

Imię i nazwisko studenta: Michał Kędziora

Nr albumu: 185707

Poziom kształcenia: Studia pierwszego stopnia

Forma studiów: stacjonarne

Kierunek studiów: Automatyka, robotyka i systemy sterowania

Specjalność: Automatyka i Systemy Sterowania

Imię i nazwisko studenta: Krzysztof Leszczyński

Nr albumu: 185639

Poziom kształcenia: Studia pierwszego stopnia

Forma studiów: stacjonarne

Kierunek studiów: Automatyka, robotyka i systemy sterowania

Specjalność: Automatyka i Systemy Sterowania

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

Tytuł pracy w języku polskim: Projektowanie układów regulacji dla przykładowego obiektu dynamicznego

Tytuł pracy w języku angielskim: Design of control systems for a sample dynamic system

Opiekun pracy: dr hab. inż. Robert Piotrowski

OŚWIADCZENIE dotyczące pracy dyplomowej zatytułowanej:

Projektowanie układów regulacji dla przykładowego obiektu dynamicznego

Imię i nazwisko studenta: Michał Kędziora

Data i miejsce urodzenia: 27.04.2001, Gdynia

Nr albumu: 185707

Wydział: Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Kierunek: automatyka, robotyka i systemy sterowania

Poziom kształcenia: pierwszy

Forma studiów: stacjonarne

Typ pracy: praca dyplomowa inżynierska

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz. U. z 2019 r. poz. 1231, z późn. zm.) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2020 r. poz. 85, z późn. zm.), a także odpowiedzialności cywilnoprawnej oświadczam, że przedkładana praca dyplomowa została opracowana przeze mnie samodzielnie.

Niniejsza praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem tytułu zawodowego.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. pracy dyplomowej, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

15.03.2023, Michał Kędziora

Data i podpis lub uwierzytelnienie w portalu uczelnianym Moja PG

*) Dokument został sporządzony w systemie teleinformatycznym, na podstawie §15 ust. 3b Rozporządzenia MNiSW z dnia 12 maja 2020 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie studiów (Dz.U. z 2020 r. poz. 853). Nie wymaga podpisu ani stempla.

OŚWIADCZENIE dotyczące pracy dyplomowej zatytuowanej:

Projektowanie układów regulacji dla przykładowego obiektu dynamicznego

Imię i nazwisko studenta: Krzysztof Leszczyński

Data i miejsce urodzenia: 22.01.2001, Chojnice

Nr albumu: 185639

Wydział: Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Kierunek: automatyka, robotyka i systemy sterowania

Poziom kształcenia: pierwszy

Forma studiów: stacjonarne

Typ pracy: praca dyplomowa inżynierska

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz. U. z 2019 r. poz. 1231, z późn. zm.) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2020 r. poz. 85, z późn. zm.), a także odpowiedzialności cywilnoprawnej oświadczam, że przedkładana praca dyplomowa została opracowana przeze mnie samodzielnie.

Niniejsza praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem tytułu zawodowego.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. pracy dyplomowej, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

15.03.2023, Krzysztof Leszczyński

Data i podpis lub uwierzytelnienie w portalu uczelnianym Moja PG

*) Dokument został sporządzony w systemie teleinformatycznym, na podstawie §15 ust. 3b Rozporządzenia MNiSW z dnia 12 maja 2020 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie studiów (Dz.U. z 2020 r. poz. 853). Nie wymaga podpisu ani stempla.

Streszczenie

Suwnica 3D jest przykładem obiektu dynamicznego, w którym zawarte są zaawansowane układy regulacji mające na celu dążenie do satysfakcjonujących i ścisłe określonych rezultatów sterowania przez ścisłe określony, oraz dokładnie zdefiniowany obiekt dynamiczny. Suwnica 3D jest to nieliniowy, dynamiczny, złożony i wielowymiarowy obiekt sterowania. W pracy inżynierskiej przedstawiono oraz zaprojektowano dwa układy regulacji - regulator PID oraz PID ułamkowego rzędu. Każdy z nich został szczegółowo opisany. Znając opis matematyczny opisywanego modelu dynamicznego, na jego podstawie stworzony został model obiektu a jego symulacyjne właściwości i rezultaty sterowania zostały porównane do rzeczywistej wersji suwnicy 3D wyprodukowanej przez firmę InTeCo. Równania matematyczne opisujące badany obiekt zostały wyprowadzone przez firmę (na podstawie praw fizyki), która zaprojektowała suwnicę 3D, a następnie równania opisujące obiekt w dokumentacji technicznej. Na tej podstawie przeprowadzono badania symulacyjne. Następnie dokonano analizy porównawczej uzyskanych wyników.

Praca inżynierska ma dwóch autorów - wkład pracy każdego z nich prezentuje się następująco:

Michał Kędziora - udział w rozdziałach 1, 2, 3, 6 oraz podrozdziałach 4.1, 4.2, 5.4, praca indywidualna 4.3, 4.4, 5.2

Krzysztof Leszczyński - udział w rozdziałach 1, 2, 3, 6 oraz w podrozdziałach 4.1, 4.2, 5.4, praca indywidualna 4.5, 5.1, 5.3

Słowa kluczowe: regulator, optymalizacja, przebiegi, suwnica, regulacja, model, PID

Dziedzina nauki i techniki zgodnie z wymogami OECD: Informatyka inżynierijna, elektronika, elektrotechnika

Abstract

The 3D crane is an example of a dynamic object in which advanced control systems are implemented to strive for satisfying and precisely defined control outcomes through a strictly specified and precisely defined dynamic object. The 3D crane is a nonlinear, dynamic, complex, and multi-dimensional control object. In the engineering thesis, two control systems have been presented and designed - a PID controller and a fractional-order PID controller. Each of them has been described in detail. Knowing the mathematical description of the dynamic model under consideration, a model of the object was created, and its simulation properties and control results were compared to the real version of the 3D crane produced by the company InTeCo. The mathematical equations describing the investigated object were derived by the company (based on the laws of physics), which designed the 3D crane, and then the equations describing the object were included in the technical documentation. Based on this, simulation studies were conducted. Then, a comparative analysis of the obtained results was carried out.

The engineering thesis has two authors, and the contribution of each of them is presented as follows:

Michał Kędziora - contribution in chapters 1, 2, 3, 6, and in subsections 4.1, 4.2, 5.4, individual work 4.3, 4.4, 5.2

Krzysztof Leszczyński - contribution in chapters 1, 2, 3, 6, and in subsections 4.1, 4.2, 5.4, individual work 4.5, 5.1, 5.3

Keywords: controller, optimization, waveforms, crane, control, model, PID

Field of science and technology according to OECD requirements: Engineering informatics, electronics, electrical engineering

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń:	7
1. Wstęp (Michał Kędziora, Krzysztof Leszczyński)	8
1.1. Informacje podstawowe	8
1.2. Ogólny przegląd literatury	8
1.3. Cel i zakres projektu	9
1.4. Struktura projektu	9
2. Opis modelu fizycznego (Michał Kędziora, Krzysztof Leszczyński)	10
2.1. Budowa obiektu	10
2.2. Wymiana informacji PC-suwnica	12
3. Model komputerowy suwnicy (Michał Kędziora, Krzysztof Leszczyński)	13
3.1. Przedstawienie opisu obiektu	13
3.2. Wyznaczenie parametrów obiektu	14
4. Projektowanie algorytmów regulacji suwnicą	20
4.1. Wprowadzenie (Michał Kędziora, Krzysztof Leszczyński)	20
4.2. Uzasadnienie stosowania algorytmów regulacji (Michał Kędziora, Krzysztof Leszczyński)	20
4.3. Opis procesu optymalizacji (Michał Kędziora)	27
4.4. Regulator PID (Michał Kędziora)	30
4.4.1. Opis regulatora	30
4.4.2. Optymalizacja nastaw	34
4.5. Regulator PID ułamkowego rzędu (Krzysztof Leszczyński)	40
4.5.1. Opis regulatora	40
4.5.2. Optymalizacja nastaw	42
5. Badania symulacyjne i analiza wyników	48
5.1. Warunki testowania (Krzysztof Leszczyński)	48
5.2. PID klasyczny (Michał Kędziora)	51
5.3. PID ułamkowy (Krzysztof Leszczyński)	58
5.4. Analiza porównawcza (Michał Kędziora, Krzysztof Leszczyński)	66
6. Podsumowanie (Michał Kędziora, Krzysztof Leszczyński)	68
Wykaz literatury	69
Wykaz rysunków	70
Wykaz tabel	72
Wykaz załączników	72

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń:

PID - regulator Proporcjonalno Całkującą Różniczkującą (ang. Proportional Integral Derivative)

K_p – wzmocnienie członu proporcjonalnego

K_i - wzmocnienie członu całkującego

K_d - wzmocnienie członu różniczkującego

T_i – stała czasowa całkowania

T_d – stała czasowa różniczkowania

$e(t)$ - uchyb sterowania

$y(t)$ - sygnał wyjściowy z obiektu

$y_{zad}(t)$ - wartość zadana sygnału

$z(t)$ - zakłócenia

$u(t)$ - sygnał sterujący

RT-DAC - Karta akwizycji danych w czasie rzeczywistym (ang. Real-Time Data Acquisition Board)

PWM - Modulacja szerokości impulsów (ang. Pulse Width Modulation)

MIMO - Wiele wejść, wiele wyjść (ang. Multi Input - Multi Output)

FOPID - regulator PID ułamkowego rzędu (ang. Fractional Order PID)

$G_x(s)$ - Transmitancja operatorowa dla osi X

$G_y(s)$ - Transmitancja operatorowa dla osi Y

$G_z(s)$ - Transmitancja operatorowa dla osi Z

s - stała operatorowa

1. WSTĘP

1.1. Informacje podstawowe

Automatyka jest coraz bardziej powszechnym zjawiskiem we współczesnym świecie. Ciągły rozwój technologii i większe zapotrzebowanie na dobra wywiera wielki wpływ na rozwój automatyzacji. Jest to dziedzina nauki, która zajmuje się sterowaniem różnymi procesami związanymi z branżą technologiczną, oraz przemysłową. Automatyka jest związana z automatyzacją, czyli częściowym, lub całkowitym eliminowaniem udziału człowieka z jakiś czynności. Automatyka wykorzystywana jest w celu zwiększenia wydajności, powtarzalności, precyzyji, oraz w celu eliminacji udziału człowieka w wykonywaniu zadań powtarzalnych, oraz żmudnych. Z tymi działańami ściśle związane są układy regulacji. Układy regulacji w automatyce są niezbędne do utrzymania i kontrolowania pożądanych parametrów w systemach automatyki. Główne cele układów regulacji to zapewnienie stabilności, precyzyji i skuteczności w działaniu różnych procesów, urządzeń i systemów. Rosnąca liczba układów sterowania, w których stosowane są układy regulacji zmusza świat technologii do ciągłego doskonalenia w celu uzyskiwania coraz lepszych rezultatów sterowania oraz zmusza do podążania za wzrostem wydajności i jakości. Ciekawym obiektem sterowania jest suwnica 3D. Daje ona możliwość implementacji algorytmów sterowania poprzez środowisko dedykowane Matlab.

W przemyśle, najpopularniejszym regulatorem jest regulator typu PID. Około 90% układów regulacji zawiera w sobie regulatory z rodziny PID. Tego typu regulatora używa się na przykład do: sterowania temperaturą, ciśnieniem, natężeniem przepływu, siłą, oraz prędkością. Regulatory z rodziny PID znajdują zastosowanie w całym w różnych gałęziach przemysłu. Kolejnymi przykładami regulatorów stosowanych w układach regulacji są: regulator dwustanowy, regulator trójstawny, regulator optymalny i inne.

Podsumowując, układy regulacji w automatyce są kluczowe dla zapewnienia skutecznej kontroli, precyzyji i stabilności w różnych systemach i procesach. Pozwalają one na osiągnięcie określonych celów operacyjnych, co przyczynia się do poprawy efektywności i wydajności w wielu dziedzinach przemysłu i nauki.

1.2. Ogólny przegląd literatury

Tematy powiązane z modelowaniem oraz sterowaniem suwnicą są szeroko omawiane głównie w literaturze zagranicznej, ale również zdarzają się polskie publikacje. Pierwsza pozycja [1] opisuje sterowanie dokładnie tym samym modelem suwnicy. Autor skupia się na modelu matematycznym oraz stosuje algorytm sprzężenia w przód. Bardziej zaawansowany system sterowania, a mianowicie MPC (ang. Model Predictive Control) omawiany jest w artykule [2]. Ciekawym podejściem w aspekcie sterowania suwnicą jest zastosowanie regulatora rozmytego. Właściwości tego rozwiązania, takie jak na przykład brak konieczności doboru szczegółowych nastaw opisuje opracowanie [3]. Poszukiwanie optymalnych nastaw regulatora sterującego suwnicą przedstawiono w artykule [4]. Na potrzeby tego tekstu, stworzony został autorski algorytm parametryzujący, który przyniósł satysfakcjonujące rezultaty. Mimo iż suwnica przemysłowa nie jest bardzo skomplikowanym obiektem, to w opracowaniu [5]

omówione zostało sterowanie z wykorzystaniem modularnych sieci neuronowych. Artykuł ten opisuje przydatną funkcjonalność sieci w przypadku obiektu nieliniowego.

1.3. Cel i zakres projektu

Celem pracy jest dobór i zaprojektowanie układów regulacji zgodnie z zasadą jak najdokładniejszego śledzenia wartości zadanej przez suwnicę. Zostaną przedstawione trzy różne struktury układów regulacji, oraz zostaną dobrane optymalne nastawy regulatorów dla określonego przypadku. Nastawy regulatorów nie wychodzą poza ograniczenia układu, oraz minimalizują błąd związany z uchybem sterowania. Przedstawione układy zostaną zaimplementowane na obiekcie rzeczywistym (za pośrednictwem specjalistycznego oprogramowania Matlab). Na tej podstawie dokonane zostanie porównanie pomiędzy obiektem symulacyjnym a obiektem rzeczywistym, oraz zostaną wyciągnięte odpowiednie wnioski na podstawie uzyskanych wyników.

Zakres projektu:

- przedstawienie ogólnego przeglądu literatury o modelowaniu oraz sterowaniu suwnicą
- opis budowy suwnicy
- wyjaśnienie komunikacji pomiędzy komputerem a suwnicą
- opis modelu komputerowego suwnicy
- porównanie zachowania modelu komputerowego z obiektem rzeczywistym
- ukazanie w jaki sposób działa suwnica bez regulacji lub z reglatorem dobranym w sposób eksperymentalny
- opis procesu optymalizacji nastaw regulatorów
- opis reglatora PID oraz PID ułamkowego rzędu
- zoptymalizowanie nastaw obydwu regulatorów
- przedstawienie warunków testowania nastaw na obiekcie rzeczywistym
- badania symulacyjne na obiekcie rzeczywistym
- analiza przebiegów, wskaźników jakości oraz dokonanie analizy porównawczej wyników

1.4. Struktura projektu

W rozdziale drugim poruszone zostały kwestie dotyczące opisu obiektu - suwnicy 3D. Przedstawiono w nim budowę fizyczną oraz elementy wchodzące w jej skład. Poruszony został również temat wymiany danych pomiędzy obiektem a komputerem stacjonarnym.

W rozdziale trzecim zostały podane informacje ogólne dotyczące komputerowego modelu suwnicy 3D. Porównany został tam również model komputerowy dostarczony przez producenta wraz z obiektem rzeczywistym. Wyznaczono również transmitancje silników oraz długość linki.

W rozdziale czwartym szczegółowo opisano dwa algorytmy regulacji. Przedstawiono budowę oraz opis matematyczny regulatorów. Zawarte w nim zostały również informacje na temat zasad przeprowadzania optymalizacji oraz nastawy wyznaczone poprzez jej zastosowanie.

W rozdziale piątym przeprowadzono badania symulacyjne oraz analizę wyników otrzymanych na podstawie symulacji obiektu zaimplementowanego w środowisku Matlab.

Rozdział szósty stanowi podsumowanie pracy oraz przeprowadzonych badań.

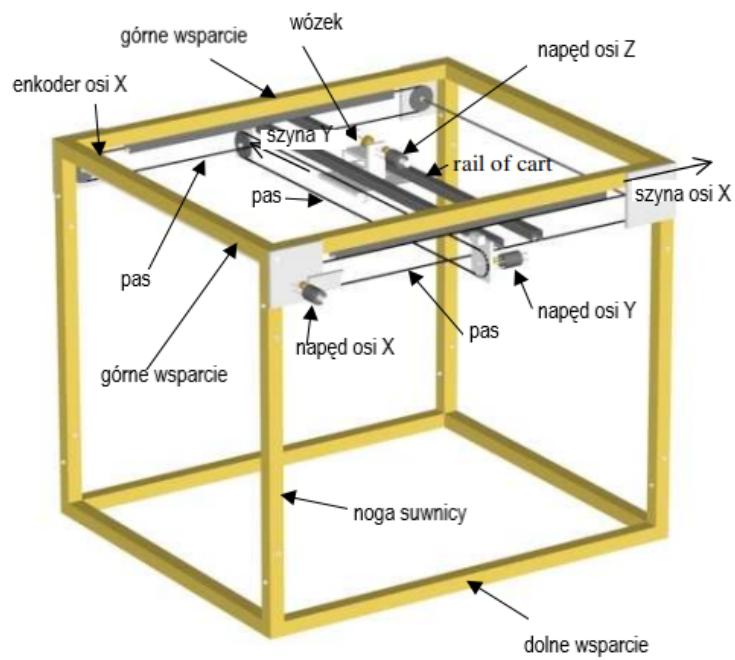
2. OPIS MODELU FIZYCZNEGO

2.1. Budowa obiektu

Badanym obiektem dynamicznym wykorzystanym w pracy inżynierskiej jest suwnica 3D wykonana przez firmę InTeCo Ltd. Powstała ona w celach dydaktyczno-naukowych i aktualnie znajduje się na wydziale Automatyki i Elektrotechniki. Obiekt ten jest małą wersją suwnicy przemysłowej podmostowej-podwieszanej. Umożliwia ona symulowanie przenoszenia obiektu z punktu A do punktu B zgodnie z wymaganiami i założeniami użytkownika. Suwnica ta uwzględnia w swojej konstrukcji wpływ występowania zakłóceń zewnętrznych - co wpływa na położenie i wychylenie ciężarka. W zestawie do suwnicy 3D, firma InTeCo Ltd dołączyła również specjalistyczne oprogramowanie, które umożliwia sterowanie suwnicą w czasie rzeczywistym. Dane oprogramowanie zostało zaimplementowane w środowisku MatLab, a dokładniej mówiąc, sam model suwnicy został stworzony w bibliotece Simulink. Wyróżniamy dwa rodzaje sterowań : poprzez gotowe algorytmy, oraz sterowanie ręczne. Dostarczony przez firmę program daje nam możliwość zmiany parametrów obiektu - co wpływa na jakość sterowania danym obiektem. Odpowiednie nastawy i dobór sterowań ma bezpośredni wpływ na jakość sterowań ("poprawny" ruch ciężarka - tzn. ładunek porusza się zgodnie z trajektorią zadaną).

