

Wykorzystanie rachunku niecałkowitego rzędu w sterowaniu suwnicą 3D

Michał Kędziora, Krzysztof Leszczyński, Robert Piotrowski

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Streszczenie: Suwnica 3D jest obiektem stosowanym w różnych gałęziach przemysłu. Z punktu widzenia sterowania, jest to system dynamiczny, nieliniowy i wielowymiarowy. W artykule zaprojektowano dwa układy regulacji: z klasycznym regulatorem PID oraz z regulatorem PID ułamkowego rzędu. Przedstawiono analizę porównawczą zaprojektowanych układów regulacji.

Słowa kluczowe: suwnica 3D, system sterowania, rachunek ułamkowego rzędu, optymalizacja, PID

1. Wprowadzenie

Suwnica jest urządzeniem mechaniczno-elektrycznym służącym do transportowania obiektu zgodnie z wyznaczoną trajektorią do ściśle określonego położenia końcowego. Urządzenie to, inaczej nazywane dźwignicą, pracuje w ruchu przerywanym i jest wyposażone w mechanizm opuszczania i podnoszenia. Suwnica jest przeznaczona do przenoszenia obiektów w poziomie i w pionie. Pole robocze jest ograniczone przez maksymalną szerokość i wysokość pozycjonowania.

Suwnica wykorzystywana jest najczęściej w transporcie, produkcji i budownictwie. Urządzenie to umożliwia przenoszenie ładunków o znacznej masie z punktu początkowego do końcowego przy zachowaniu bezpieczeństwa ładunku i otoczenia.

Tematy powiązane z modelowaniem oraz sterowaniem suwnicą są szeroko opisywane. W pracy [1] przedstawiono sterowanie ze sprzężeniem w przód modelem suwnicy. Bardziej zaawansowany system sterowania, a mianowicie sterowanie predykcyjne (ang. *Model Predictive Control*) omawiany jest w artykule [2]. Ciekawym podejściem do sterowania suwnicą jest zastosowanie regulatora rozmytego. Właściwości tego rozwiązania, przedstawiono w [3]. Poszukiwanie optymalnych nastaw regulatora sterującego suwnicą opisano w [4]. Opracowano autorski algorytm parametryzujący, który przyniósł satysfakcjonujące rezultaty. W pracy [5] przedstawiono sterowanie z wykorzystaniem modularnych sieci neuronowych. Pokazano przydatną funkcję sieci w przypadku obiektu nieliniowego.

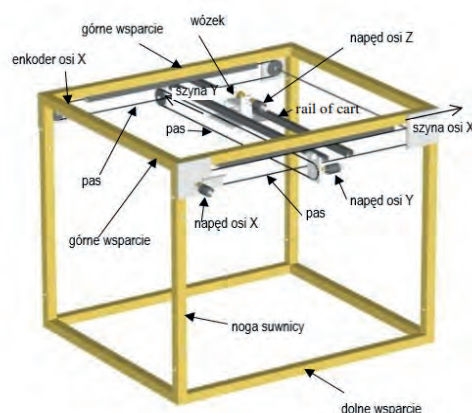
W artykule omówiono zaprojektowane, z wykorzystaniem modelu, oraz zbadane na obiekcie rzeczywistym, dwa układy regulacji suwnicą 3D, zrealizowane na bazie klasycznego regulatora PID (ang. *Proportional Integral Derivative*) i regulatora

PID ułamkowego (niecałkowitego) rzędu FOPID (ang. *Fractional Order PID*). Przeprowadzono optymalizację nastaw wszystkich regulatorów.

Sekcja druga zawiera opis suwnicy. W kolejnej sekcji zaprojektowano dwa układy regulacji oraz opisano proces doboru optymalnych wartości nastaw. W czwartej sekcji przedstawiono wyniki sterowania oraz dokonano porównania zastosowanych układów regulacji. Ostatnia sekcja zawiera podsumowanie.

2. Suwnica 3D

Suwnica 3D firmy INTECO jest sterowana z komputera PC (ang. *Personal Computer*). Opisywany obiekt składa się z części sprzętowej (suwnicy) oraz z części programowej (specjalistycznego oprogramowania umożliwiającego sterowanie suwnicą w czasie rzeczywistym). Sama suwnica, a dokładniej jej stelaż ma wymiary 1 m × 1 m × 1 m (Rys. 1). Obiekt składa się również z ciężarka zamocowanego do linki, trzech silników prądu stałego (sterujących obiektem w osi x , y i z), enkoderów, wyłączników krańcowych, wózka (umożliwiającego poruszanie się ciężarka wzdłuż odpowiednich osi), kół zębatych, gumowych pasków, sterownika i wyłącznika bezpieczeństwa.



