorytmie Nelder-Meada. Wyniki testów jednoznacznie wskazały, że metoda Simplex okazała się najszybsza i najbardziej odporna na zakłócenia i niepoprawny dobór punktu startowego. Na końcu rozdziału 4 zaproponowano wskaźniki statystyczne do weryfikacji modeli.

Rozdział 5 rozprawy prezentuje wyniki eksperymentów identyfikacyjnych przeprowadzonych dla wszystkich czterech modeli ułamkowego rzędu, zaprezentowanych w rozdziale 3. Metodyka eksperymentów została zaproponowana w rozdziale 4 pracy, jako model referencyjny zastosowano klasyczny model przewodnictwa cieplnego w postaci równania Fouriera całkowitego rzędu.

Analiza wyników eksperymentów pozwala na sformułowanie wniosku, że modelem najdokładniejszym w sensie przyjętego wskaźnika jakości jest model z pochodną ułamkowego rzędu po czasie oraz pochodnymi całkowitego rzędu po odległości. Dodatkowo, współczynnik dyfuzyjności termicznej a uzyskany dla tego modelu jest najbliższy wartości tablicowej.

W rozdziale 6 pracy zaproponowano i zidentyfikowano dodatkowo modele transmitancyjne procesu przepływu ciepła w rozważanym obiekcie, mające postać transmitancji z opóźnieniem drugiego lub ułamkowego rzędu. Modele te zostały później wykorzystane do syntezy układu sterowania rozważanym procesem.

Rozdział 7 poświęcony jest realizacji drugiego celu ocenianej rozprawy, jakim była synteza układu sterowania rozważanym obiektem cieplnym.

W pierwszej kolejności rozważono zastosowanie klasycznego regulatora PID, dostrojony z użyciem funkcji matlabowskiej *pidtune*, przy czym obiekt regulacji był opisany oboma zidentyfikowanymi w rozdziale 6 modelami transmitancyjnymi. Wyniki symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem środowiska MATLAB/SIMULINK wskazują na poprawność dokonanej syntezy regulatora całkowitego rzędu.

W dalszej części rozdziału zaproponowano sterowanie rozważanego obiektu z wykorzystaniem nietypowego, zaproponowanego przez Autorkę regulatora PID ułamkowego rzędu. Syntezy regulatora dokonano z użyciem podejścia częstotliwościowego. Wybór metody częstotliwościowej jest w rozważanym wypadku w pełni uzasadniony, gdyż w przypadku układów ułamkowych pozwala ona na otrzymanie dokładnych wyników analitycznych. Z wykorzystaniem tej metody Autorka zaproponowała analityczne wzory na parametry regulatora ułamkowego rzędu dla rozważanego obiektu.

W dalszej części rozdziału 7 dokonano oceny jakości regulacji w układzie z wykorzystaniem badań symulacyjnych. Rozważono oba regulatory: klasyczny PID oraz PID ułamkowego rzędu oraz oba zaproponowane w rozdziale 6 modele transmitancyjne. Do oceny jakości regulacji przy zastosowaniu obu rozważanych regulatorów została wykorzystano typowe wskaźniki jakości regulacji: czas regulacji, wartości odchyłki maksymalnej i przeregulowania oraz całkę z kwadratu uchybu regulacji.

Wyniki badań symulacyjnych jednoznacznie wskazują, że regulator ułamkowego rzędu pozwala na osiągnięcie lepszej jakości regulacji, niż klasyczny regulator PID, co jest całkowicie zgodne z oczekiwaniami.

W rozdziale 8 Doktorantka podsumowała osiągnięte wyniki oraz w bardzo trafny sposób wskazała kierunki dalszych badań, spośród których najbardziej interesujące są: budowa modeli rozchodzenia się ciepła w ośrodku dwuwymiarowym, porównanie proponowanego, nietypowego regulatora ułamkowego z innymi regulatorami ułamkowymi rozważanymi w literaturze oraz praktyczna implementacja proponowanego regulatora ułamkowego rzędu na platformie sterowania cyfrowego (np. sterownik PLC, mikrokontroler lub MATLAB z interfejsem procesowym). Wskazuje to na dobre „wyczucie” Autorki w kwestii zarówno zalet, jak i niedociągnięć własnej pracy.

Na podstawie analizy treści rozprawy można stwierdzić, że oryginalny dorobek Autorki jest prezentowany w rozdziałach od 4 do 7. Do **oryginalnych osiągnięć Autorki rozprawy można zaliczyć:**

1. Zaproponowanie, identyfikacja i weryfikacja doświadczalna ułamkowych modeli procesu przepływu ciepła w elementach ceramicznych.

2. Opracowanie metodyki eksperymentów identyfikacyjnych dla ułamkowych modeli procesów przewodnictwa cieplnego wraz ze wskazaniem odpowiednich metod numerycznych.

Należy tu zauważyć, że zakres zastosowań praktycznych proponowanych rozwiązań znacznie wykracza poza szeroko rozumianą automatykę, gdyż proponowane modele i metodyka testów mogą być po odpowiedniej adaptacji stosowane np. w budownictwie do modelowania przenikalności cieplnej materiałów budowlanych.

3. Analityczna synteza ułamkowego regulatora PID dla obiektu inercyjnego II rzędu z opóźnieniem i weryfikacja symulacyjna wyników. Wyniki podane przez Autorkę mogą bez problemu być uogólnione i zastosowane do syntezy regulatorów ułamkowych

dla wielu klas systemów z opóźnieniem i mogą to być zarówno systemy z opóźnieniem całkowitego rzędu, jak i ułamkowego.

3. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Podczas lektury recenzowanej rozprawy nasunęły się również pewne uwagi krytyczne oraz takie, które mogą być przedmiotem dyskusji. Są one następujące:

1. Zastosowane przez Autorkę zaawansowane urządzenie pomiarowe (kamera termowizyjna) pozwala na szybki i prosty pomiar pól temperatury na całej powierzchni bocznej badanego elementu. To w niemalże naturalny sposób powinno implikować budowę modelu opisującego rozkład temperatury wzdłuż dwóch współrzędnych przestrzennych, a nie tylko jednej, jak zostało to zrealizowane w pracy. Należy tu jednak zaznaczyć, że Doktorantka zasygnalizowała budowę modeli dwuwymiarowych w podsumowaniu do pracy jako jeden z kierunków dalszych badań.

2. Żaden z rozważanych modeli przewodnictwa cieplnego w postaci klasycznej (3.5) lub ułamkowej (3.6) - (3.10) nie zakłada wymiany ciepła z otoczeniem, która powinna być opisana dodatkowym składnikiem po prawej stronie równania ciepłoprzewodnictwa. W tym momencie nasuwa się pytanie, czy to uproszczenie nie jest zbyt daleko idące? Można oczekiwać, że dodanie czynnika opisującego wymianę ciepła wzdłuż powierzchni elementu powinno znacznie poprawić dokładność modelu całkowitego rzędu i porównanie takiego modelu z proponowanymi modelami ułamkowymi dałoby pełną informację o ich dokładności.

3. Postać proponowanego ułamkowego regulatora PID (s.67) powinna być lepiej uzasadniona:

- Regulator ma dość nietypową formę i jest to de facto regulator z dwiema częściami różniczkującymi (jedna niskiego rzędu, druga wyższego), jedną częścią całkującą oraz bez części czysto proporcjonalnej.
- Przyjęto, że jeden rząd ułamkowy γ wpływa na obie akcje regulatora: i całkującą, i różniczkującą, co może w znacznym stopniu ograniczyć optymalny dobór nastaw.

4. Środowisko MATLAB nie zapewnia narzędzi do modelowania systemów dynamicznych ułamkowego rzędu, będących przedmiotem niniejszej rozprawy. W celu modelowania elementów ułamkowych należy zastosować aproksymacje, które pozwalają na przybliżenie elementu typu s^a przy pomocy transmitancji skończonej wymiarowej, całkowitego rzędu, ciągłej lub dyskretnej w czasie. Taka aproksymacja – najprawdopodobniej aproksymacja Ostaloupa (ORA) musiała być w pracy stosowana, jednakże nie zostało to nigdzie powiedziane. Dodatkowo - poprawny dobór parametrów (graniczne zakresy częstotliwości oraz rząd) tej aproksymacji nie jest sprawą trywialną i pełny opis przeprowadzonych badań symulacyjnych powinien zawierać: krótki opis aproksymacji i wartości przyjętych parametrów wraz z uzasadnieniem. Opis taki można znaleźć w Dodatku do pracy, ale jest on stanowczo zbyt lakoniczny: są podane tylko transmitancje aproksymujące bez wyjaśnienia, skąd się wzięły?

4.Strona formalna

Od strony formalnej praca nie budzi większych zastrzeżeń. Tekst jest napisany zwięźle (94 strony łącznie z dodatkiem i streszczeniami). Język jest ogólnie poprawny i zrozumiały. Dostrzeżono jednak nieco usterek językowych i redakcyjnych, przykłady są podane poniżej:

s. 14 cel pracy: „Znalezienie modelu niecałkowitego rzędu, lepiej opisującego proces przepływu ciepła..” – lepiej niż co? (W domyśle klasyczny model całkowitego rzędu)
s.17 wzory (2.4) i (2.5) – warto dodać, że jako górną granicę sumy bierze się część całkowitą wyrażenia: $\frac{x-a}{\Delta x}$, warto też przypomnieć wzór opisujący rozszerzenie wzoru

Newtona $\binom{n}{k}$ na liczby rzeczywiste.

s. 63 rys 7.1 – przydałoby się oznaczenie znaków sygnałów na węźle sumacyjnym.

s.65/66: „...teoria idealnej postaci Bodego...”- określenie niezrozumiałe,

s. 68₃: „kryteria regulatorów...”-j.w.

s. 70,71 – rysunki 7.7 i 7.8 ilustrujące bezpośrednie wskaźniki jakości mogą być pokazane jako jeden rysunek (ilość symboli na żadnym z nich nie jest zbyt duża).

Podczas czytania pracy dostrzeżono też nieco „literówek” i błędów językowych, np. 11₁₂, 12⁸, 27^{1,2}, 38₁₂, 40⁶, 50⁷, 65/66.

Podczas formułowania uwag dyskusyjnych (punkt 3 recenzji) oraz uwag redakcyjnych (punkt 4) recenzent ma pełną świadomość „realiów” finalizowania rozprawy doktorskiej, w związku z czym nie wpływają one na obniżenie ogólnej, wysokiej oceny recenzowanej pracy.

5.Podsumowanie

Podsumowując, stwierdzam, że przytoczone w punktach 3 i 4 uwagi krytyczne i dyskusyjne nie umniejszają wartości naukowej ocenianej pracy. Uważam, że praca opisuje wartościowy i oryginalny dorobek naukowy Doktorantki, a zakres i poziom uzyskanych wyników badawczych odpowiada ustawowym i zwyczajowym wymaganiom, stawianym rozprawom na stopień doktora nauk technicznych. Wnioskuje zatem do Wysokiej Komisji wyłonionej z Rady Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autorki, mgr inż. Anny Obrączki do jej publicznej obrony.