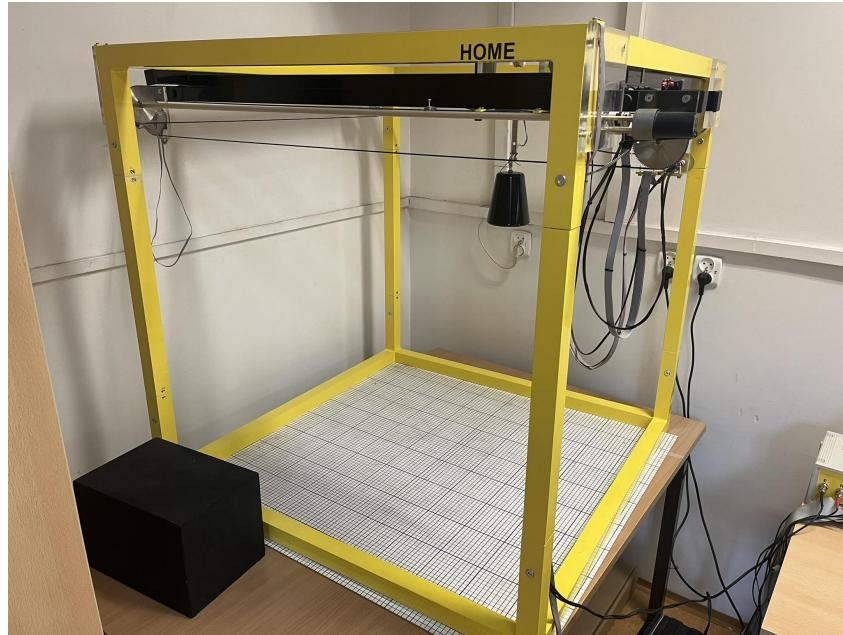
Suwnica 3D jest to nieliniowy system elektromechaniczny o złożonej dynamice. Działanie całego systemu jest sterowane z komputera PC (ang. Personal Computer). Opisywany obiekt składa się z części sprzętowej (samej suwnicy) oraz z części programowej (specjalistycznego oprogramowania umożliwiającego sterowanie suwnicą w czasie rzeczywistym). Sama suwnica, a dokładniej mówiąc jej stelaż jest wymiarów 1m x 1m x 1m. Obiekt składa się również z: ciężarka zamocowanego do linki, trzech silników prądu stałego (sterujących obiektem w osi x, y, oraz z), enkoderów, wyłączników krańcowych, wózka (umożliwiającego poruszanie się ciężarka wzdłuż odpowiednich osi), kół zębatach, gumowych pasków, sterownika, oraz z wyłącznika bezpieczeństwa (patrz rysunek 2.1). 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. Opuszczanie i podnoszenie ciężarka możliwe jest przez wyciągarkę znajdującej się bezpośrednio na wózku. Szyna i wózek są zdolne do poruszania się wzdłuż płaszczyzny x, natomiast wózek może poruszać się wzdłuż szyny w kierunku y. W związku z tym, ciężarek przywiązanego do linii może poruszać się swobodnie wzdłuż trzech płaszczyzn x, y, z [6]

Suwnica 3D napędzana jest trzema silnikami prądu stałego, oraz posiada pięć enkoderów (o rozdzielczości 4096 impulsów na obrót), które mierzą współrzędne wózka w płaszczyźnie poziomej, długość linii nośnej oraz dwa kąty odchylenia ładunku od pionu. Sterownik ma trzy wejścia PWM (ang. Pulse Width Modulation) (odpowiadające sterowaniu silnikiem prądu stałego) odpowiednio dla osi x, y i z. System ten jest nieliniowy typu MIMO (ang. Multiple input - Multiple Output).



Rys. 2.1. Budowa suwnicy

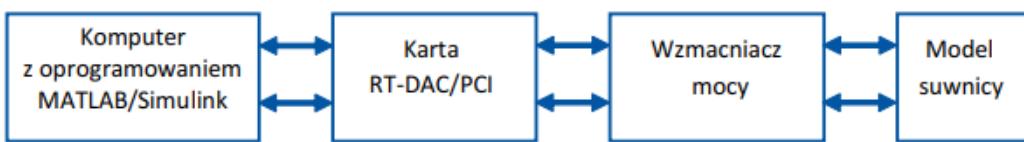
Suwnica posiada punkt HOME (widoczny na rysunku 2.2), który to jest punktem początkowym trajektorii ruchu suwnicy. Analogicznie do modelu obiektu dynamicznego, jest to swego rodzaju warunek początkowy.



Rys. 2.2. Rzeczywisty wygląd badanej suwnicy z obciążeniem w punkcie początkowym

2.2. Wymiana informacji PC-suwnica

Komputer PC wyposażony jest w uniwersalną cyfrową kartę we/wy RT-DAC/USB/PCI/PCIe. Komputer z specjalistycznym oprogramowaniem MATLAB jest połączony z modelem suwnicy za pomocą karty RT-DAC/PCI (patrz rysunek 2.3). Odpowiednio sygnał dochodzący do obiektu jest wzmacniany wzmacniaczem mocy. Komunikacja PC-specjalistyczne oprogramowanie umożliwia sterowanie w czasie rzeczywistym suwnicą 3D. Wpływ na samo działanie suwnicy ma model zaimplementowany w środowisku Matlab (a dokładniej mówiąc - parametry tego modelu oraz jego struktura). [7]



Rys. 2.3. Komunikacja PC - obiekt (suwnica)

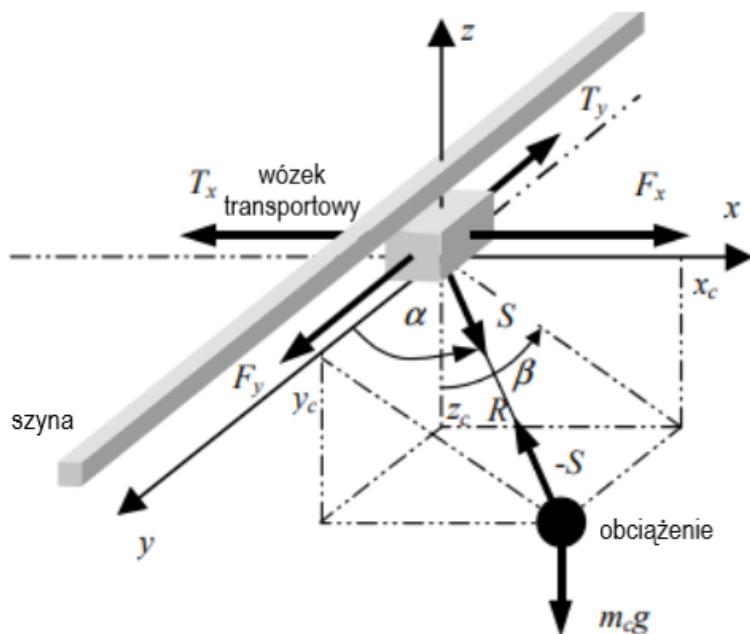
3. MODEL KOMPUTEROWY SUWNICY

3.1. *Przedstawienie opisu obiektu*

Model komputerowy obiektu to abstrakcyjna reprezentacja komputerowa rzeczywistego obiektu lub systemu, która pozwala na symulację, analizę, testowanie lub manipulację tym obiektem za pomocą oprogramowania komputerowego. Taki model może mieć różne zastosowania w zależności od rodzaju obiektu i celu modelowania. Celem modelowania jest otrzymanie jak najdokładniejszego opisu matematycznego rzeczywistego obiektu. Dany opis zawiera w sobie wszystkie najważniejsze prawa fizyki niezbędne do poprawnego odtworzenia obiektu rzeczywistego z wyłączeniem czynników, które mają pomijalny wpływ na dany obiekt. [8]

Modele matematyczne implementowane są w środowisku komputerowym (za pośrednictwem specjalistycznego oprogramowania) w celu umożliwienia testowania obiektu bez konieczności wykorzystywania jego fizycznego odpowiednika. Modele komputerowe pozwalają na przeprowadzanie symulacji i eksperymentów wirtualnych, co jest przydatne w dziedzinach, gdzie przeprowadzenie rzeczywistego eksperymentu jest trudne, kosztowne lub niebezpieczne.

Poprzez odpowiednie stworzenie modelu komputerowego przeciwdziałamy występowaniu sytuacji niebezpiecznych lub kosztownych. Podczas użytkowania suwnicy, na wózek transportowy oraz obciążenie (ładunek) działają różne siły, również siły tarcia statycznego i kinetycznego, które są zakłóceniami dla działania obiektu. Dokładny ich rozkład wraz z zaznaczonymi kierunkami działania został przedstawiony na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Opis fizyczny sił i wielkości działających na obiekt

gdzie:

m_c – masa ładunku [kg],

m_w - masa wózka [kg],

m_s - masa poruszającej się szyny [kg],

x_c, y_c, z_c - współrzędne ładunku,

S - siła reakcji liny nośnej działająca na wózek [N],

F_x - siła jazdy po szynie wózkiem [N],

F_y - wymuszenie prowadzenia wózka po szynie [N],

F_R - siła sterująca długością liny nośnej [N],

T_x, T_y, T_R – siły tarcia [N],

R - długość liny wyciągowej [m],

α - kąt pomiędzy osią y a linią nośną [$^\circ$],

β - kąt pomiędzy ujemnym kierunkiem osi z a rzutem linii nośnej na płaszczyznę xz [$^\circ$].

Siły te pełniły ważną rolę w wyznaczeniu opisu modelu matematycznego (komputerowego).

3.2. Wyznaczenie parametrów obiektu

Opis obiektu przedstawiony będzie poprzez transmitancję operatorową wyznaczoną dla poszczególnych silników odpowiedzialnych za poruszanie się suwnicy w trzech wymiarach.. Ciężarek porusza się we wszystkich osiach, zatem transmitancje wyznaczone są dla osi x, y oraz z. W tym celu wykorzystane zostało wewnętrzne narzędzie, które na podstawie odczytu pozycji ciężarka w rzeczywistym przebiegu wyznacza wielkości potrzebne do stworzenia opisu obiektu. Narzędzie jest panelem wewnętrznym w oprogramowaniu dostarczonym przez producenta. Proces identyfikacji obiektu składa się z wielu etapów mających na celu dokładne poznanie zachowania obiektu poruszającego się w rzeczywistości. Jednym z kluczowych etapów, który dostarcza wystarczającą ilość informacji do wyznaczenia opisu obiektu, jest poruszanie się ciężarka ze znaczną szybkością po określonych trajektoriach ruchu. Obiekt aproksymowany jest obiektem inercyjnym rzędu II. Transmitancje poszczególnych silników dla trzech osi przedstawione są wzorami (3.1) - (3.3).

$$Gx(s) = \frac{Kx}{s^*(Tx^*s+1)} \quad (3.1)$$

$$Gy(s) = \frac{Ky}{s^*(Ty^*s+1)} \quad (3.2)$$

$$Gz(s) = \frac{Kz}{s^*(Tz^*s+1)} \quad (3.3)$$

gdzie:

$G(s)$ - transmitancja silnika,

K - wzmocnienie układu,

T - stała czasowa inercji [s].

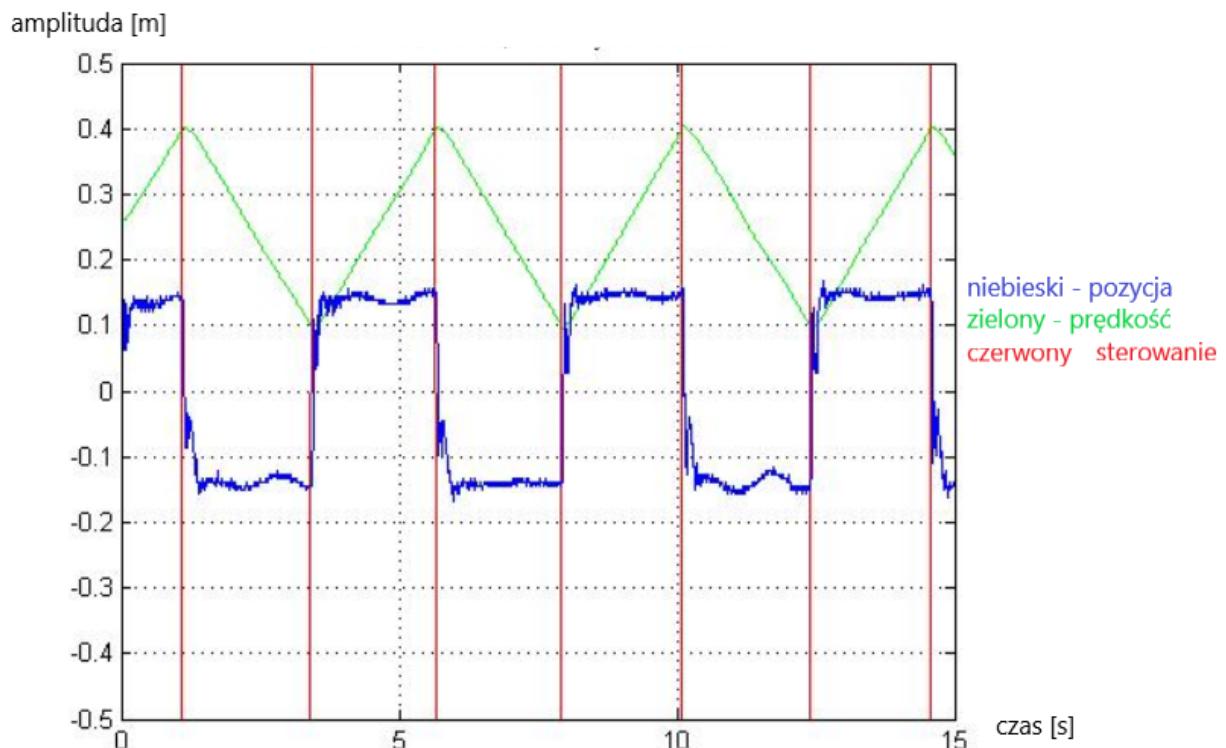
Odpowiednio x,y,z przy poszczególnych parametrach odnosi się do omawianej osi.

Stałe czasowe oraz wzmocnienia transmitancji zostały przedstawione w Tabeli 3.1.

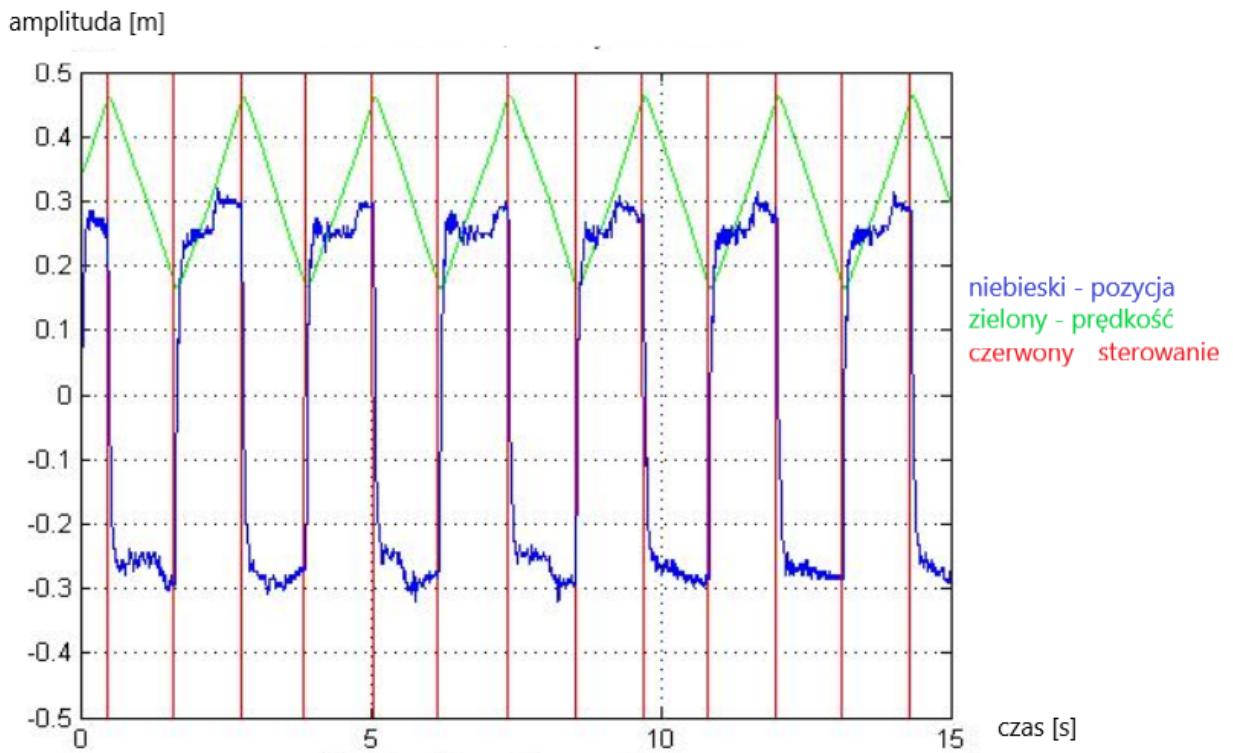
Tabela 3.1. Wyliczone współczynniki transmitancji silników.

Oś	Wzmocnienie K	Stała czasowa T [s]
X	0,2825	0,5989
Y	0,5463	0,0524
Z	0,1370	0,0264

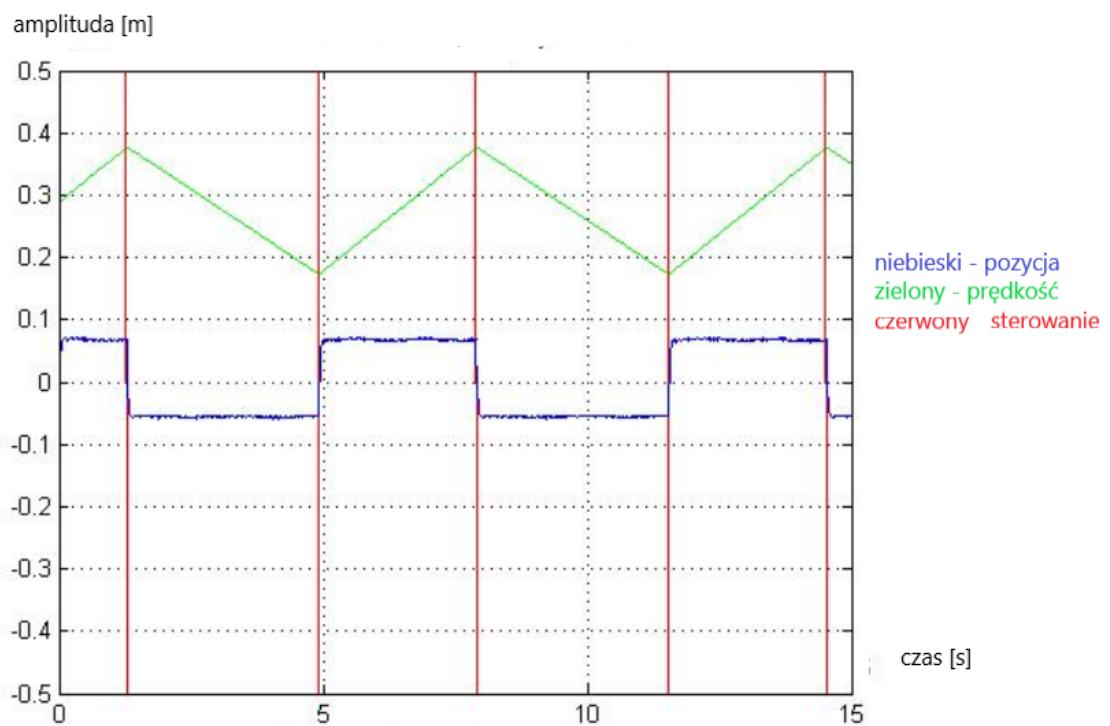
Wyniki identyfikacji parametrów silników określone na podstawie położenia / zmiany położenia ciężarka obiektu rzeczywistego dla odpowiednio osi x, y, z. Na rysunkach (3.2) - (3.4) przedstawiono przebiegi pozycji, prędkości oraz sygnału sterującego w dziedzinie czasu.