Rys. 1. Model fizyczny suwnicy
Fig. 1. Physical model of a crane

Autor korespondujący:

Robert Piotrowski, robert.piotrowski@pg.edu.pl

Artykuł recenzowany

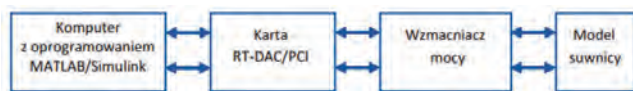
nadesłany 31.12.2023 r., przyjęty do druku 11.03.2024 r.



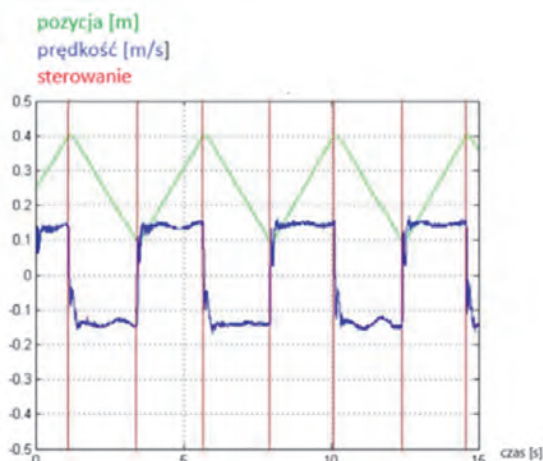
Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

Zawieszony ciężarek w postaci stalowego odważnika na końcu nieszytywnej linki ma na celu symulację rzeczywistego ładunku. Ciężarek przymocowany do linki może osiągać dowolne położenie w obszarze roboczym. Obszar ten wynika z ograniczeń związanych z czujnikami krańcowymi mającymi za zadanie utrzymanie ciężarka w danej strefie roboczej. Sam ciężarek jest podnoszony/opuszczany w płaszczyźnie z za pomocą wyciągarki znajdującej się bezpośrednio na wózku. Szyna i wózek mogą poruszać się wzdłuż płaszczyzny x , natomiast wózek może poruszać się wzdłuż szyny w kierunku y . W związku z tym, ciężarek przywiązany do liny może poruszać się swobodnie wzdłuż trzech płaszczyzn x, y, z [6]. Z punktu widzenia sterowania, system ten jest dynamiczny, nieliniowy i wielowymiarowy.

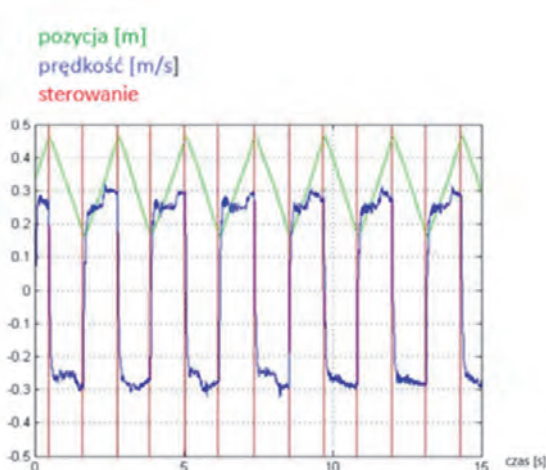
Komputer PC wyposażony jest w uniwersalną cyfrową kartę we/wy RT-DAC/USB/PCI/PCIe. Komputer ze specjalistycznym oprogramowaniem MATLAB jest połączony z modelem suwnicy za pomocą karty RT-DAC/PCI (Rys. 2). Sygnał dochodzący do obiektu jest wzmacniany wzmacniaczem mocy. Komunikacja PC – specjalistyczne oprogramowanie umożliwia sterowanie w czasie rzeczywistym suwnicą 3D.



