

# Streszczenie

Celem i przedmiotem niniejszej dysertacji było zaprojektowanie systemów sterowania z regulatorami PID niecałkowitego rzędu (FOPID - od ang. Fractional Order PID) dla szybkich, nieliniowych obiektów mechatronicznych. Ponadto przeprowadzono testy symulacyjne oraz doświadczenia na rzeczywistych obiektach laboratoryjnych. W rozważanym przypadku o przydatności praktycznej algorytmu decyduje nie tylko dobra jakość regulacji w sensie typowych wskaźników, lecz także własności czasowe implementacji, niezbędne do spełnienia wymagań czasu rzeczywistego. Na podstawie przeglądu stanu badań z tego zakresu można stwierdzić, iż opublikowane wyniki są stosunkowo nieliczne. Problem jest istotny z punktu widzenia praktycznych zastosowań rachunku niecałkowitego rzędu.

Praca została podzielona na sześć rozdziałów. W pierwszej kolejności przedstawiono rachunek niecałkowitego rzędu od strony teoretycznej oraz praktycznej. Wyszczególniono trzy wzory całek i różniczek w wersji ułamkowej. Są to definicje Grünwalda-Letnikova (GL), Riemanna-Liouville'a (RL) oraz Caputo (C). Przedstawiono również trzy aproksymacje przydatne do numerycznego obliczania pochodnych ułamkowego rzędu - Oustaloup Recursive Approximation (ORA), Power Series Expansion (PSE) oraz Continued Fraction Expansion (CFE). W dalszej części ukazano przykładowe, inspirowane biologicznie, metody optymalizacji służące do dostrajania parametrów regulatorów. Wyszczególniono trzy algorytmy: Grey Wolf Optimizer (GWO), Whale Optimization Algorithm (WOA) oraz Particle Swarm Optimization (PSO). Zaprezentowano również modele matematyczne obiektów, na których przeprowadzono badania. Wszystkie były nieliniowe i wymagały przygotowania sterowania w czasie rzeczywistym. Użyte urządzenia to: suwnica 3D, dwurotorowy system aerodynamiczny oraz wahadło odwrócone. W dalszej części przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań. Wzięto pod uwagę wiele wariantów sterowania różniących się między sobą ilością regulatorów FOPID/PID oraz ich ułożeniem. Ponadto zmierzono czasy wykonywania obliczeń. Rozprawę kończy podsumowanie osiągniętych wyników oraz rekomendacja przyszłych kierunków rozwoju tej dziedziny nauki.

Do każdego modelu przygotowano program w środowisku Matlab/Simulink, dzięki czemu możliwe było przeprowadzenie optymalizacji współczynników regulatorów. W tym celu skorzystano w algorytmie Grey Wolf Optimizer (GWO). Wymagał on zdefiniowania danych wejściowych oraz funkcji kosztu, innej dla każdego urządzenia. Wyniki razem z danymi z obiektów rzeczywistych przedstawiono na wykresach. Do celów porównawczych użyto wartości funkcji kosztu - dane zebrano w tabelach. Czasy wykonywania obliczeń przez regulatory również przedstawiono w formie wykresów. Ponadto uśrednione i maksymalne wartości zestawiono w tabelach.

Rekapitulując przedstawione wyniki, można wyciągnąć następujące wnioski - regulatory FOPID, korzystające z aproksymacji Oustaloup Recursive Approximation (ORA), są niewiele wolniejsze od swoich klasycznych odpowiedników. Jednak zazwyczaj FOPID pozwala na uzyskanie lepszej jakości regulacji w sensie wybranych, typowych funkcji kosztu w stosunku do PID.

13. 10. 2023

Polina Regier-Madala

# Abstract

The aim and subject of this dissertation was to design control systems with fractional order PID controllers (FOPID) for fast, nonlinear mechatronic objects. In addition, simulation tests and experiments were carried out on real laboratory objects. In the considered case, the practical usefulness of the algorithm is determined not only by good quality of regulation in the sense of typical indicators, but also by time properties of the implementation necessary to meet real-time requirements. Based on a review of the state of the art in this field, it can be concluded that there are relatively few published works on the subject. The problem is important from the perspective of practical applications of fractional order calculus.

The work has been divided into six chapters. First, the fractional order calculus is presented from the theoretical and practical point of view. Three formulas of integrals and differentials in the fractional version are specified. These are the Grünwald-Letnikov (GL), Riemann-Liouville (RL) and Caputo (C) definitions. Three approximations useful for numerically calculating derivatives of fractional order are also presented - Oustaloup Recursive Approximation (ORA), Power Series Expansion (PSE) and Continued Fraction Expansion (CFE). Next, examples of biologically inspired optimization methods for tuning controllers parameters are presented. Three algorithms are listed: Grey Wolf Optimizer (GWO), Whale Optimization Algorithm (WOA) and Particle Swarm Optimization (PSO). Mathematical models of the objects on which the research was carried out were also presented. All of them were non-linear and required real-time control calculations. The examples used were a 3D crane, a two-rotor aerodynamical system and an inverted pendulum. Experiment results were presented in the next section. Various control variants were taken into account, differing in the number of FOPID/PID controllers and their arrangement. Additionally, calculation times were measured. The dissertation ends with a summary of the achieved results and guidelines for future development directions.

For each model a program was prepared in Matlab/Simulink environment, which made it possible to optimize the controllers coefficients. For this purpose, the Grey Wolf Optimizer (GWO) algorithm was used. It required defining input data and cost function, which had to be different for every device. The results together with data from real objects are presented in graphs. The values of the cost function, which were collected in the tables, were used for comparison purposes. Calculation times by controllers are also presented on charts. Moreover, the average and maximum values were collected in the tables.

Recapitulating the presented results, the following conclusions can be drawn - FOPID controllers that use the Oustaloup Recursive Approximation (ORA) are slightly slower than their classical counterparts. However, FOPID usually allows for better control quality in terms of selected, typical cost functions compared to PID.

13. 10. 2023

Valentín Zepeda - Morán