Rys. 3.2. Pozycja, prędkość oraz sterowanie dla osi X (Czas, Amplituda)

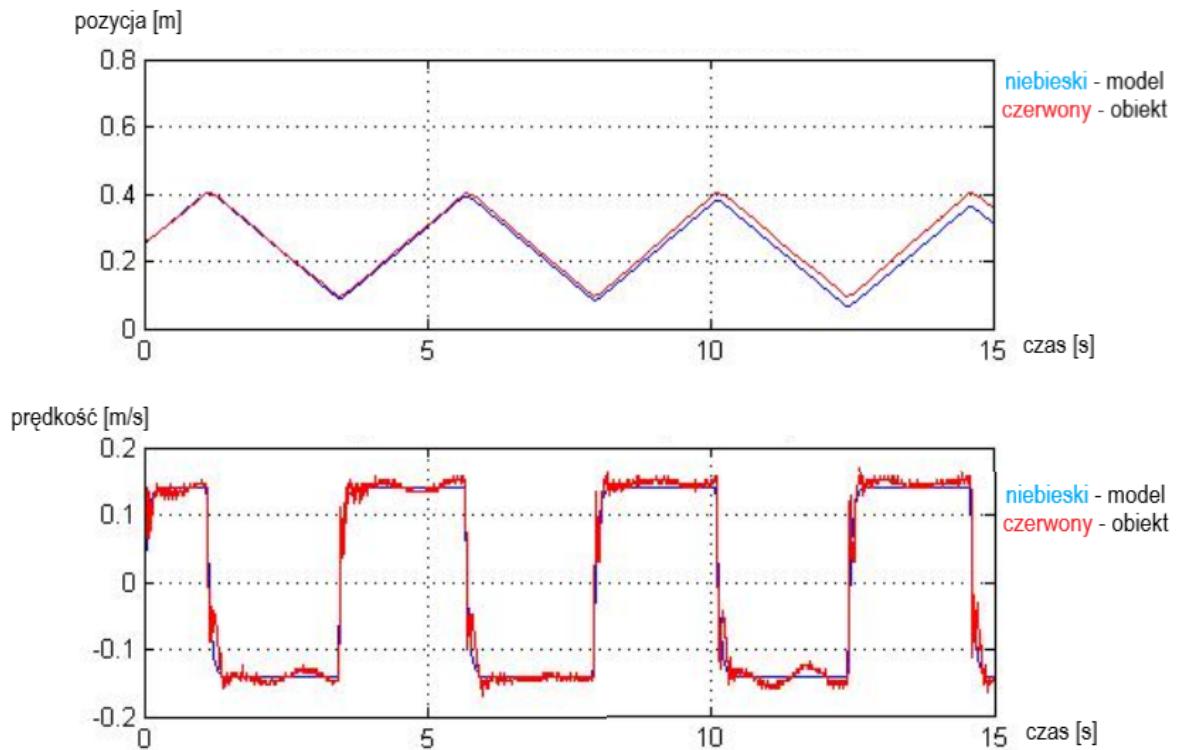


Rys. 3.3. Pozycja, prędkość oraz sterowanie dla osi Y (Czas[s], Amplituda)

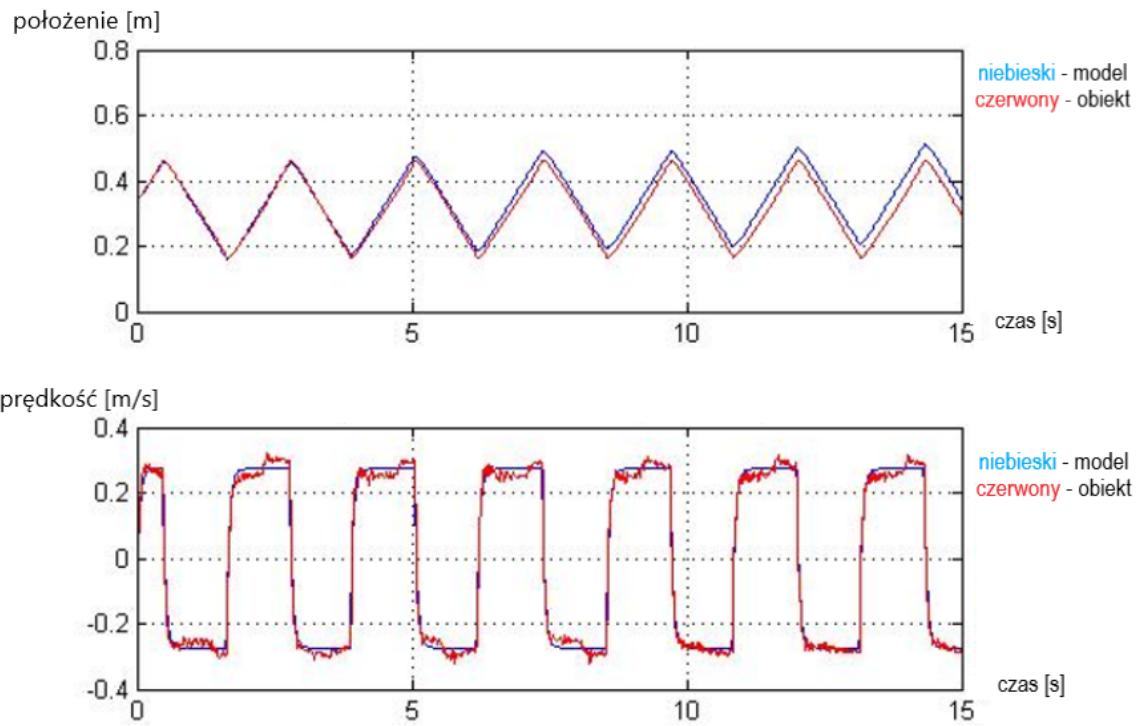


Rys. 3.4. Pozycja, prędkość oraz sterowanie dla osi Z (Czas[s], Amplituda)

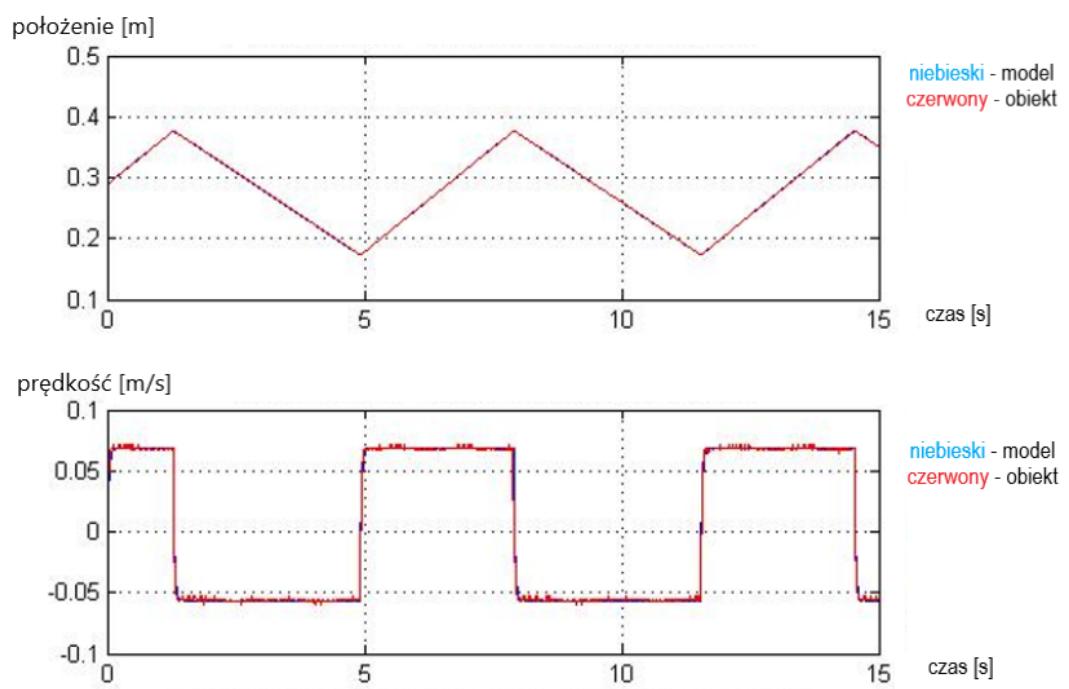
Wyznaczone opisy zostały również porównane do opisu matematycznego badanego obiektu. Test ten wykonano na podstawie porównania przebiegów teoretycznych (na modelu matematycznym zaimplementowanym w środowisku Matlab) do przebiegów z obiektem rzeczywistego (patrz rysunki 3.5 - 3.7).



Rys. 3.5. Porównanie przebiegu aktualnej pozycji ciężarka w czasie, oraz przebiegu prędkości w czasie dla obiektu symulacyjnego a rzeczywistego dla osi X



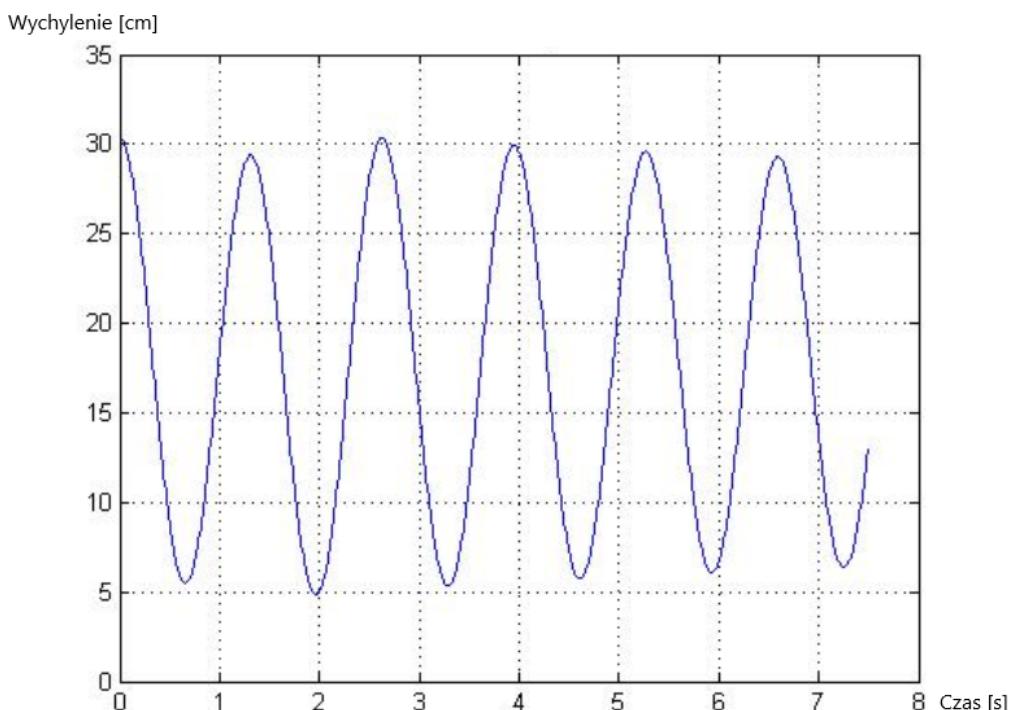
Rys. 3.6. Porównanie przebiegu aktualnej pozycji ciężarka w czasie, oraz przebiegu prędkości w czasie dla obiektu symulacyjnego a rzeczywistego dla osi Y



Rys. 3.7. Porównanie przebiegu aktualnej pozycji ciężarka w czasie, oraz przebiegu prędkości w czasie dla obiektu symulacyjnego a rzeczywistego dla osi Z

Biorąc pod uwagę zużycie materiałów, suwnica na której przeprowadzane są badania znajduje się na uczelni od dawna, zatem jej parametry uległy zmianie ze względu na ich niestacjonarność. Analizując wyniki (rysunki 3.5 - 3.7), są one akceptowalne, gdyż w wystarczającym stopniu odwzorowują rzeczywistość. Dalsze badania algorytmów sterowania przeprowadzone zostaną tylko na obiekcie rzeczywistym, a nie na modelu suwnicy 3D.

Dostępne jest również narzędzie wbudowane, które umożliwia odczytanie długości, oraz okresu wahadła (patrz rysunek 3.8).



Rys. 3.8. Okres drgań wahadła oraz jego długość

Okres drgań wahadła wyrażony jest w sekundach i wynosi $T = 1,32\text{s}$. Długość linki doczepionej do ciężarka (długość wahadła) wyrażony jest w metrach i wynosi $l = 0,43\text{m}$.

Przyjmując, że badany przez nas obiekt składający się z ciężarka i linki to wahadło matematyczne, wartość okresu T może zostać obliczona na podstawie długości wahadła oraz na odwrót tzn. wartość l może zostać obliczona na podstawie okresu albo częstotliwości. Zależność ta przedstawiona jest wzorem 3.4.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (3.4)$$

gdzie:

T - okres drgań [s]

l - długość wahadła [m]

g - przyspieszenie ziemskie [$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$]

4. PROJEKTOWANIE ALGORYTMÓW REGULACJI SUWNICĄ

4.1. Wprowadzenie

Projektowanie algorytmów sterowania odnosi się do procesu tworzenia zestawu kroków lub reguł, które określają, jakie działania lub operacje należy wykonać w celu skierowania systemu lub urządzenia w określonym kierunku lub osiągnięcia określonego celu. Algorytmy sterowania są szeroko stosowane w różnych gałęziach przemysłu.

Proces projektowania algorytmów regulacji jest wieloetapowy. Nieodzownym elementem tego działania jest wypełnienie każdego etapu w odpowiedniej kolejności. Cały proces składa się z następujących kroków:

- Zdefiniowanie celów regulacji
- Modelowanie obiektu
- Sprawdzenie stabilności obiektu
- Wybór algorytmu sterowania
- Dobór parametrów
- Implementacja na obiekcie
- Optymalizacja parametrów [9]

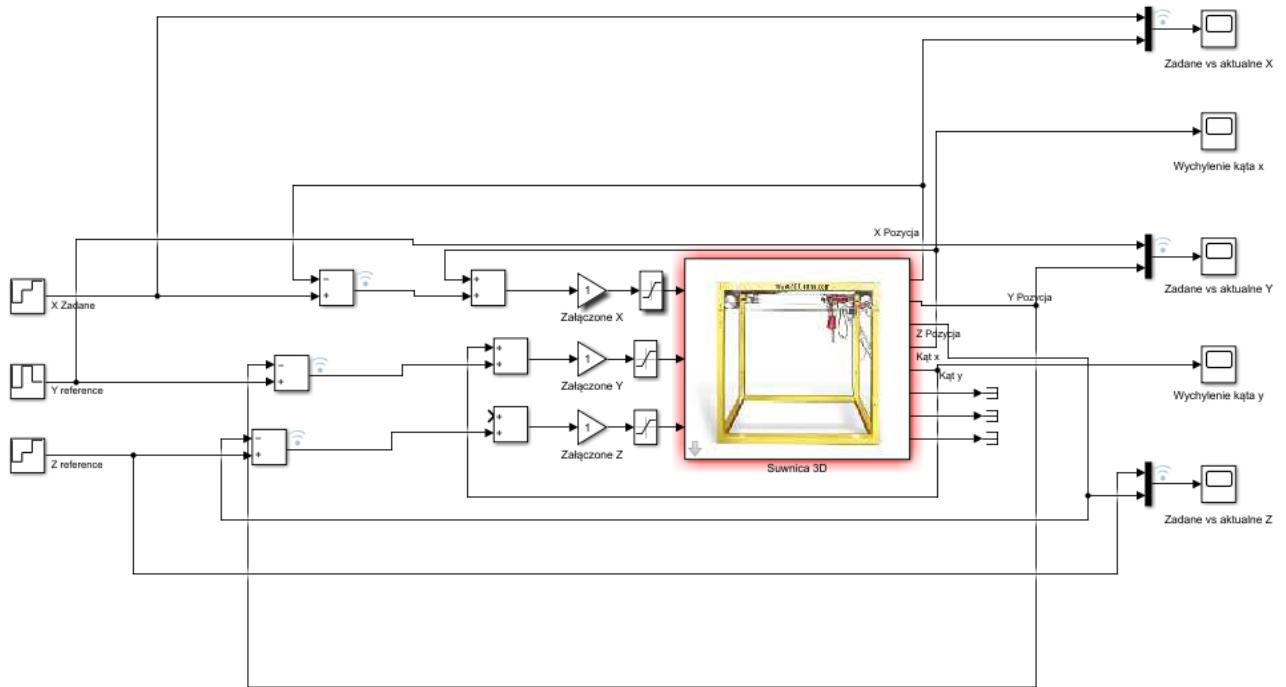
Najpopularniejszym algorymem regulacji jest algorytm PID, który jest szeroko stosowany w różnych gałęziach przemysłu. Projektowanie algorytmu PID polega na znalezieniu odpowiednich wartości K_p , K_i , K_d , które zapewnią stabilne i dokładne sterowanie systemem. Jest to zazwyczaj robione eksperymentalnie lub za pomocą zaawansowanych technik optymalizacji.

Istnieją również różne odmiany układów PID, które są modyfikacjami podstawowego regulatora PID, a ich wybór zależy od konkretnych wymagań i charakterystyki systemu, który ma być regulowany. Jedną z odmian jest omawiany w dalszej części regulator PID ułamkowego rzędu, który zostanie dokładnie opisany w pracy inżynierskiej.

Ponadto, istnieją inne algorytmy regulacji, takie jak algorytmy regulacji predykcyjnej, LQR (ang. Linear - Quadratic Regulator) czy algorytmy regulacji adaptacyjnej, które są używane w bardziej zaawansowanych i specjalistycznych zastosowaniach. Wybór algorytmu regulacji zależy od charakterystyki systemu, celu regulacji oraz dostępnych zasobów i wymagań.

4.2. Uzasadnienie stosowania algorytmów regulacji

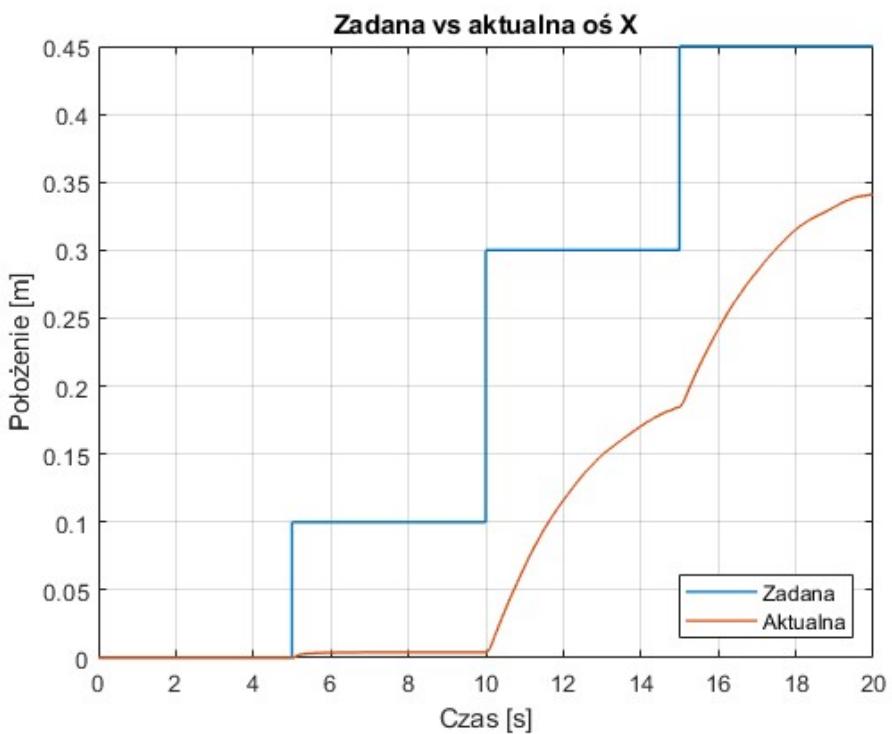
Mając na uwadze złożoność procesu projektowania układu regulacji oraz czas potrzebny do jego wykonania, warto zastanowić się czy jest to opłacalne. Przeprowadzono zatem badania dotyczące zachowania się omawianej suwnicy bez użycia algorytmów sterowania. Z układu wyłączone zostało działanie regulatorów PID dla wszystkich dostępnych osi oraz odchyleń kątowych. Zarejestrowane zostały przebiegi wartości zadanej (referencyjnej), wartości aktualnej, uchybu (błędu) regulacji oraz kryteria całkowatego jakości sterowania (całka z uchybu). Na rysunku 4.1 przedstawiono ogólny schemat układu suwnicy z odłączonymi regulatorami PID.



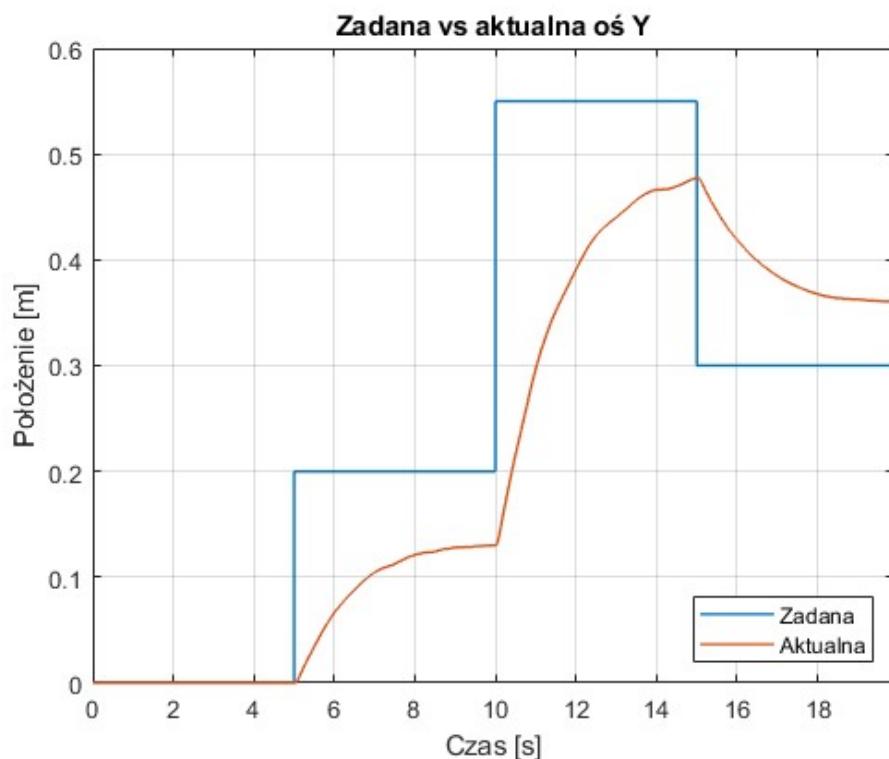
Rys. 4.1. Schemat badawczy zachowania układu bez regulacji

Następnie wprowadzone zostały sekwencje sygnałów referencyjnych, różniące się od siebie dla każdej z trzech osi. Kolejnym krokiem było uruchomienie suwnicy w celu zebrania danych eksperymentalnych. Otrzymane wyniki dla osi x, y, z oraz odchylenia ciężarka w osi x, y zostały przedstawione na rysunkach (4.2) - (4.6).