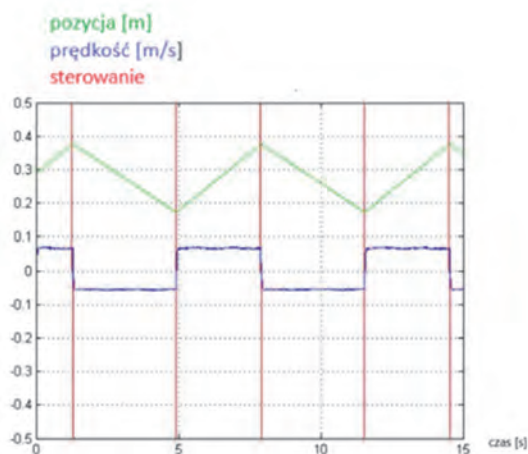
Rys. 2. Komunikacja PC – obiekt
Fig. 2. PC – object communication



Rys. 3. Położenie, prędkość i sterowanie w osi x
Fig. 3. Position, speed and control for the x axis



Rys. 4. Położenie, prędkość i sterowanie w osi y
Fig. 4. Position, speed and control for the y axis

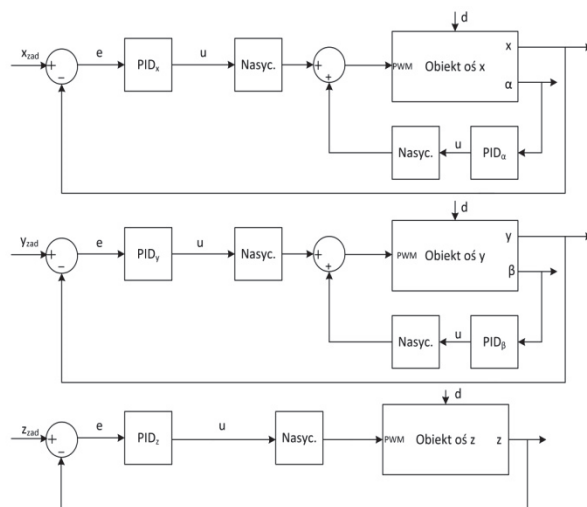


Rys. 5. Położenie, prędkość i sterowanie w osi z
Fig. 5. Position, speed and control for the z axis

W trakcie realizacji zadanej trajektorii przez suwnicę, obserwować można następujące sygnały analogowe: położenie wózka transportowego, prędkość przemieszczania się oraz sygnał sterujący. Przedstawione zostały na Rys. 3–5, dla każdej z osi osobno. Kolor niebieski reprezentuje aktualne położenie wózka, zielony jego prędkość a czerwony zadawany przez regulator sygnał sterujący.

3. Projektowanie układów regulacji

W artykule zaprojektowane, przetestowane oraz porównane zostaną dwa układy regulacji: z klasycznym regulatorem PID i regulatorem PID ułamkowego rzędu. Układ regulacji suwnicą 3D zawiera pięć regulatorów PID (klasycznych lub ułamkowych). Trzy z nich sterują każdą z osi (x, y, z), a dwa pozostałe odpowiadają za kąty wychylenia ciężarka (względem osi x i y). Struktura systemu została podzielona na trzy niezależne układy (Rys. 6). Założono, że wpływ sprzężeń skrośnych jest pomijalnie mały. Każdy podukład składa się z regulatora położenia, którego wartość wyjściowa jest ograniczona przez blok nasycenia. Sygnał sterujący jest sygnałem napięciowym z modulacją PWM. Zastosowanie ograniczenia na wartość sygnału sterującego było konieczne ze względu na dopuszczalny zakres napięć zasilających silniki wykonawcze oraz możliwości zastosowanego wzmacniacza. Wartości wyjściowe z regulatorów odchylenia również zostały ograniczone ze względu na

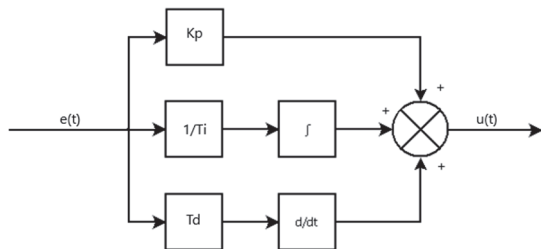


Rys. 6. Struktura układów regulacji we wszystkich osiach
Fig. 6. Structure of control systems

możliwości układu wykonawczego. Zakłócenia wpływające na pracę układu mogą wynikać m.in. z drgań podłoża, na którym stoi suwnica.

Oznaczenia na Rys. 6: x_{zad} , y_{zad} , z_{zad} – zadane pozycje w poszczególnych osiach; x , y , z – wyjściowe pozycje w poszczególnych osiach; α , β – kąty wychylenia ciężarka w osiach X i Y; e – uchyb regulacji; u – sygnał sterujący; d – zakłócenia.