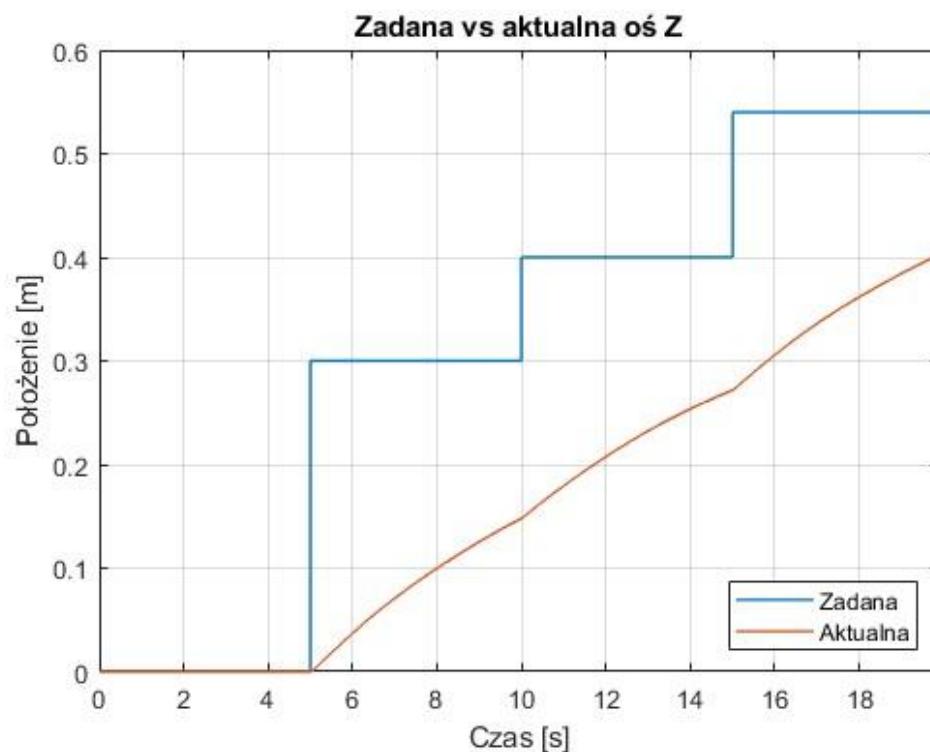
Wszystkie prezentowane przebiegi wykonane na obiekcie rzeczywistym w dalszej części pracy będą zaczynały się od 5 sekundy. Wynika to z faktu, że suwnica zaprogramowana jest tak, aby swoją sekwencję (trajektorię zadaną) rozpoczynała w punkcie początkowym. Zatem pierwszy przedział czasu (0-5s) będzie widoczny na wykresie jako linia prosta o położeniu = 0, ponieważ przed każdym testowaniem algorytmów suwnica w sposób ręczny była przesuwana do punktu startowego tak, aby pomiar nie był zakłócony.



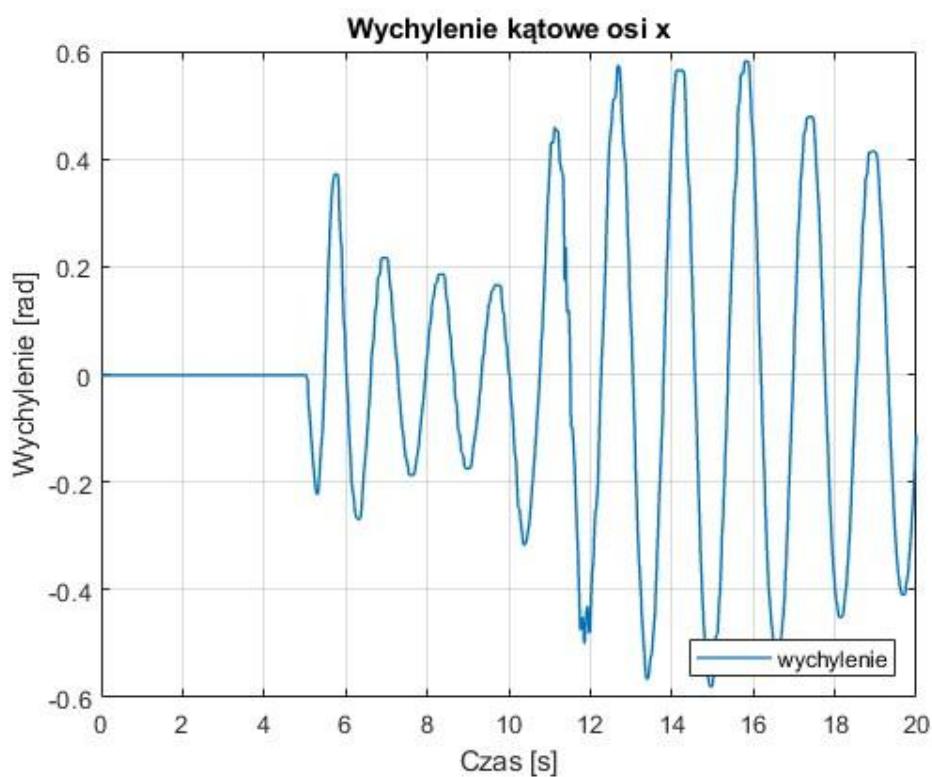
Rys. 4.2. Porównanie wartości zadanej oraz aktualnej położenia ciężarka w osi x bez regulacji



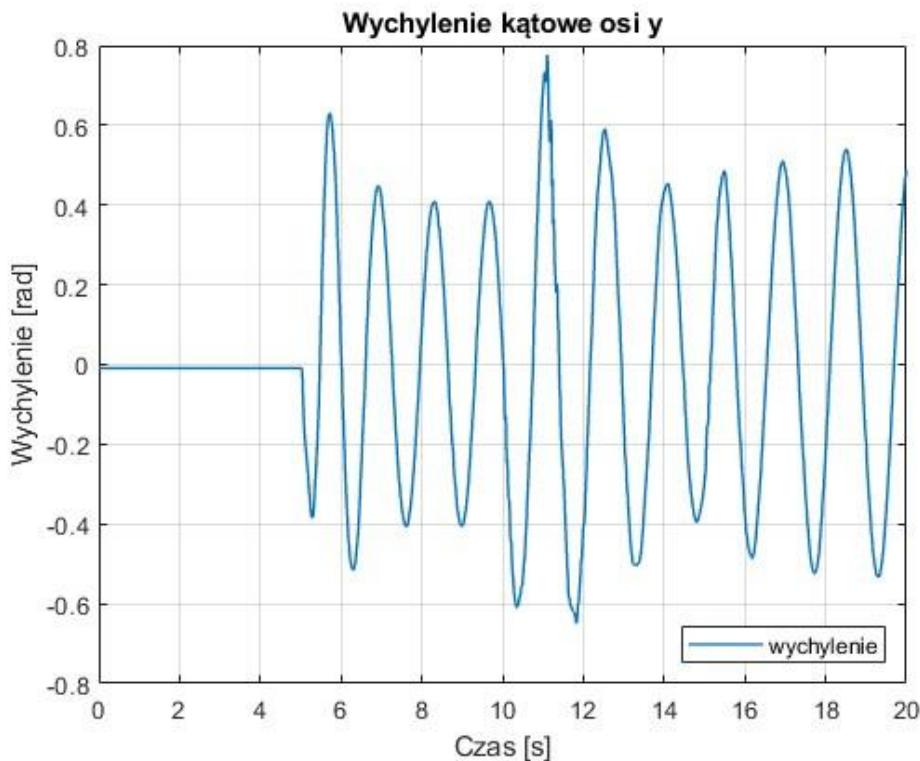
Rys. 4.3. Porównanie wartości zadanej oraz aktualnej położenia ciężarka w osi y bez regulacji



Rys. 4.4. Porównanie wartości zadanej oraz aktualnej położenia ciężarka w osi z bez regulacji



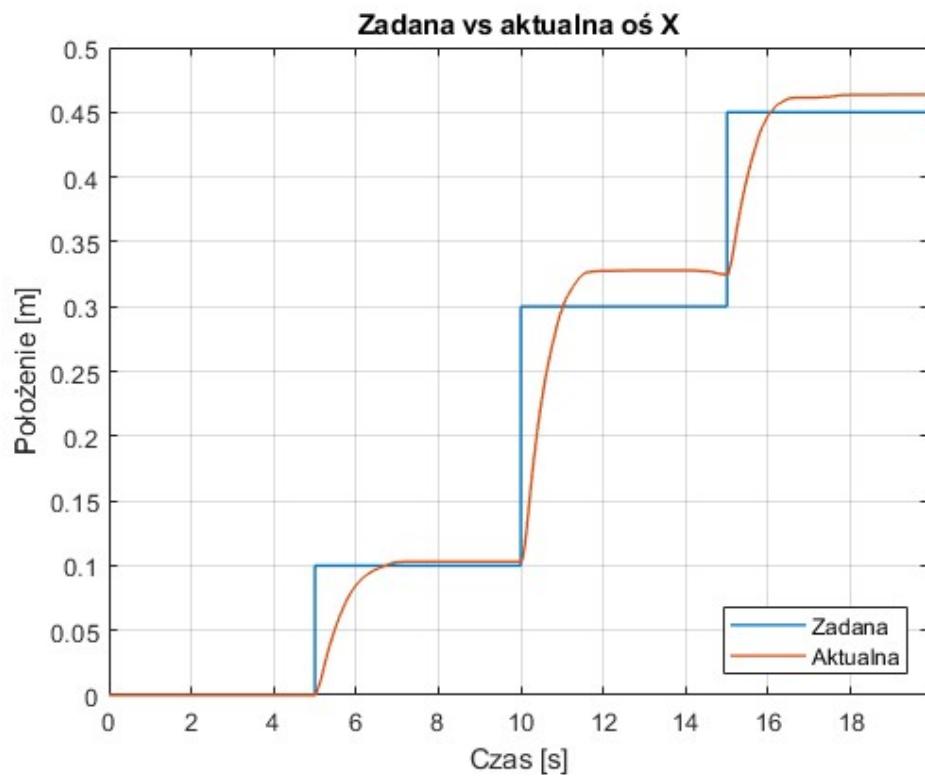
Rys. 4.5. Wychylenie kątowe w osi y bez regulacji



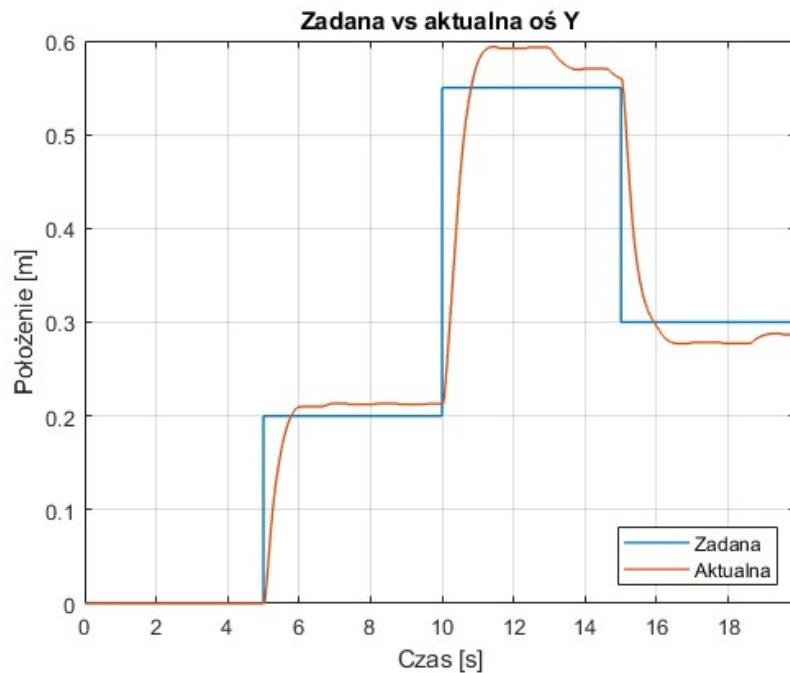
Rys. 4.6. Wychylenie kątowe w osi y bez regulacji

Przedstawione przebiegi w sposób jednoznaczny odpowiadają na postawione pytania odnośnie opłacalności stosowania algorytmów regulacji w obiektach dynamicznych. W każdym z trzech przypadków (os x, y, z), wielkość sterowana nawet nie zbliżała się do trajektorii zadanej. Również odchylenia kątowe w osi x i y osiągają duże wartości. Maksymalne wychylenia wynoszą około 0,8 radiana (45°). Niedopuszczalne jest, aby jakikolwiek ładunek podczas przenoszenia wychylał się o połowę wartości kąta prostego w obydwu kierunkach. W przypadku suwnicy przemysłowej, takie błędy regulacji byłyby nieakceptowalne, ponieważ ładunek zostałby zniszczony oraz umiejscowiony w zupełnie innym położeniu niż docelowe. Analizując przebiegi (4.2) - (4.4), bez problemu można wywnioskować, że nawet po znacznym wydłużeniu czasu trwania każdego z przedziałów, uchyb by pozostał. Najlepiej obrazuje to oś y, w której wartość aktualna za każdym razem zaczyna stabilizować się mniej więcej na poziomie $\frac{2}{3}$ wartości zadanej (wymuszonej). Zatem zastosowanie układu regulacji w tym przypadku nie niezbędne do prawidłowego działania suwnicy. Ponadto dobrze dobrane nastawy pomogą zredukować koszty energii, wydłużyć żywotność urządzeń wykonawczych oraz poprawić jakość wykonywanych usług.

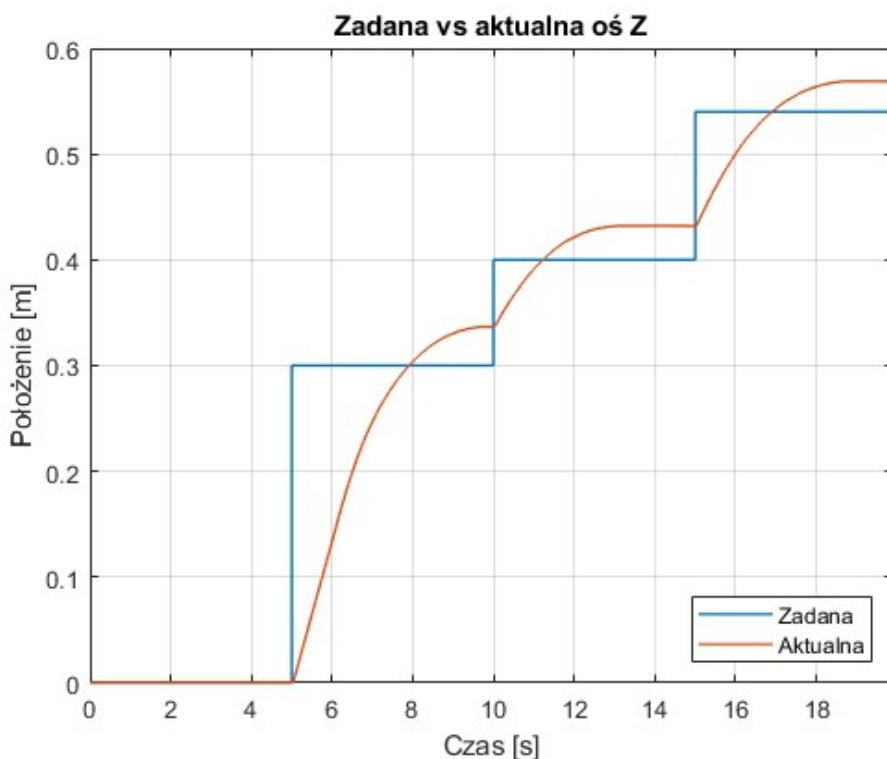
W celu dosadniejszego przedstawienia zasadności stosowania optymalizacji nastaw układów regulacji, przeprowadzony został kolejny eksperyment. Tym razem zaimplementowane zostały regulatory PID z parametrami dobranymi "na oko", to znaczy z każdą próbą każdy z trzech parametrów był zwiększany lub zmniejszany zależnie od reakcji układu. Po około 5 próbach odpowiedź układu regulacji z nastawami dobieranymi metodą eksperymentalną prezentują rysunki (4.7) - (4.11).



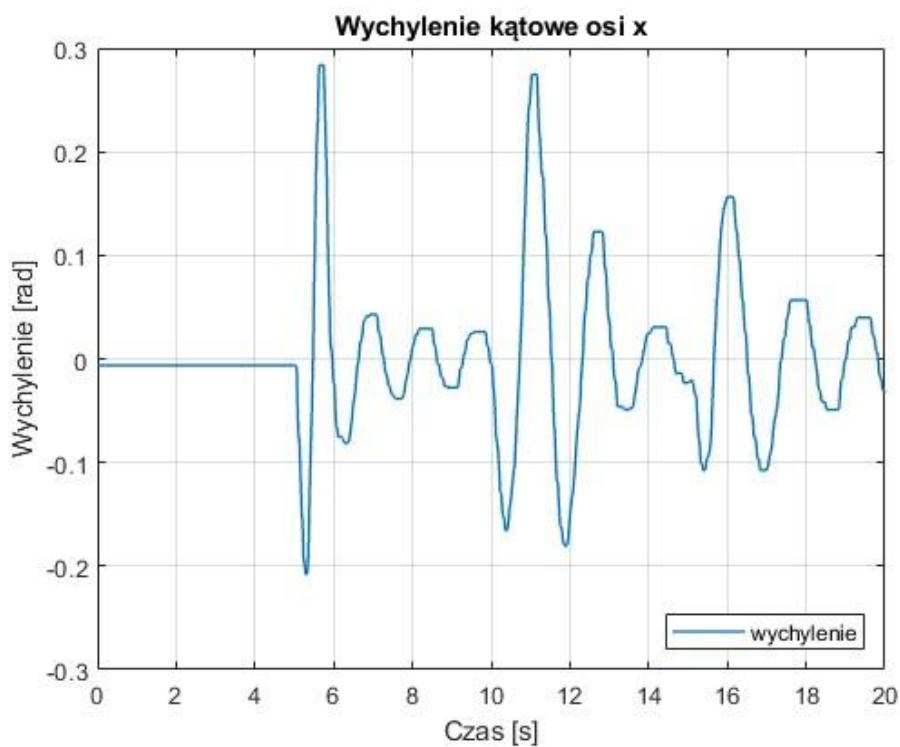
Rys. 4.7. Porównanie wartości zadanej oraz aktualnej położenia ciężarka w osi x wraz z nastawami regulatora PID dobranymi w sposób eksperymentalny



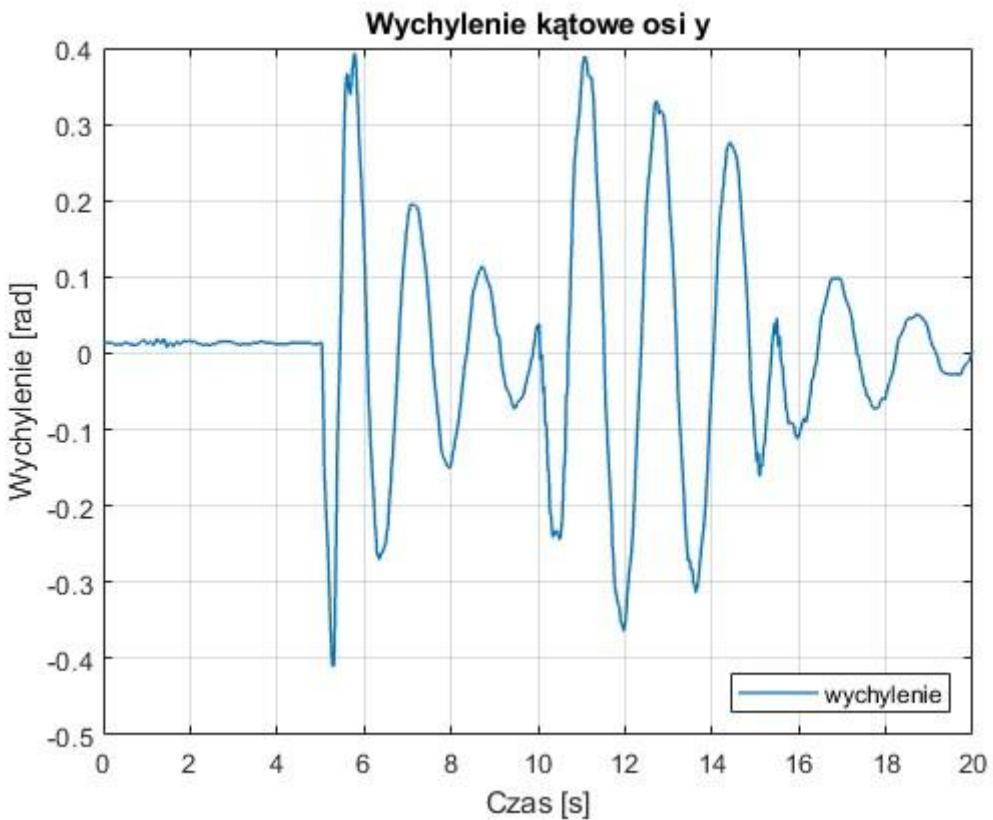
Rys. 4.8. Porównanie wartości zadanej oraz aktualnej położenia ciężarka w osi y wraz z nastawami regulatora PID dobranymi w sposób eksperymentalny



Rys. 4.9. Porównanie wartości zadanej oraz aktualnej położenia ciężarka w osi z wraz z nastawami regulatora PID dobranymi w sposób eksperymentalny



Rys. 4.10. Wychylenie kątowe w osi x wraz z nastawami regulatora PID dobranymi w sposób eksperymentalny



Rys. 4.11. Wychylenie kątowe w osi y wraz z nastawami regulatora PID dobranymi w sposób eksperymentalny

Przedstawione wykresy prezentują poprawę jakości przebiegów wartości aktualnej względem sytuacji bez działania regulatora. Jednakże w żadnej z trzech osi ani razu nie udało się osiągnąć uchybu zbliżonego do 0. Wychylenia kątowe uległy poprawie, lecz ciężarek (ładunek) w dalszym ciągu nie poruszał się w sposób wystarczająco stabilny. Są to wyniki wciąż niesatysfakcjonujące, więc niezbędne jest zastosowanie optymalizacji nastaw parametrów przeprowadzonej w podrozdziałach 4.4 - 4.5.