Pierwszym zaprojektowanym regulatorem jest regulator PID. Jest to najczęściej stosowany rodzaj regulatora wykorzystywany w różnych gałęziach przemysłu. W praktyce wyróżniamy dwie odmiany regulatora PID: równoległy oraz szeregowo-równoległy. W omawianym przypadku wybrany został regulator w pierwszej wersji (Rys. 7). Odmiana ta charakteryzuje się brakiem wpływu wzmocnienia części proporcjonalnej K_p na dwie pozostałe części regulatora. Taka niezależność ułatwia odpowiedni dobór nastaw.



Rys. 7. Schemat blokowy regulatora PID
Fig. 7. Block scheme of PID controller

Opis regulatora można przedstawić również w postaci transmitancji operatorowej:

$$G(s) = K_p + \frac{1}{T_i s} + T_d s \tag{1}$$

gdzie: K_p – wzmocnienie proporcjonalne, T_i – stała czasowa całkowania, T_d – stała czasowa różniczkowania.

Głównym zadaniem regulatora jest wystawienie sygnału sterującego $u(t)$, który dostarczany jest na wejście urządzenia wykonawczego. Sygnał ten opisuje następująca zależność:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \tag{2}$$

gdzie: e – uchyb regulacji.

Dla obu projektowanych regulatorów dobrano optymalne nastawy. Funkcję celu opisuje zależność (3).

$$\min F(x) = \min \int_0^\infty e^2(t) dt \tag{3}$$

W artykule opisano przeprowadzoną optymalizację nastaw regulatorów dla osi: x, y, z oraz odchylenia kąтового w osi x (kąt γ) i w osi y (kąt δ). Wszystkie z pięciu wymienionych regulatorów optymalizowane były osobno. Metodą optymalizacji był nieliniowy algorytm optymalizacji Levenberga-Marquardta. Jest to algorytm iteracyjny, łączący właściwości metody największego spadku i metody Gaussa-Newtona. Wyniki optymalizacji przedstawiono w tabeli 1.

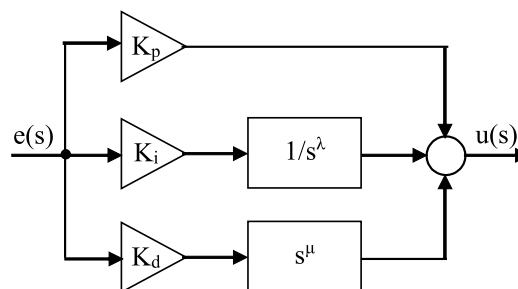
Drugim projektowanym regulatorem jest regulator PID ułamkowego rzędu. Jest to rodzaj regulatora PID, który dostosowany jest do pracy z układami, w których parametry (np. wzmocnienie, stała czasowa) zmieniają się w czasie. W przypadku ułamkowego regulatora PID, składowe całkująca oraz różniczkująca mają wykładniki ułamkowe z zakresu (0, 1), co pozwala na bardziej elastyczne kształtowanie charakterystyk częstotliwościowych.

Tabela 1. Optymalne wartości nastaw dla klasycznych regulatorów PID dla osi/kątów

Table 1. Optimum setting values for classic PID controllers for axes/angles

Oś/kąt	K_p	T_i	T_d
x	23,528	24,007	2,681
y	24,005	23,676	0,452
z	19,997	49,845	1,788
α	13,7501	5,3288	0,0373
β	6,7858	7,8486	1,5723

ściowych. Następstwem tego jest możliwość dokładniejszej kontroli nieliniowych procesów, w których regulator PID, nawet po optymalizacji nastaw nie dostarcza pożądanych wyników. Strojenie regulatora FOPID jest bardziej wymagające od PID klasycznego, ponieważ optymalizacji podlega pięć parametrów. Schemat blokowy opisanego regulatora pokazano na Rys. 8 [7].



Rys. 8. Schemat blokowy regulatora FOPID
Fig. 8. Block scheme of FOPID controller

gdzie: λ – niecałkowity rząd całkowania, μ – niecałkowity rząd różniczkowania.

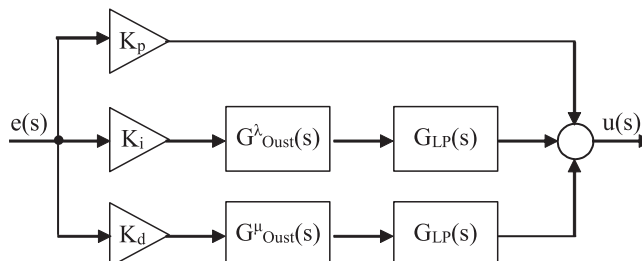
Transmitancję tego regulatora opisuje zależność (4), a sygnał sterujący wyrażenie (5).

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \tag{4}$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D_t^{-\lambda} e(t) + K_d D_t^\mu e(t) \tag{5}$$

gdzie: $D_t^{-\lambda}$ – operator niecałkowitego całkowania, D_t^μ – operator niecałkowitego różniczkowania.

Regulator FOPID został zrealizowany przez zastosowanie gotowego bloku dostępnego w bibliotece FOMCON środowiska MATLAB [8]. Schemat blokowy tego regulatora FOPID w środowisku FOMCON przedstawiono na Rys. 9. Transmitancje całkującej i różniczkującej części regulatora aproksymowano filtrami Oustaloup'a o transmitancji $G_{Oust}^\lambda(s)$ i $G_{Oust}^\mu(s)$.



Rys. 9. Schemat blokowy regulatora FOPID w środowisku FOMCON
Fig. 9. Block scheme of FOPID controller with FOMCON environment

Są one wyznaczane automatycznie. Każdy z tych modeli jest zależny od parametru N , jest obliczany według reguły $2N + 1$ i związany przez zakres pulsacji $(\omega_1; \omega_2)$. Dodatkowo wstawiono dwa filtry dolnoprzepustowe $G_{LP}(s)$, których stała czasowa T zależy od częstotliwości ω_2 ((6) i (7)). Więcej informacji można znaleźć w pracy [9].

$$G_{LP}(s) = \frac{1}{Ts + 1} \tag{6}$$

$$T = \frac{1}{\omega_2} \tag{7}$$

Optymalizację parametrów regulatorów przeprowadzono analogicznie, jak poprzednio. Wyniki optymalizacji nastaw regulatorów przedstawiono w tabeli 2.

4. Wyniki sterowania

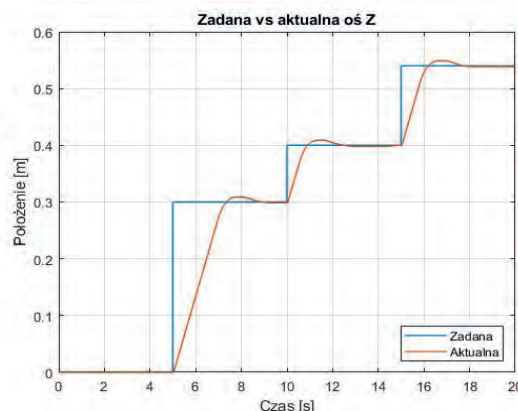
Każdy z dwóch układów regulacji testowany był na podstawie wymuszeń sekwencyjnych różnych dla każdego z trzech osi. Uzyskane wyniki analizowane były pod kątem tego wymuszenia oraz pięciu wskaźników jakości regulacji: uchyb ustalony, całka z kwadratu uchybu (2), czas narastania 10–90 %, czas regulacji 2 %, przeregulowanie procentowe, maksymalne wychylenie dodatnie i ujemne.

Na Rys. 10–14 przedstawiono odpowiedzi na wymuszenie sekwencyjne układów regulacji z regulatorami PID.

Tabela 2. Optymalne wartości nastaw dla regulatorów FOPID dla osi/kątów

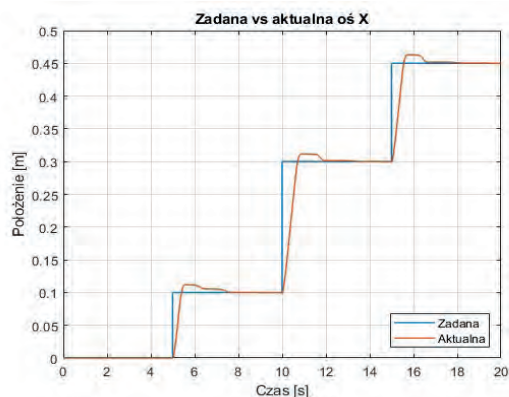
Table 2. Optimum setting values for FOPID controllers for axes/angles

Oś/kąt	K_p	T_i	T_d	λ	μ
x	41,277	0,007	6,363	0,572	0,573
y	2,661	3,8126	1,629	0,099	0,092
z	18,955	24,028	6,658	0,029	0,244
α	1,2883	2,0647	1,7665	0,9758	0,9234
β	10,1810	24,8433	0,0605	0,6624	0,6174