4.3. Opis procesu optymalizacji

Istnieją dwie drogi doboru nastaw regulatora. Pierwsza metoda jest to dobór nastaw na podstawie metod inżynierskich, natomiast druga metoda (dokładniejsza) - dobór nastaw z wykorzystaniem metod optymalizacji. Do pierwszej grupy należą metody doboru np. takie jak: pierwsza i druga metoda Zieglera – Nicholsa, metoda Passena, metoda Hassena i Offereissena. Do drugiej metody, czyli optymalizacji można zaliczyć działania takie jak: optymalizacja gradientowa, optymalizacja wielokryterialna, lub algorytm ewolucyjny. [10]

Celem zarówno metod inżynierskich, jak i optymalizacji jest osiągnięcie wymaganych wskaźników jakości regulacji, np.: [11]

- Parametry odpowiedzi skokowej: uchyb w stanie ustalonym, czas regulacji, czas narastania, przeregulowanie procentowe

- Kryterium stabilności aperiodycznej
- Kryteria częstotliwościowe: zapas modułu i fazy
- Kryteria całkowe:

- Całka z uchybu:

$$I = \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (4.1)$$

gdzie:

I - oznaczenie kryterium jakości całkowego;

e - uchyb regulacji.;

t - czas [s]

- Całka z kwadratu uchybu:

$$I = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (4.2)$$

- Całka z uchybu i czasu:

$$I = \int_0^{\infty} t e(t) dt \quad (4.3)$$

- Całka z modułu uchybu:

$$I = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (4.4)$$

- Całka z czasu i modułu uchyb:

$$I = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (4.5)$$

- Całka z sumy kwadratu uchybu i kwadratu pochodnej uchybu z wagą:

$$I = \int_0^{\infty} (e^2(t) + \hat{ae}(t)) dt \quad (4.6)$$

gdzie:

a = waga pochodnej uchybu

- Całka z modułu różnicy uchybu dynamicznego i statycznego:

$$I = \int_0^{\infty} e(t) - e_{st} dt \quad (4.7)$$

gdzie:

$$e_{st} = \text{uchyb statyczny}$$

- Moduł z całki z różnicą uchybu dynamicznego i statycznego:

$$I = \left| \int_0^{\infty} e(t) - e_{st} dt \right| \quad (4.8)$$

- Całka z kwadratu różnicy uchybu dynamicznego i statycznego

$$I = \int_0^{\infty} (e(t) - e_{st})^2 dt \quad (4.9)$$

W procesie optymalizacji wykorzystuje się wskaźniki jakości dynamicznej. Tego typu wskaźniki określają wielkości strat poniesionych podczas procesu sterowania. Całka odpowiada polu pomiędzy funkcją kryterialną a asymptotą (do tej asymptoty dąży dana funkcja). Im mniejsze będzie to pole, tym lepsze jakościowo będzie sterowanie zgodnie z przyjętym kryterium.

Na potrzeby przeprowadzonych badań, jako funkcja celu została wybrana całka z kwadratu uchybu, ponieważ w przypadku tego kryterium, większe błędy są bardziej znaczące ze względu na podnoszenie ich do drugiej potęgi. W pracy zoptymalizowane zostały nastawy regulatorów dla osi: x, y, z oraz odchylenia kątowego w osi x (kąt γ) i w osi y (kąt δ). Wszystkie z pięciu wymienionych regulatorów optymalizowane były osobno. To znaczy, funkcja optymalizująca dla każdej próby wywoływana była pięciokrotnie (dla 5 różnych modeli).

Środowisko Matlab oferuje opcjonalną bibliotekę "Optimization Toolbox" zawierającą różne funkcje optymalizujące, w tym te odpowiadające metodzie quasi newtonowskiej. Na potrzeby doboru nastaw wybrana została funkcja fmincon. Pozwala ona na zdefiniowanie mnogiej ilości argumentów wejściowych, takich jak: kryterium zatrzymania, ograniczenia dolne i górne, punkt początkowy poszukiwań oraz dodatkowe opcje optymalizacji. Poszukuje minimum nieliniowej funkcji wielu zmiennych a więc nadaje się do doboru parametrów regulatorów suwnicy. Opiera się na zaawansowanych algorytmach numerycznych, które zapewniają wysoką skuteczność kosztem czasu potrzebnego na obliczenia. Jest ona zdefiniowana wewnątrz programu, po uzupełnieniu argumentów (danych wejściowych) następuje jej wywołanie. Definicja matematyczna funkcji i ograniczeń zaprezentowana została wzorem (4.10).

$$\min_x F(x), \text{ przy ograniczeniach:} \quad (4.10)$$

$$c(x) \leq 0$$

$$ceq(x) = 0$$

$$A * x \leq b$$

$$Aeq * x = beq$$

$$lb \leq x \leq ub$$

gdzie:

$F(x)$ – funkcja celu,

C(x) - ograniczenia nieliniowe (układ równań nierównościowych),

ceq(x) - ograniczenia nieliniowe (układ równań równościowych),

A – macierz ograniczeń liniowych nierównościowych,

x – wektor zmiennych decyzyjnych,

b – liniowe ograniczenia nierównościowe,

Aeq – macierz ograniczeń (liniowych równościowych),

beq – liniowe ograniczenia równościowe.

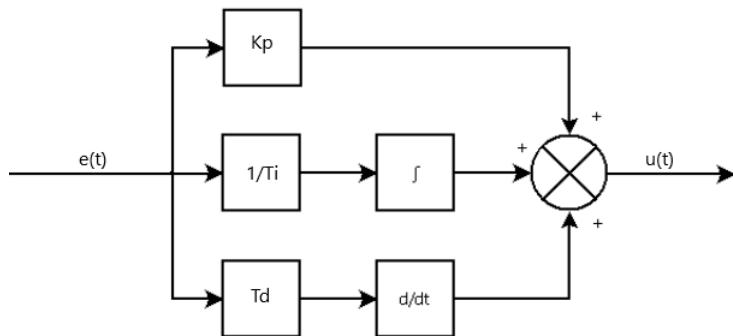
Ib – ograniczenie na zmienne decyzyjne (dolna granica) .

y_b – ograniczenie na zmienne decyzyjne

4.4. Part 4.1 - P/D

Regulator PID

Derivative) to jeden z najczęściej stosowanych rodzajów regulatorów wykorzystywanych w różnych gałęziach przemysłu. Jest używany do sterowania systemami dynamicznymi w celu utrzymania określonego stanu lub określonej wartości zadanej (sterowanej). Poprzez odpowiednie sterowanie sygnałem jakość sterowania zgodnie z wybranymi kryteriami jest utrzymywana na określonym poziomie. W praktyce wyróżniamy dwie odmiany regulatora PID: równoległy oraz szeregowo-równoległy. Na rysunku (4.12) przedstawiony został schemat blokowy regulatora równoległego PID IND (ang. INDependent). Odmiana ta charakteryzuje się brakiem wpływu wzmacnienia części proporcjonalnej K_p na dwie pozostałe części regulatora. Taka niezależność ułatwia odpowiedni dobór nastaw. Z tego powodu wersja ta została użyta jako pierwszy rodzaj testowanego regulatora w pracy.



Rys. 4.12. Schemat blokowy regulatora PID równoleglego IND

Sygnal sterowania regulatora równoległego prezentuje się następująco:

$$U(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.11)$$

gdzie:

K_p = wzmacnienie części proporcjonalnej,

T_i = stała czasowa całkowania (przedstawiana zamiennie jako K_i przy czym K_i to odwrotność T_i),

T_d = stała czasowa różniczkowania (przedstawiana zamiennie jako K_d przy czym $K_d = T_d$).

Sygnal ten można również przedstawić w dziedzinie operatora "s" Laplace'a. Aby tego dokonać, należy zastosować transformatę Laplace'a. Jest to matematyczna technika używana w analizie matematycznej oraz automatyce. Służy do przekształcania funkcji czasu na funkcję zespoloną zmiennej związanej z czasem. Jest przydatna przy wielu operacjach: rozwiązywanie równań różniczkowych, modelowanie obiektów, synteza systemu sterowania. Jej matematyczny zapis prezentuje się następująco: [12]

$$F(s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt \quad (4.12)$$

gdzie:

$F(s)$ = transformata Laplace'a funkcji $f(t)$,

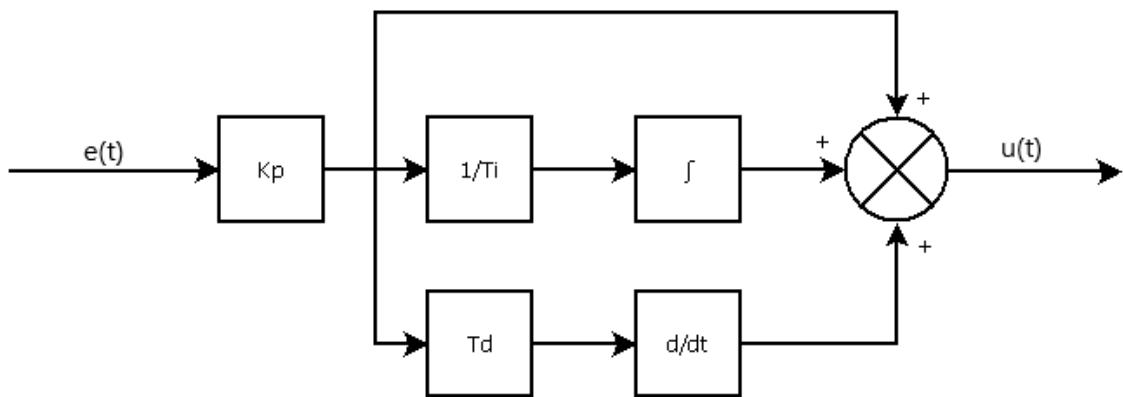
e = liczba Eulera,

s = operator Laplace'a / zmienna zespolona.

Sygnal sterujący omawianego regulatora przedstawiony został w postaci transmitancji wzorem 4.13.

$$G(s) = K_p + \frac{1}{T_i s} + T_d s \quad (4.13)$$

Następną odmianą regulatora PID jest wersja szeregowa. Różni się położeniem wzmacnienia części proporcjonalnej. W tym przypadku, wpływa ono zarówno na część całkującą, jak i różniczkującą. Schemat blokowy przedstawiono na rysunku 4.13.



Rys. 4.13. Schemat blokowy regulatora PID szeregowego idealnego ISA (ang. ideal standard algorithm)

Jego sygnał sterujący $u(t)$ prezentowany jest wyrażeniem 4.14:

$$U(t) = e(t)(K_p + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (4.14)$$

Natomiast transmitancja reprezentowana jest wzorem 4.15:

$$G(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (4.15)$$

Najważniejszym elementem obu regulatorów jest odpowiedni dobór wzmocnienia trzech różnych członów. Każdy z nich cechuje się unikalnym działaniem:

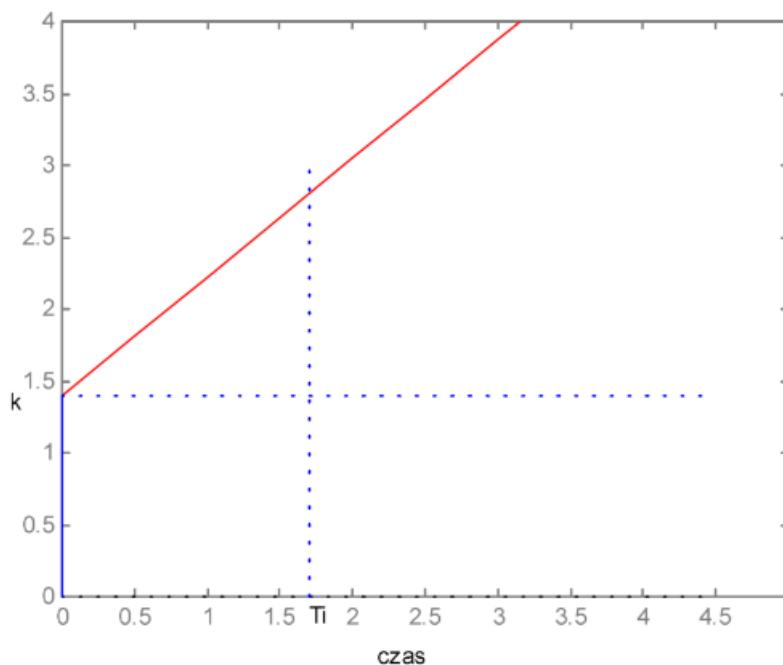
- Człon proporcjonalny:

W tym członie brana pod uwagę jest różnica między wartością zadaną a zmienną procesową. Związany jest z nim parametr opisany symbolicznie jako K_p określany jest jako wzmocnienie części proporcjonalnej regulatora PID. K_p jest to stosunek odpowiedzi wyjściowej w stosunku do sygnału błędu. Poprawny dobór K_p jest kluczowy - wraz z jego wzrostem, zwiększa się szybkość odpowiedzi układu sterowania, natomiast nie można tego robić w nieskończoność, ponieważ może to skutkować niestabilnością układu. Z przesadnym zwiększeniem wzmocnienia części proporcjonalnej wiąże się występowanie przeregulowania, czyli istotne przekroczenie przez zmienną procesową wartości zadanej. Istnieje wartość K_p określana jako krytyczna - układ od tej wartości wzmocnienia związanego z częścią proporcjonalną nie będzie się stabilizować szybciej. W tej sytuacji w układzie regulacji będą się pojawiać przeregulowania, które są niechcianym zjawiskiem w procesie sterowania. Gdy zakres K_p zostanie znacznie przekroczony, zmienna procesowa zacznie oscylować względem wartości zadanej. Z tą sytuacją powiązane są coraz to większe oscylacje sygnału, skutkujące destabilizacją lub całkowitym rozregulowaniem systemu. Człon proporcjonalny zwiększa dynamikę reakcji układu.

- Człon całkujący:

Występowanie członu całkującego powoduje sprowadzenie uchybu sterowania $e(t)$ do zera (człon proporcjonalny może uchyb zminimalizować, ale nie sprowadzić do zera). Człon ten służy do zwiększenia długoterminowej precyzji pętli sterowania. Jego zadaniem jest sumowanie uchybu sterowania $e(t)$ - powoduje to stopniowe wzmacnianie lub osłabianie sygnału sterującego (ta sytuacja występuje przy niezerowym uchybie $e(t)$). Oznacza to, że w stanie ustalonym będzie zniwelowany. W przypadku zastosowania regulatora z członem całkującym, błąd będzie ciągle całkowany, czyli wyrażenie całkujące może osiągnąć bardzo wysoką wartość. Na tą sytuację potocznie mówimy, że błąd "nawija się" - "winds up". Przy ciągłym wzroście uchybu, układ wypada ze stabilizacji - narzędziem, które zapobiega nasycaniu układu (jest to ściśle związane z występowaniem części całkującej) jest filtr przeciwnasyceniowy. W praktyce rzadko stosuje się regulator jedynie z członem I ze względu na możliwość utraty stabilności przez układ. Człon ten kompensuje sumę uchybów z przeszłości [13]. Zbyt duża wartość wzmacnienia członu całkującego powoduje wydłużenie czasu odpowiedzi układu. Stała czasowa całkowania, inaczej czas zdwojenia, oznacza czas po którym wartość odpowiedzi regulatora na wymuszenie skokowe podwoi się w stosunku do wartości w chwili początkowej. Po osiągnięciu czasu T_i , część sygnału wyjściowego wywołanego działaniem proporcjonalnym osiągnie wartość podwojoną [14].

Na rysunku 4.14 przedstawiono odpowiedź regulatora PI dla wzmacnienia $K_p = 1,4$ oraz $T_i = 1,7$. Sygnał wyjściowy po upływie czasu zdwojenia podwoił swoją wartość początkową do 2,8.