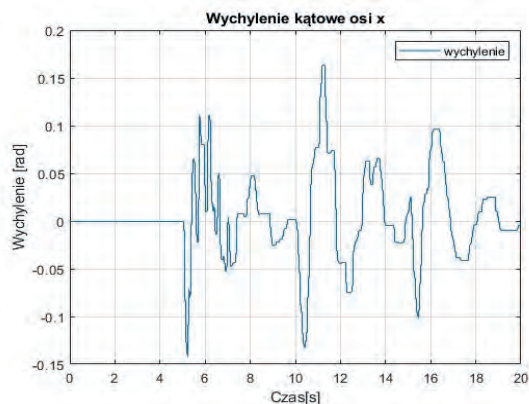
Rys. 12. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne dla osi z klasycznym regulatorem PID

Fig. 12. Response for sequential forcing in z axis with classic PID controller



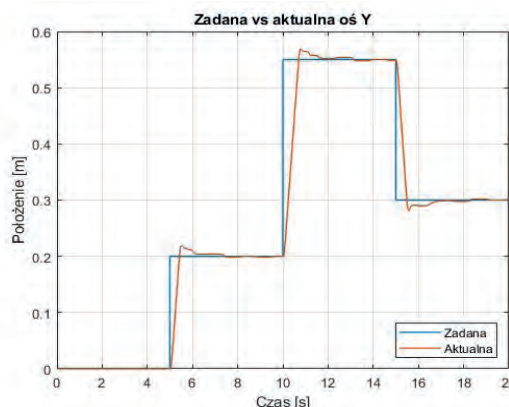
Rys. 10. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne dla osi x z klasycznym regulatorem PID

Fig. 10. Response for sequential forcing in x axis with classic PID controller



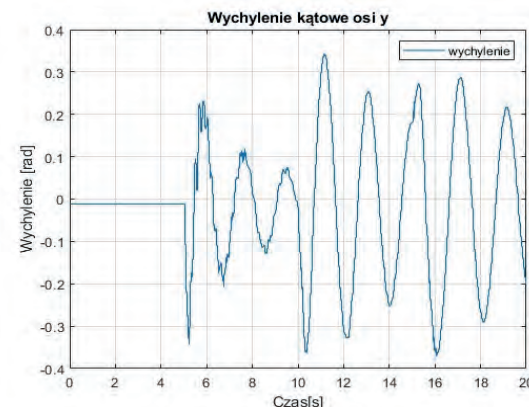
Rys. 13. Wychylenie kątowe dla osi x z klasycznym regulatorem PID

Fig. 13. Angular deflection for x axis with classic PID controller



Rys. 11. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne dla osi y z klasycznym regulatorem PID

Fig. 11. Response for sequential forcing in y axis with classic PID controller

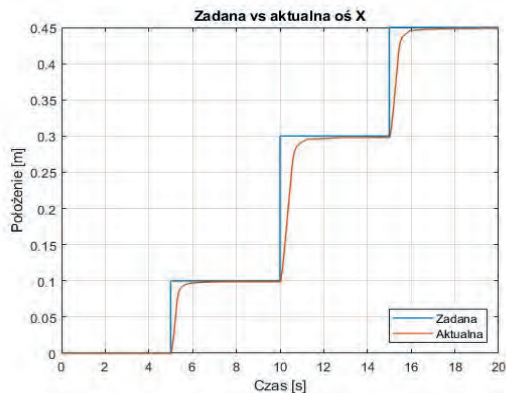


Rys. 14. Wychylenie kątowe dla osi y z klasycznym regulatorem PID

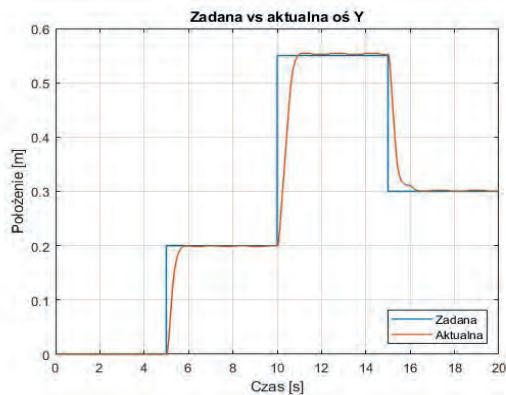
Fig. 14. Angular deflection for y axis with classic PID controller

Następnie przeprowadzono analogiczne badania dla układów regulacji z regulatorami FOPID. Wyniki tych testów przedstawiono na Rys. 15–19.