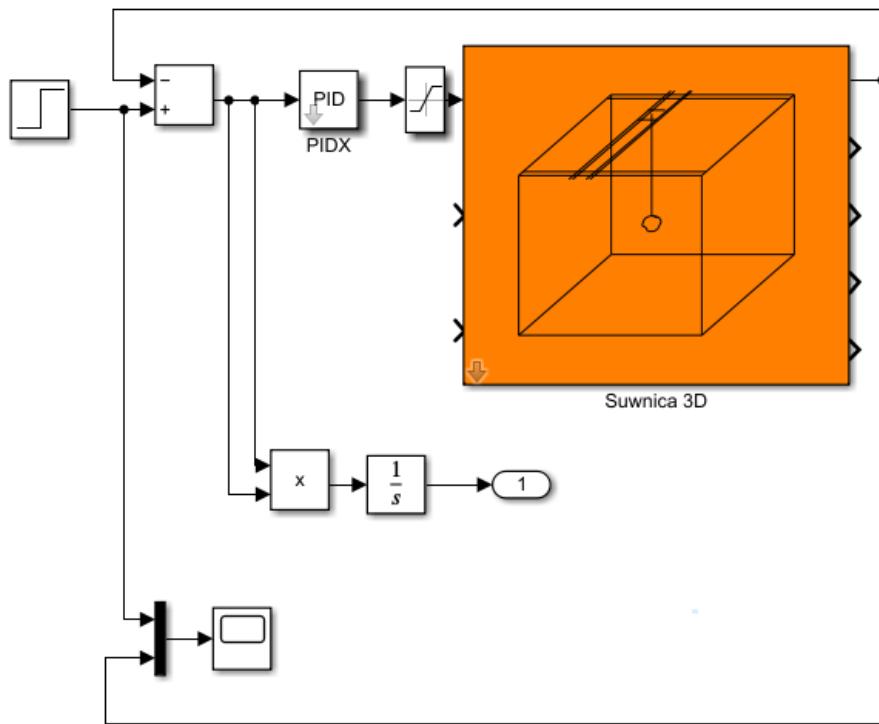
Rys. 4.14. Zobrazowanie wpływu stałej czasowej całkowania regulatora [14]

- Człon różniczkujący:

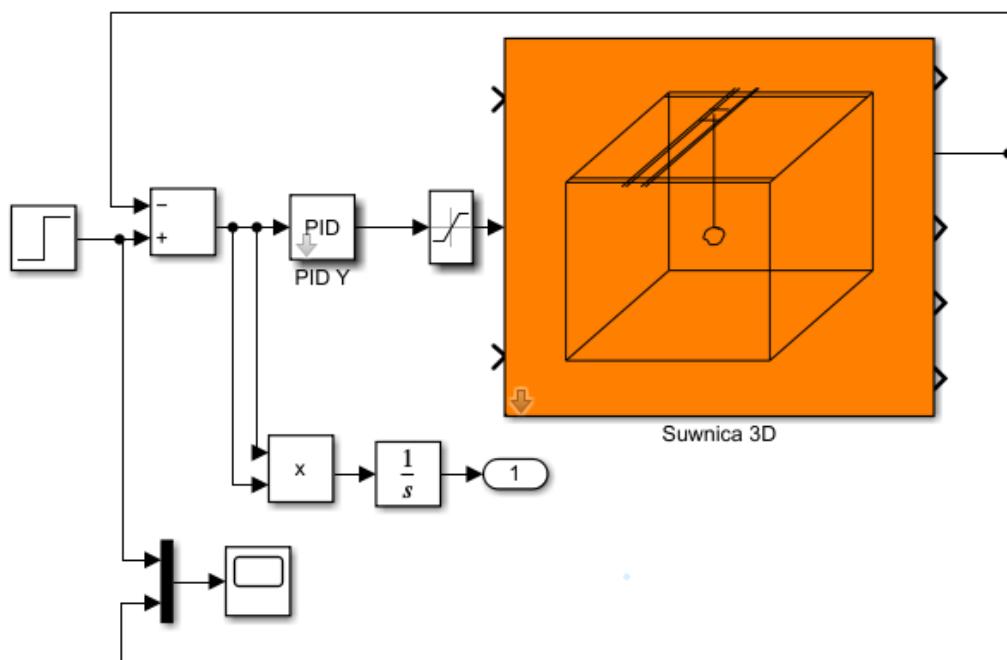
Człon różniczkujący D (ang. Derivative) generuje sygnał sterujący proporcjonalny do szybkości zmiany uchybu. Człon ten jest ścisłe powiązany ze stanami przejściowymi a jego zadaniem jest zniwelowanie błędu. Działa przewidując, jak szybko zmienia się błąd i zapobiega nagłym zmianom sygnału. Kompensuje on wartości uchybów z przeszłości. Wraz ze wzrostem wzmocnienia części różniczkującej K_d układ silniej reaguje na zmiany uchybu i zwiększa się szybkość odpowiedzi układu sterowania. Zaleca się ustawianie małej wartości K_d ze względu na wrażliwość członu D na szумy w sygnale (zakłócenia). Gdy zakłócenia są duże, człon D przyczyni się do zdestabilizowania układu sterowania. Występowanie członu różniczkującego pozwala skrócić czas regulacji (czas odpowiedzi), natomiast nie pozwala on na zniwelowanie uchybu w stanie ustalonym (żeby to osiągnąć trzeba dodać człon całkujący). Stała czasowa w członie różniczkującym, określana jako T_d ($T_d = K_d$) inaczej czas wyprzedzenia oznacza czas potrzebny na to, aby przy liniowo narastającym wymuszeniu podanym na wejście regulatora PD, sygnał związany z działaniem proporcjonalnym zrównał się z sygnałem pochodząącym od działania różniczkującego [9].

4.4.2. Optymalizacja nastaw

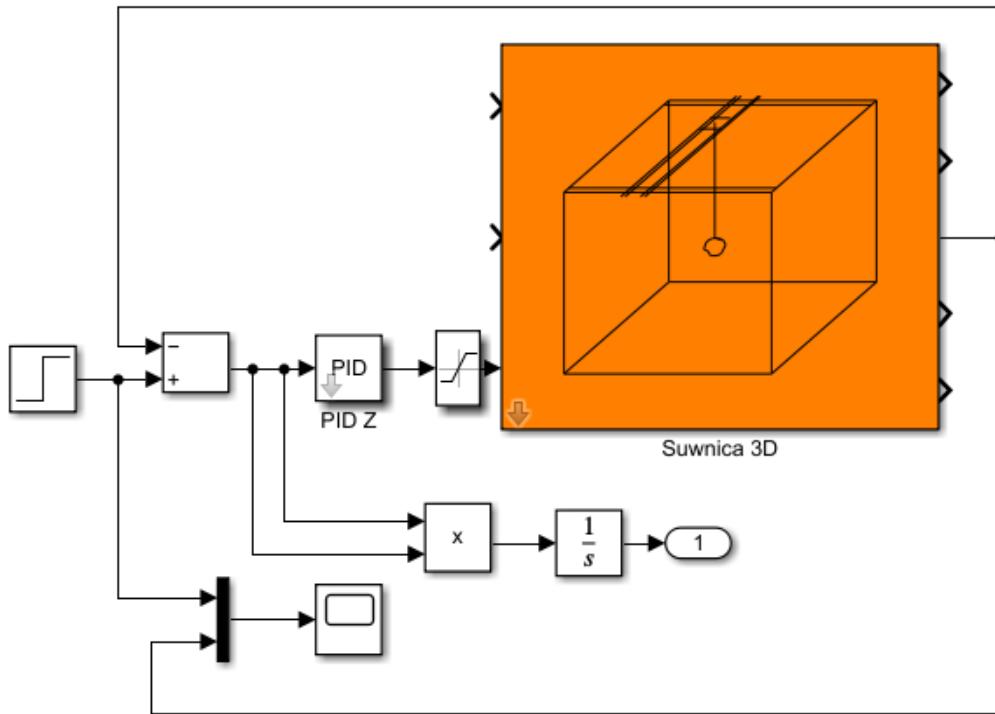
Ważnym elementem procesu optymalizacji dobranie odpowiednich ograniczeń górnych i dolnych oraz wartości punktu początkowego dla nastaw. Aby uzyskać najlepsze możliwe wyniki, optymalizacja została przeprowadzona kilkukrotnie dla wszystkich z pięciu regulatorów, następnie porównywane zostały wyniki każdej z nich. Poszczególne modele służące do optymalizacji przedstawione zostały na rysunkach (4.15) - (4.19).



Rys. 4.15. Model przygotowany w celu optymalizacji nastaw regulatora osi x

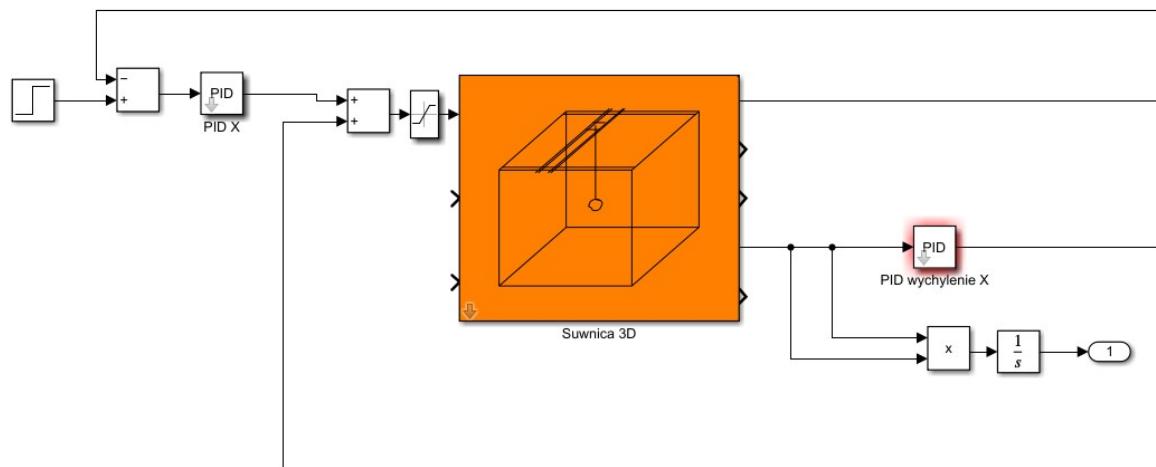


Rys. 4.16. Model przygotowany w celu optymalizacji nastaw regulatora osi y

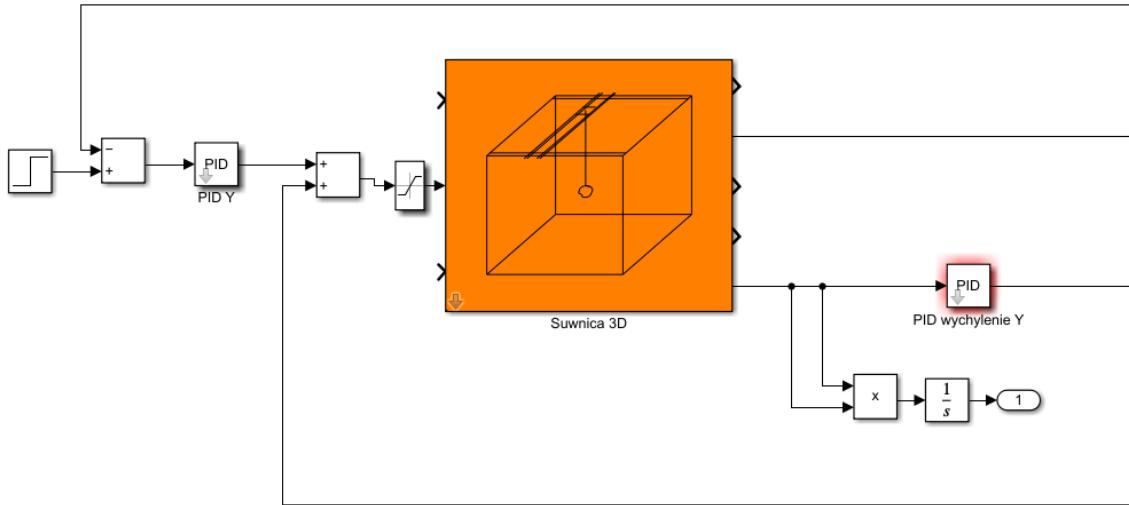


Rys. 4.17. Model przygotowany w celu optymalizacji nastaw regulatora osi z

Regulatory położenia kątowego ciężarka zoptymalizowane zostały po dobraniu nastaw regulatorów osi x i y. Na rysunkach (4.18) - (4.19) widnieją również regulatory "PID X" oraz "PID Y" z nastawami po wykonanej optymalizacji. Zabieg ten został przeprowadzony w celu osiągnięcia lepszych wyników.



Rys. 4.18. Model przygotowany w celu optymalizacji nastaw regulatora wychylenia kątowego w osi x



Rys. 4.19. Model przygotowany w celu optymalizacji nastaw regulatora wychylenia kątowego w osi y

W tabelach 4.1 - 4.5 przedstawiono poszczególne wyniki optymalizacji dla odpowiednio osi x, położenia kątowego x, osi y, wychylenia kątowego y oraz osi z wraz z ograniczeniami oraz warunkami początkowymi.

Tabela 4.1. Wyniki optymalizacji nastaw dla osi x

L.p.	Ograniczenia dolne	Ograniczenia górne	Warunek początkowy	K_p	K_i	K_d
1	[0 0 0]	[6 50 2,5]	[1 5 1]	5,952	15,849	0,0169
2	[0 0 0]	[100 100 100]	[1 1 1]	55,663	36,430	9,405
3	[0 0 0]	[10 10 10]	[1 1 1]	9,698	7,452	0,177
4	[0 0 0]	[300 300 10]	[0,1 0,1 0,1]	30,277	0,192	3,766
5	[0 0 0]	[25 25 25]	[0,01 0,01 0,01]	23,528	24,007	2,681
6	[0 0 0]	[20 50 2]	[0,001 0,001 0,001]	13,115	0,0751	0,0683

Po szczegółowej analizie przebiegów oraz wskaźników jakości regulacji, jako nastawy dla osi x wybrane zostały te z pozycji numer 5.

Tabela 4.2. Wyniki optymalizacji nastaw dla wychylenia kątowego w osi x

L.p.	Ograniczenia dolne	Ograniczenia górne	Warunek początkowy	K_p	K_i	K_d
1	[0 0 0]	[50 50 5]	[0,001 0,001 0,001]	0,3052	4.8566	1,6494
2	[0 0 0]	[100 50 1]	[1 1 1]	0,9561	13,9349	0,5139
3	[0 0 0]	[10 20 5]	[1 1 1]	0,9669	11,1522	1,4851
4	[0 0 0]	[10 20 5]	[0,1 0,1 0,1]	1,8059	2,8580	3,5087
5	[0 0 0]	[15 20 15]	[0,01 0,01 0,01]	13,7501	5,3288	0,0373

Najmniejsze wychylenie osiągnięte zostało dla próby optymalizacyjnej numer 5.

Tabela 4.3. Wyniki optymalizacji nastaw dla osi y

L.p.	Ograniczenia dolne	Ograniczenia górne	Warunek początkowy	K_p	T_i	K_d
1	[0 0 0]	[6 50 2,5]	[1 5 1]	5,312	5,264	0,002
2	[0 0 0]	[100 100 100]	[1 1 1]	6,678	5,144	0,0825
3	[0 0 0]	[10 10 10]	[1 1 1]	6,531	4,452	0,114
4	[0 0 0]	[300 300 10]	[0,1 0,1 0,1]	182,464	77,404	1,497
5	[0 0 0]	[25 25 25]	[0,01 0,01 0,01]	24,005	23,676	0,452
6	[0 0 0]	[20 50 2]	[0,001 0,001 0,001]	19,074	34,265	1,765

W przypadku osi y, również najlepsze okazały się warunki początkowe identyczne jak dla osi x.

Tabela 4.4. Wyniki optymalizacji nastaw dla wychylenia kątowego w osi y

L.p.	Ograniczenia dolne	Ograniczenia górne	Warunek początkowy	K_p	K_i	K_d
1	[0 0 0]	[50 50 5]	[0,001 0,001 0,001]	49,9992	10,4053	0,0001
2	[0 0 0]	[100 50 1]	[1 1 1]	2,0468	13,0684	0,0271
3	[0 0 0]	[10 20 5]	[1 1 1]	1,8305	12,7582	0,0278
4	[0 0 0]	[10 20 5]	[0,1 0,1 0,1]	3,8302	12,9942	0,0863
5	[0 0 0]	[15 20 15]	[0,01 0,01 0,01]	6,7858	7,8486	1,5723

Najmniejsze wychylenie osiągnięte zostało dla próby optymalizacyjnej numer 5, tak samo jak w przypadku odchylenia kątowego w osi x.

Tabela 4.5. Wyniki optymalizacji nastaw dla osi z

L.p.	Ograniczenia dolne	Ograniczenia górne	Warunek początkowy	K_p	T_i	K_d
1	[0 0 0]	[6 50 2,5]	[1 5 1]	5,918	42,145	0,217
2	[0 0 0]	[100 100 100]	[1 1 1]	99,953	76,691	16,061
3	[0 0 0]	[10 10 10]	[1 1 1]	9,930	8,041	3,063
4	[0 0 0]	[300 300 10]	[0,1 0,1 0,1]	296,413	137,351	6,712
5	[0 0 0]	[25 25 25]	[0,01 0,01 0,01]	24,982	17,294	7,744
6	[0 0 0]	[20 50 2]	[0,001 0,001 0,001]	19,997	49,845	1,788

W przypadku osi z najlepszymi ograniczeniami oraz warunkami początkowymi okazały się te z próby numer 6. Ostatecznie dobrane nastawy dla członów P, I oraz D prezentuje tabela 4.4.

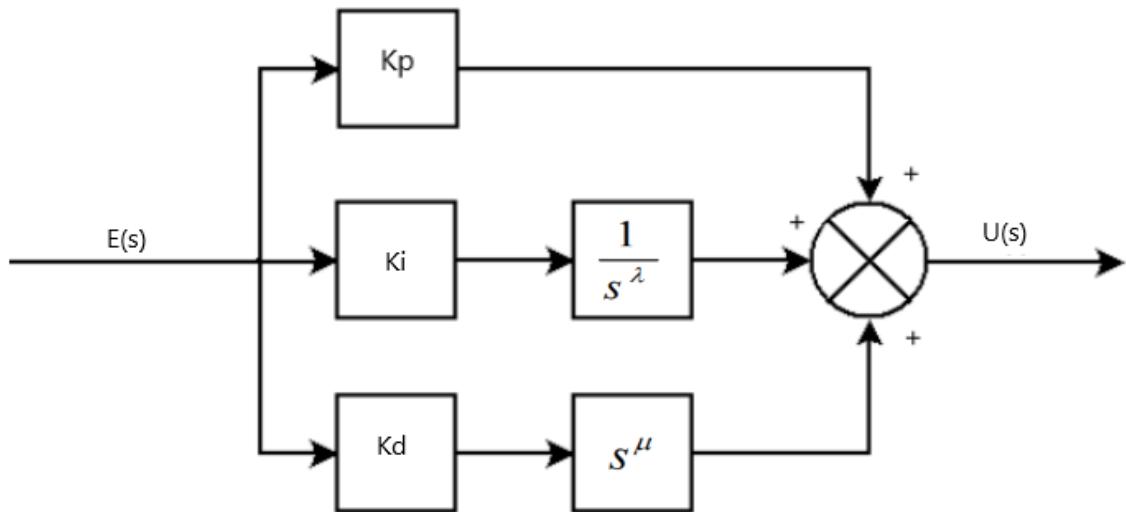
Tabela 4.6. Finalny dobór nastaw parametrów dla regulatorów PID dla trzech osi

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

4.5. Regulator PID ułamkowego rzędu

4.5.1. Opis regulatora

Regulator PID o niecałkowitych rzędach całkowania i różniczkowania to rodzaj regulatora PID, który dostosowany jest do pracy z układami, w których parametry (np. wzmacnienie, stała czasowa) zmieniają się w czasie lub są niestabilne. W przypadku ułamkowego regulatora PID - FOPID (ang. Fractional Order PID), składowe całkująca oraz różniczkująca mają wykładniki ułamkowe z zakresu (0,1), co pozwala na bardziej elastyczne kształtowanie charakterystyk częstotliwościowych. Następstwem tego jest możliwość dokładniejszej kontroli nieliniowych procesów, w których regulator PID, nawet po optymalizacji nie dostarcza pożądanych wyników. Strojenie regulatora FOPID jest bardziej wymagające od PID klasycznego, ponieważ optymalizacji podlega pięć parametrów, a nie trzy. Zatem w implementacji sprzętowej zastosować należy większą moc obliczeniową. PID ułamkowy ma nastawialne rzędy całki i pochodnej co czyni go regulatorem o wydajniejszej i bardziej elastycznej jakości sterowania. Ogromną zaletą regulatora PID o niecałkowitych rzędach całkowania i różniczkowania jest wydajność, niskie procentowe przeregulowanie i krótki czas regulacji. Regulatory rzędu ułamkowego są mniej wrażliwe na zmiany parametrów, zatem są one lepsze pod względem dynamiki. Schemat blokowy omawianego rozwiązania jest bardzo zbliżony do regulatora PID w wersji IND. Różnica pojawiła się w bloku odpowiadającym za całkowanie i różniczkowanie uchybu, ponieważ dochodzą tam parametry: λ - niecałkowity rzad całkowania oraz μ - niecałkowity rzad różniczkowania [15]. Pełny schemat blokowy regulatora po transformacie Laplace'a przedstawiony został na rysunku 4.20.



Rys. 4.20. Schemat blokowy ułamkowego regulatora PID

Sygnal sterujący wyrażony został wzorem 4.16:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D_t^{-\lambda} e(t) + K_d D_t^\mu e(t) \quad (4.16)$$

gdzie:

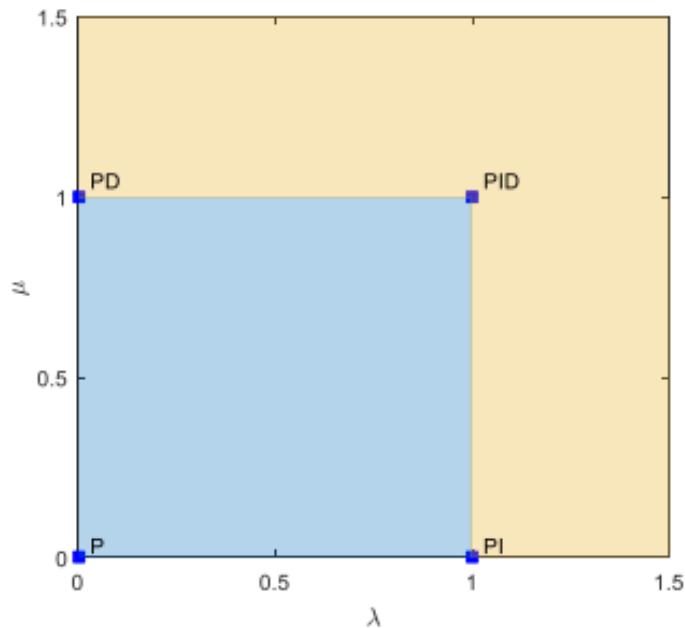
$D_t^{-\lambda}$ = operator niecałkowitego całkowania

D_t^μ = operator niecałkowitego różniczkowania

Natomiast opis przy wykorzystaniu transmitancji operatorowej wygląda następująco:

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \right) \quad (4.17)$$

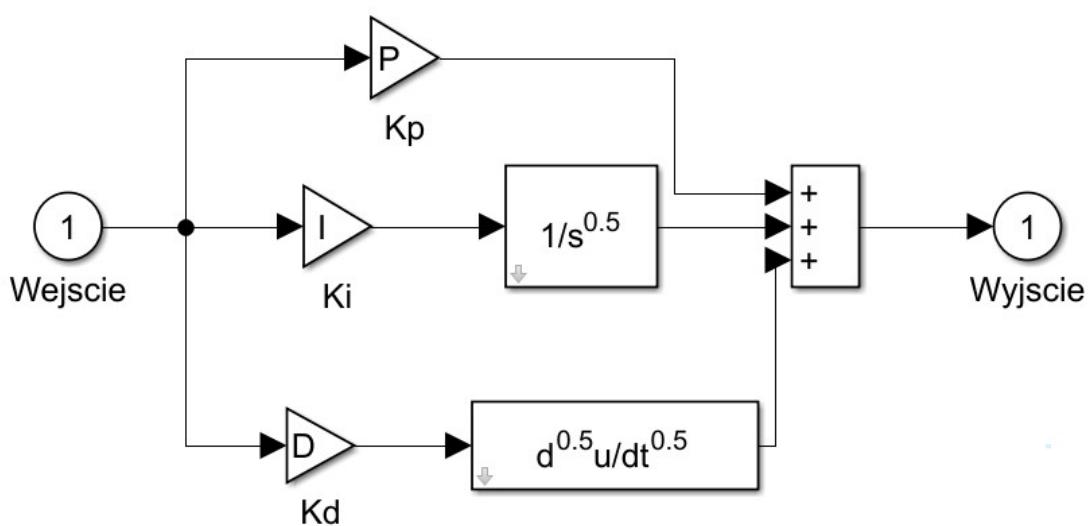
Najłatwiejszym sposobem na zaprezentowanie elastyczności oraz mnogości możliwości regulatora FOPID jest przedstawienie rozkładu na płaszczyźnie λ, μ . Dla wartości rzędów całkowania i różniczkowania z zakresu $\{0,1\}$ regulator ten przyjmuje formę regulatora PID, PD, PI lub P. Natomiast dla wartości $(0,1)$ ilość kombinacji oraz kształtowania właściwości regulatora jest nieograniczona. Rysunek 4.21 obrazuje tą zależność.



Rys. 4.21. Płaszczyzna λ , μ [15]

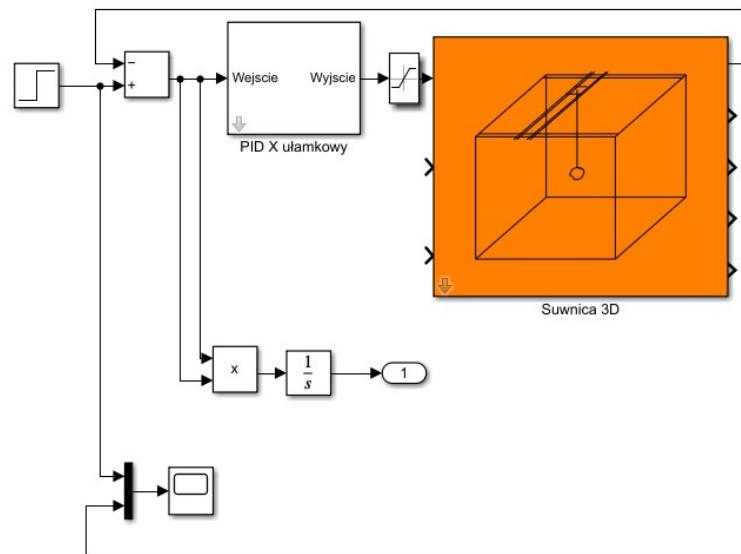
4.5.2. Optymalizacja nastaw

Podobnie jak w podrozdziale 4.4.2, optymalizacja nastaw przeprowadzona została dla każdej osi oraz dla każdego odchylenia kątowego oddzielnie. Znaczącą różnicą jest fakt, że parametrów do wyznaczenia było 5, ponieważ oprócz tych typowych dla klasycznego regulatora PID, doszły jeszcze rzędy całkowania i różniczkowania. Aby zaimplementować regulator FOPID w środowisku Matlab, pobrać należy bibliotekę "FOMCON", która dostarcza rozwiązań niezbędne do wykonywania rachunku niecałkowitego rzędu. Schemat zaimplementowanego regulatora PID ułamkowego rzędu przedstawiony został na rysunku 4.22.

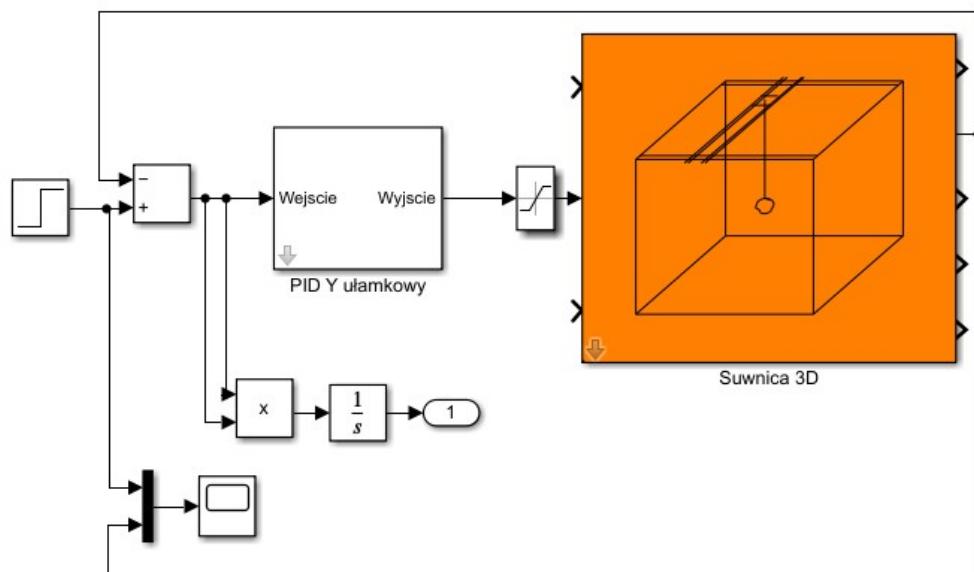


Rys. 4.22. Struktura zaimplementowanego regulatora FOPID w środowisku Matlab

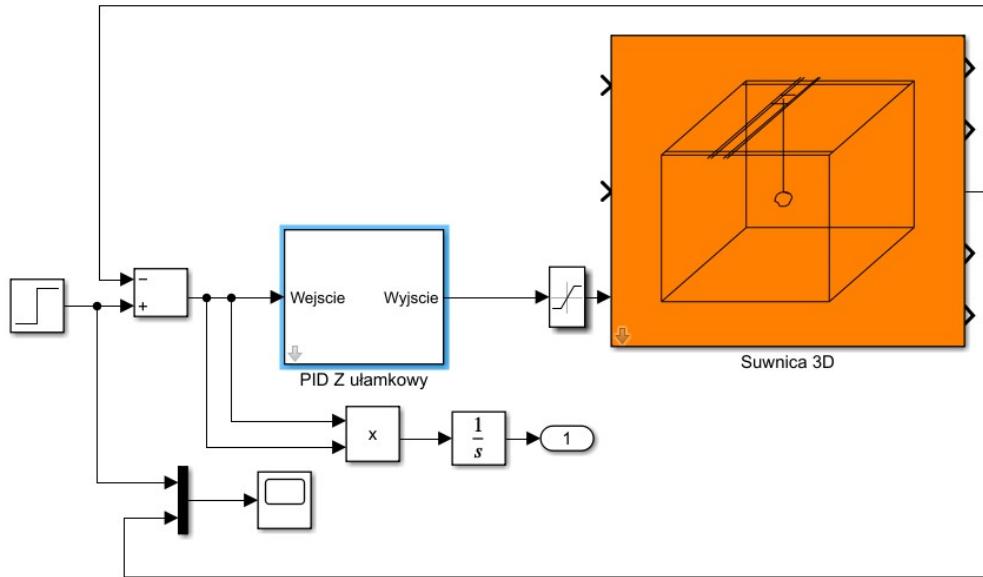
Analogicznie, modele symulacyjne do optymalizacji nastaw regulatora prezentują się na rysunkach (4.23) - (4.27).



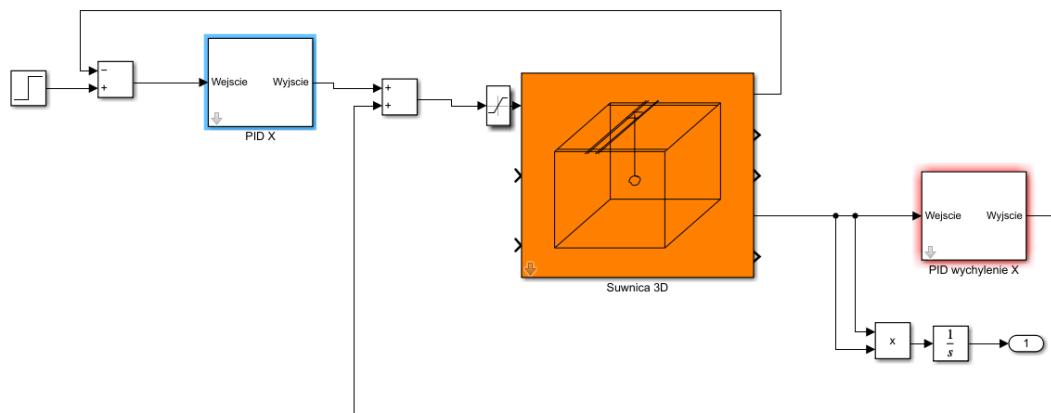
Rys. 4.23. Model optymalizacyjny regulatora FOPID osi x



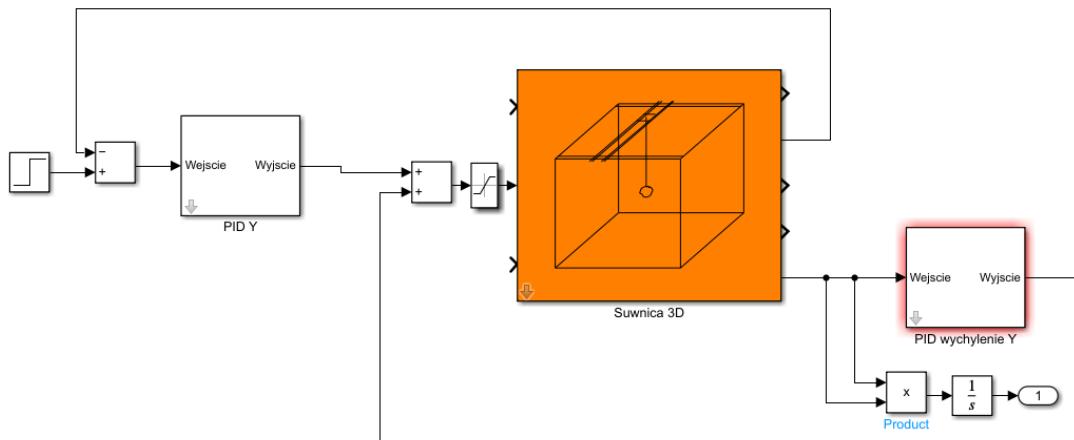
Rys. 4.24. Model optymalizacyjny regulatora FOPID osi y



Rys. 4.25. Model optymalizacyjny regulatora FOPID osi z



Rys. 4.26. Model optymalizacyjny regulatora FOPID odchylenia kątowego osi x



Rys. 4.27. Model optymalizacyjny regulatora FOPID odchylenia kątowego osi y

W tabelach (4.7) - (4.11) przedstawiono po 4 wyniki optymalizacji pięciu parametrów dla każdej z trzech osi oraz dla dwóch kątów. Liczba prób jest mniejsza niż w poprzednim regulatorze (PID) ze względu na czas trwania obliczeń.

Tabela 4.7. Wyniki optymalizacji regulatora FOPID dla osi x

L.p.	Ograniczenia dolne	Ograniczenia górne	Warunek początkowy	K_p	T_i	K_d	λ	μ
1	[0 0 0 0 0]	[10 10 10 1 1]	[1 1 1 0,1 0,1]	4,426	5,905	2,874	0,0989	0,0989
2	[0 0 0 0 0]	[100 100 10 1 1]	[1 1 1 0,1 0,1]	2,030	2,115	1,919	0,320	0,320
3	[0 0 0 0 0]	[25 25 25 1 1]	[1 1 1 0,01 0,01]	10,234	14,765	1,043	0,011	0,065
4	[0 0 0 0 0]	[150 135 12 1 1]	[10 15 0,3 0,2 0,2]	41,277	0,007	6,363	0,572	0,573

Tabela 4.8. Wyniki optymalizacji regulatora FOPIID dla wychylenia kątowego osi x

L.p.	Ograniczenia dolne	Ograniczenia górne	Warunek początkowy	K_p	T_i	K_d	λ	μ
1	[0 0 0 0 0]	[25 25 5 1 1]	[0,01 0,01 0,01 0,01 0,01]	1,2883	2,0647	1,7665	0,9758	0,9234
2	[0 0 0 0 0]	[50 50 50 1 1]	[0,001 0,001 0,001 0,1 0,1]	26,5665	46,2100	11,3243	0,1171	0,4390
3	[0 0 0 0 0]	[15 30 5 1 1]	[0,001 0,001 0,001 0,1 0,1]	14,9726	8,2129	2,6799	0,4989	0,4989
4	[0 0 0 0 0]	[5 5 5 1 1]	[1 1 1 0,5 0,5]	0,5856	4,9303	1,1290	0,4362	0,4362

Tabela 4.9. Wyniki optymalizacji regulatora FOPIID dla osi y

L.p.	Ograniczenia dolne	Ograniczenia górne	Warunek początkowy	K_p	T_i	K_d	λ	μ
1	[0 0 0 0 0]	[10 10 10 1 1]	[1 1 1 0,1 0,1]	2,661	3,8126	1,629	0,099	0,092
2	[0 0 0 0 0]	[100 100 10 1 1]	[1 1 1 0,1 0,1]	2,154	2,455	1,871	0,391	0,391
3	[0 0 0 0 0]	[25 25 25 1 1]	[1 1 1 0,01 0,01]	9,778	16,046	0,327	0,0243	0,0518
4	[0 0 0 0 0]	[25 25 25 1 1]	[1 1 1 0,5 0,5]	2,965	3,241	1,699	0,621	0,622

Tabela 4.10. Wyniki optymalizacji regulatora FOPIID dla wychylenia kątowego osi y

L.p.	Ograniczenia dolne	Ograniczenia górne	Warunek początkowy	K_p	T_i	K_d	λ	μ
1	[0 0 0 0 0]	[25 25 5 1 1]	[0,01 0,01 0,01 0,01 0,01]	10,1810	24,8433	0,0605	0,6624	0,6174
2	[0 0 0 0 0]	[50 50 50 1 1]	[0,001 0,001 0,001 0,1 0,1]	49,5464	47,3566	7,6376	0,5095	0,5096
3	[0 0 0 0 0]	[15 30 5 1 1]	[0,001 0,001 0,001 0,1 0,1]	14,9975	29,8766	4,9923	0,4915	0,4956
4	[0 0 0 0 0]	[5 5 5 1 1]	[1 1 1 0,5 0,5]	4,8344	4,9354	0,1506	0,7062	0,7062

Tabela 4.11. Wyniki optymalizacji regulatora FOPID dla osi z

L.p.	Ograniczenia dolne	Ograniczenia górne	Warunek początkowy	K_p	T_i	K_d	λ	μ
1	[0 0 0 0 0]	[10 10 10 1 1]	[1 1 1 0,1 0,1]	1,951	2,017	1,882	0,099	0,099
2	[0 0 0 0 0]	[100 100 10 1 1]	[1 1 1 0,1 0,1]	3,077	3,325	2,788	0,476	0,476
3	[0 0 0 0 0]	[25 25 25 1 1]	[1 1 1 0,01 0,01]	18,955	24,028	6,658	0,029	0,244
4	[0 0 0 0 0]	[25 25 25 1 1]	[1 1 1 0,5 0,5]	2,259	2,349	1,565	0,551	0,551

Wszystkie z powyższych nastaw zostały przetestowane na obiekcie rzeczywistym. Finalnie wybrane parametry prezentuje tabela 4.12.

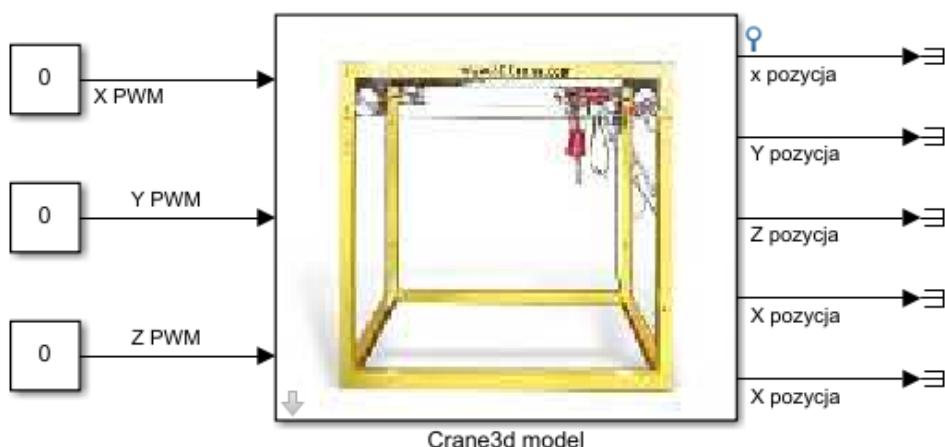
Tabela 4.12. Finalnie dobrane nastawy dla regulatora FOPID

Oś	K_p	T_i	K_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
γ	1,2883	2,0647	1,7665	0,9758	0,9234
δ	10,1810	24,8433	0,0605	0,6624	0,6174

5. BADANIA SYMULACYJNE I ANALIZA WYNIKÓW

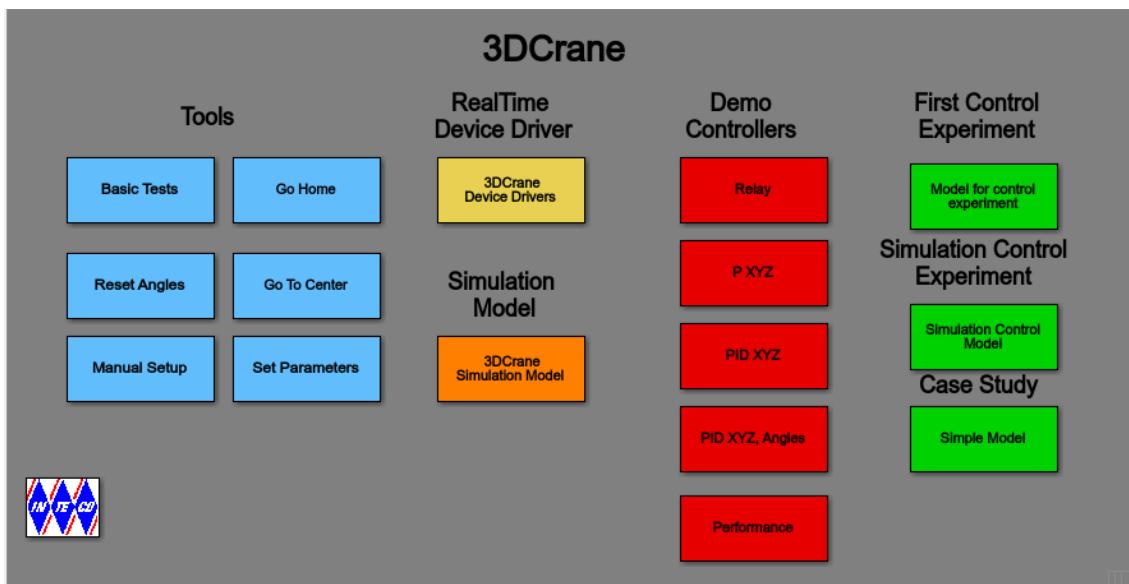
5.1. Warunki testowania

Kluczowym elementem doboru nastaw jest ich przetestowanie na obiekcie rzeczywistym oraz porównanie wskaźników jakości sterowania. Testy symulacyjne przeprowadzone zostały z wykorzystaniem środowiska Matlab oraz dołączonego bloku reprezentującego rzeczywistą suwnicę. Blok ten zawiera niezbędne elementy służące do pobierania, konwersji oraz wysyłania sygnałów wejściowych i wyjściowych (akwizycja danych). Przedstawia go rysunek 5.1.