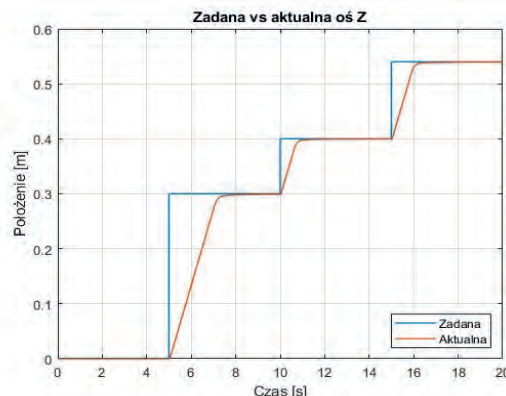
Wyniki regulacji pokazują znaczną poprawę jakości regulacji układu z regulatorem FOPID w porównaniu z układem z regulatorem PID. Dla wszystkich układów regulacji, uchyb ustalony jest praktycznie zerowy, nieznaczny błąd wynika z niedokładności urządzeń pomiarowych. Nie występują przeregulowania, czas regulacji jest krótszy oraz nastąpiła znaczna poprawa w przypadku wychyleń kątowych ładunku. Ostatnia wymieniona różnica ma bardzo duże znaczenie w przypadku przeniesienia ładunków delikatnych, gdyż przenoszony ładunek może ulec uszkodzeniu podczas bujania się. Jest to poprawa na tyle znacząca, że stosowanie regulatora ułamkowego rzędu ma swoje uzasadnienie w praktyce.



Rys. 15. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne dla osi x z regulatorem FOPID
 Fig. 15. Response for sequential forcing in x axis with FOPID controller



Rys. 16. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne dla osi y z regulatorem FOPID
 Fig. 16. Response for sequential forcing in y axis with FOPID controller

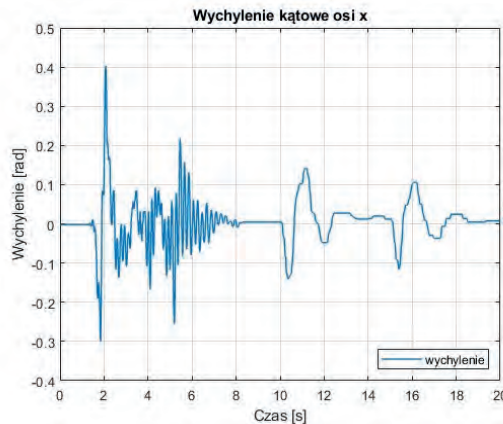


Rys. 17. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne dla osi z z regulatorem FOPID
 Fig. 17. Response for sequential forcing in z axis with FOPID controller

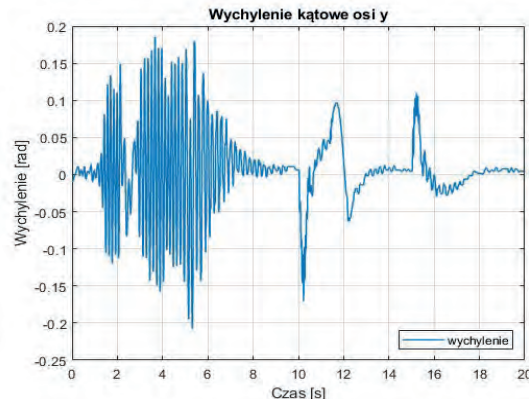
W tabeli 3 zestawiono wskaźniki jakości dla dwóch układów regulacji. Komórki zaznaczone kolorem zielonym oznaczają przewagę regulatora FOPID nad PID, czerwonym sytuację odwrotną, a żółtym bardzo małą, nieznaczającą różnicę między badanymi regulatorami.

Tabela 3. Porównanie wskaźników jakości dla dwóch układów regulacji
 Table 3. Comparison of quality indicators for the two control systems

Regulator	Oś x		Oś y		Oś z	
	PID	FOPID	PID	FOPID	PID	FOPID
uchyb ustalony	0,0018	0,0012	0,0015	0,0024	0,0014	0,0002
całka z kwadratu uchybu	0,0107	0,01081	0,033146	0,0336	0,0611	0,00278
czas narastania 10–90 % [s]	0,5051	0,571	0,556	0,615	0,6315	0,6
czas regulacji 2 % [s]	1,7262	1,123	1,137	0,801	1,7522	0,747
przeregulowanie [%]	3,9008	0	2,9565	0,745	2,2	0
maks. wychylenie dodatnie [rad]	0,17	0,4	0,34	0,18		
maks. wychylenie ujemne [rad]	-0,215	-0,23	-0,4	-0,2		



Rys. 18. Wychylenie kątowe dla osi x z regulatorem FOPID
 Fig. 18. Angular deflection for x axis with FOPID controller



Rys. 19. Wychylenie kątowe dla osi y z regulatorem FOPID
 Fig. 19. Angular deflection for y axis with FOPID controller

5. Podsumowanie

Na podstawie wykonanych badań, jednoznacznie można stwierdzić, iż w przypadku sterowania suwnicą 3D lepszą jakość regulacji uzyskano dla układów regulacji z regulatorami PID ułamkowego rzędu. Zauważyć można, iż układ regulacji z regulatorami PID nie zawsze jest wystarczającym rozwiązaniem oraz nie sprawdzi się w przypadku wszystkich obiektów dynamicznych. Trzeba jednak pamiętać, że operacje niecałkowitego rzędu wymagają nieograniczonych zasobów środowiska obliczeniowego. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem tego problemu jest aproksymacja filtrem Oustaloup'a oraz jego modyfikacjami [10]. Reasumując, zastosowanie regulatora FOPID znacząco poprawia jakość regulacji, ale wymaga implementacji dodatkowych operacji matematycznych.

Bibliografia

1. Aksjonov A., *The Modelling and Control of 3D Crane*. Praca magisterska, Politechnika w Tallinie, Wydział Elektryczny, 2015.
2. Schindele D., Aschemann H., *Fast Nonlinear MPC for an Overhead Travelling Crane*. Proc. of the 18th World Congress, August 28 - September 2, 2011, Milano, Italy.
3. Antić D., Jovanović Z.: Anti-Swing Fuzzy Controller Applied in a 3D Crane System. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, Vol. 2 (2012), No. 2, 196-200.
4. Pauluk M., Korytowski A., Turnau A., Szymkat M., *Time optimal control of 3D Crane*. Proceedings of the 7th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics – MMAR 2001, Międzyzdroje, Poland, 927–932.
5. Pogorzelski R., *Modularne sieci neuronowe w sterowaniu modelem laboratoryjnym suwnicy przemysłowej*. „Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering”, No. 91, 2017, 277–285, DOI: 10.21008/j.1897-0737.2017.91.0025.
6. 3D Crane User's manual, [www.inteco.com.pl/Docs/3D-Crane_um.pdf], (otworzono 20.12.2023).
7. Puchalski B., *Sterowanie z wykorzystaniem rachunku niecałkowitego rzędu reaktorem wodnym ciśnieniowym elektrowni jądrowej*. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, 2018.
8. Tepljakov A., Petlenkov E., Belikov J., *FOMCON: a MATLAB toolbox for fractional-order system identification and control*. “International Journal of Microelectronics and Computer Science”, Vol. 2, No. 2, 2011, 51–62.
9. Puchalski B., Rutkowski T.A., Duzinkiewicz K., *Implementation of the FOPID Algorithm in the PLC Controller – PWR Thermal Power Control Case Study*. Proceedings of the 23rd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics – MMAR 2018, Międzyzdroje, Poland, 229–234, DOI: 10.1109/MMAR.2018.8485807.
10. Bauer W., *Implementacja układów niecałkowitego rzędu w systemach wbudowanych*. Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, 2020.

The Use of Fractional Order Calculus in 3D Crane Control

Abstract: The 3D crane is an object used in various industries. From a control point of view, it is a dynamic, non-linear and multidimensional system. In this paper, two control systems are designed: with a classical PID controller and with a fractional-order PID controller. A comparative analysis of the designed control systems is presented.

Keywords: 3D crane, control system, fractional order calculus, optimization, PID



inż. Michał Kędziora

s185707@student.pg.edu.pl
 ORCID: 0009-0005-8464-5141

Absolwent studiów inżynierskich pierwszego stopnia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (kierunek Automatyka i Robotyka, specjalność Automatyka i Systemy Sterowania). Zainteresowania: automatyka, projektowanie układów regulacji, przemysł ciężki.



inż. Krzysztof Leszczyński

s185639@student.pg.edu.pl
 ORCID: 0009-0003-9172-3510

Absolwent studiów inżynierskich pierwszego stopnia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (kierunek Automatyka i Robotyka, specjalność Automatyka i Systemy Sterowania). Zainteresowania: automatyka i systemy sterowania.



dr hab. inż. Robert Piotrowski

robert.piotrowski@pg.edu.pl
 ORCID: 0000-0002-8660-300X

Absolwent i pracownik Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. W 2005 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej automatyka i robotyka. W 2018 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie naukowej automatyka i robotyka. Zawodowo związany z Katedrą Inteligentnych Systemów Sterowania i Wspomagania Decyzji. Zainteresowania: modelowanie i zaawansowane metody sterowania procesami przemysłowymi.