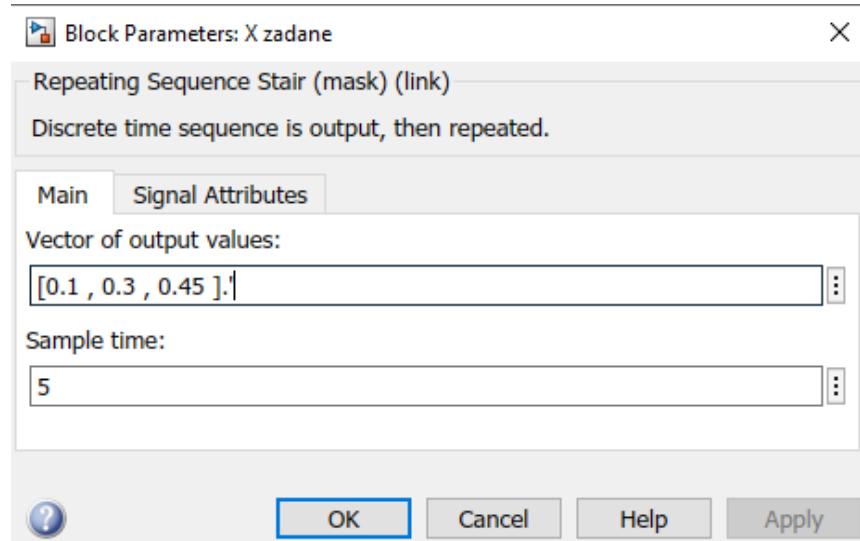
Rys. 5.1. Model symulacyjny suwnicy

Przydatnym narzędziem do wykonywania testów okazał się również przybornik dostarczony przez producenta suwnicy. Zawiera on takie opcje jak: "Go Home" - pozwala na przemieszczenie wózka do pozycji początkowej, "Manual Setup" - ustalenie położenia zerowego każdej z osi, "Model for control experiment" - zawiera model z rysunku 5.1. Funkcje te były niezbędne do przeprowadzenia mnogiej ilości testów na obiekcie rzeczywistym. Panel główny narzędzia pokazano na rysunku 5.2.

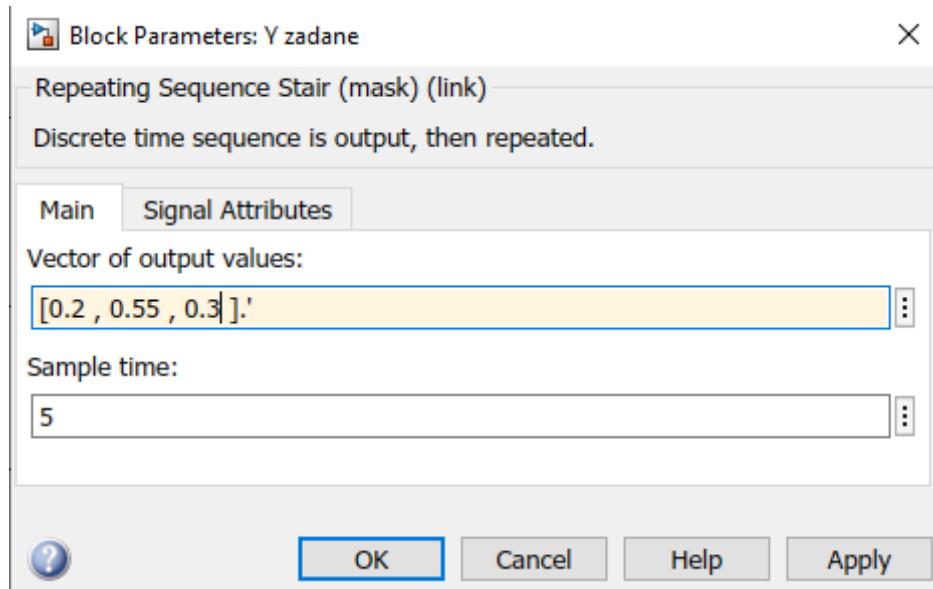


Rys. 5.2. Okno kontrolne suwnicy 3D w środowisku Matlab

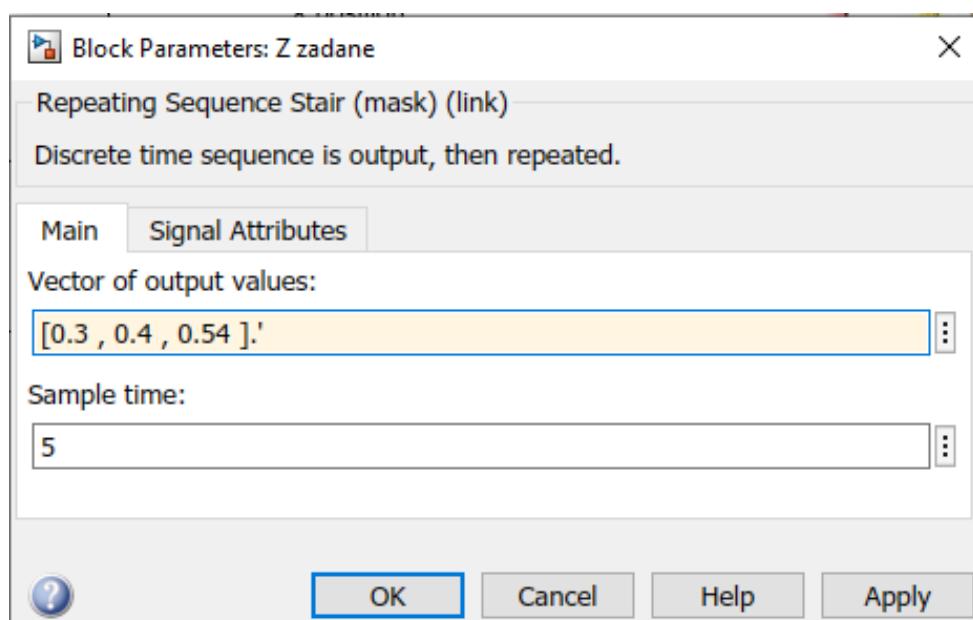
Każdy z trzech układów regulacji testowany był na podstawie tej samej trajektorii zadanej tak, aby wyniki mogły zostać poddane analizie porównawczej. Trajektorie te (użyte już w podrozdziale 4.2) są różne dla poszczególnych osi. Została podjęta taka decyzja ze względu na możliwość ukazania ciekawszych wyników, niż w przypadku użycia tej samej sekwencji. Czas symulacji w czasie rzeczywistym ustalony został na 20s - pierwsze 5 sekund przeznaczone na powrót do punktu startowego, a kolejne 3 odcinki po 5 sekund zawierające różne położenia zadane. Przedstawione zostały one na rysunkach (5.3) - (5.5).



Rys. 5.3. Trajektoria zadana na osi x



Rys. 5.4. Trajektoria zadana na osi y



Rys. 5.5. Trajektoria zadana na osi z

Uzyskane wyniki analizowane będą pod kątem przebiegu odpowiedzi skokowej, śledzenia trajektorii sekwencyjnej oraz 5 wskaźników jakości regulacji:

- uchyb ustalony - różnica pomiędzy wartością zadaną a wartością ustaloną odpowiedzi [16]
- całka z kwadratu uchybu - opisana wzorem (4.2)
- czas narastania 10-90% - czas, jaki minął od uzyskania 10% wartości zadanej do 90% wartości zadanej (końcowej) przez odpowiedź układu
- czas regulacji 2% - czas, po którym uchyb regulacji będzie znajdował się w przedziale +- 98% wartości zadanej
- przeregulowanie procentowe - liczone jako:

$$P.O. = \frac{y_{max} - y_{zad}}{y_{zad}} * 100\% \quad (5.1)$$

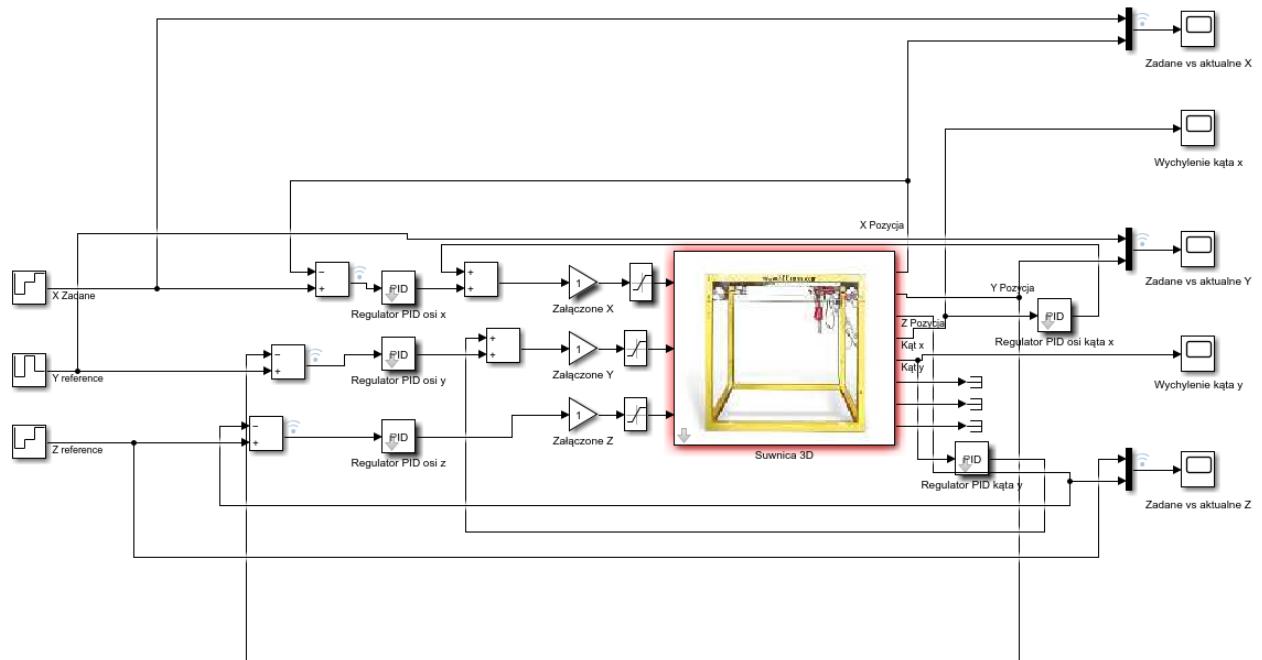
gdzie:

y_{max} = maksymalna wartość odpowiedzi układu

y_{zad} = wartość zadana

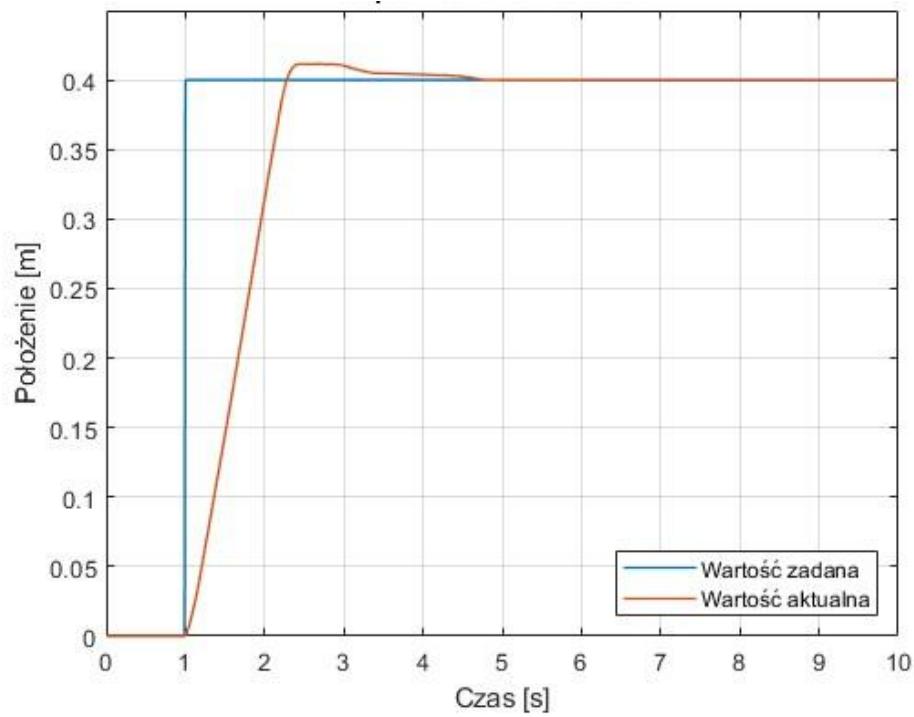
5.2. PID klasyczny

Pierwszym testowanym regulatorem jest PID w wersji klasycznej. Schemat blokowy układu regulacji z jego wykorzystaniem przedstawia rysunek 5.6.

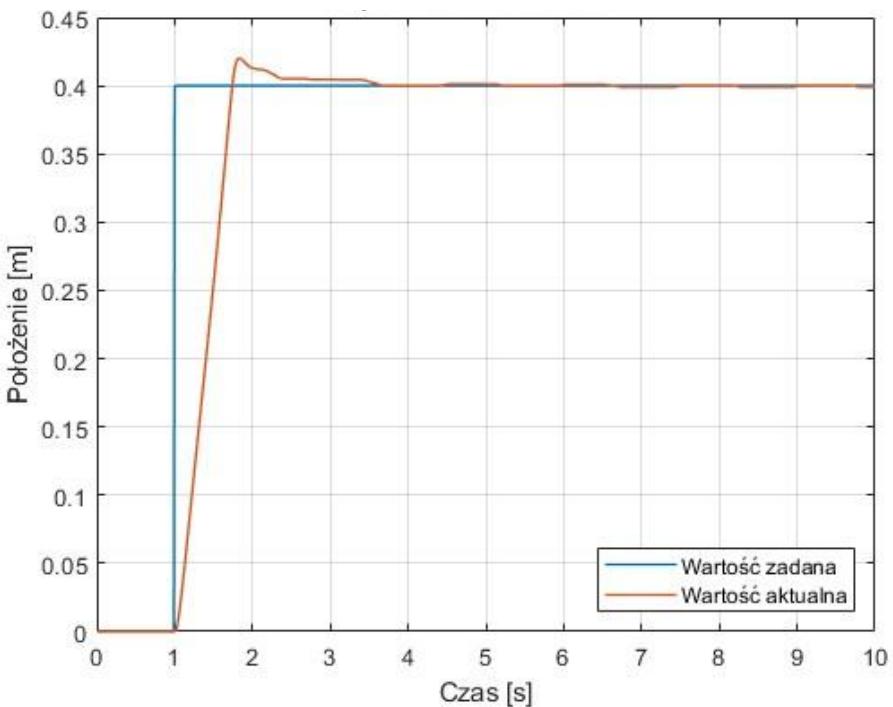


Rys. 5.6. Schemat blokowy układu regulacji z wykorzystaniem regulatora PID

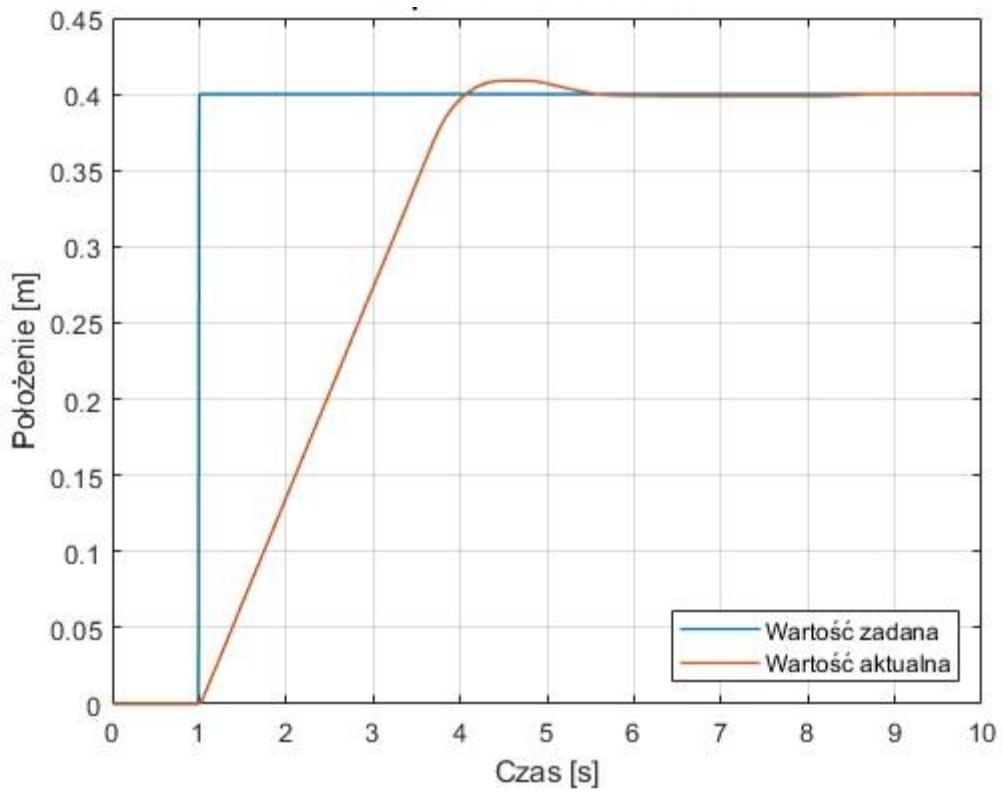
Najpierw układ ten został poddany wymuszeniu skokowemu o wartości = 0,4. Odpowiedź dla osi x, y, z oraz wychylenia kątowego w osi x i y przedstawiono na rysunkach (5.7) - (5.11).



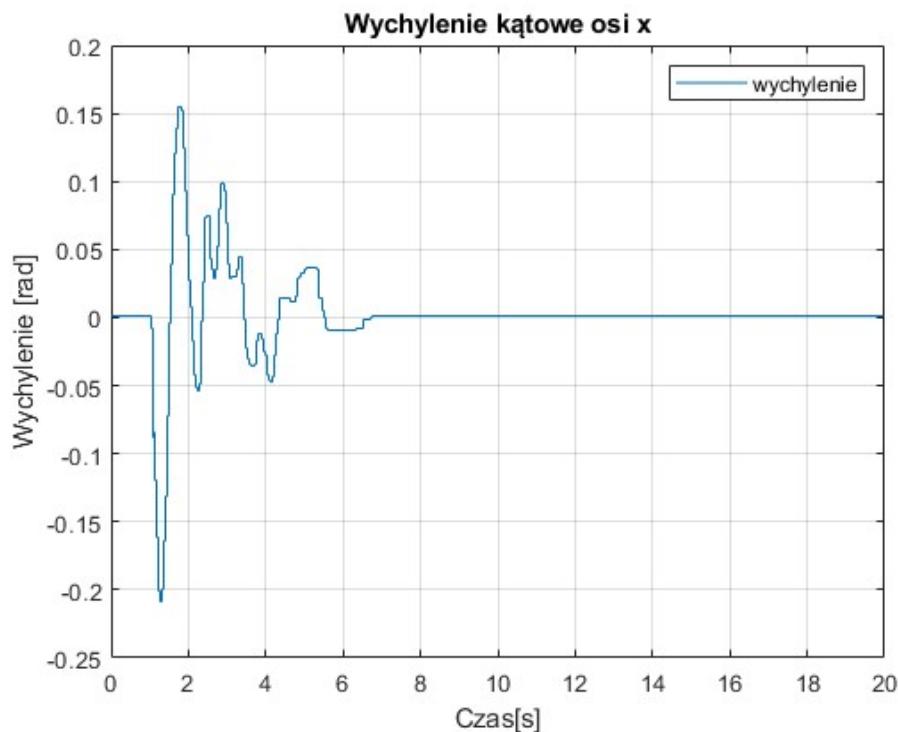
Rys. 5.7. Odpowiedź skokowa osi x układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji



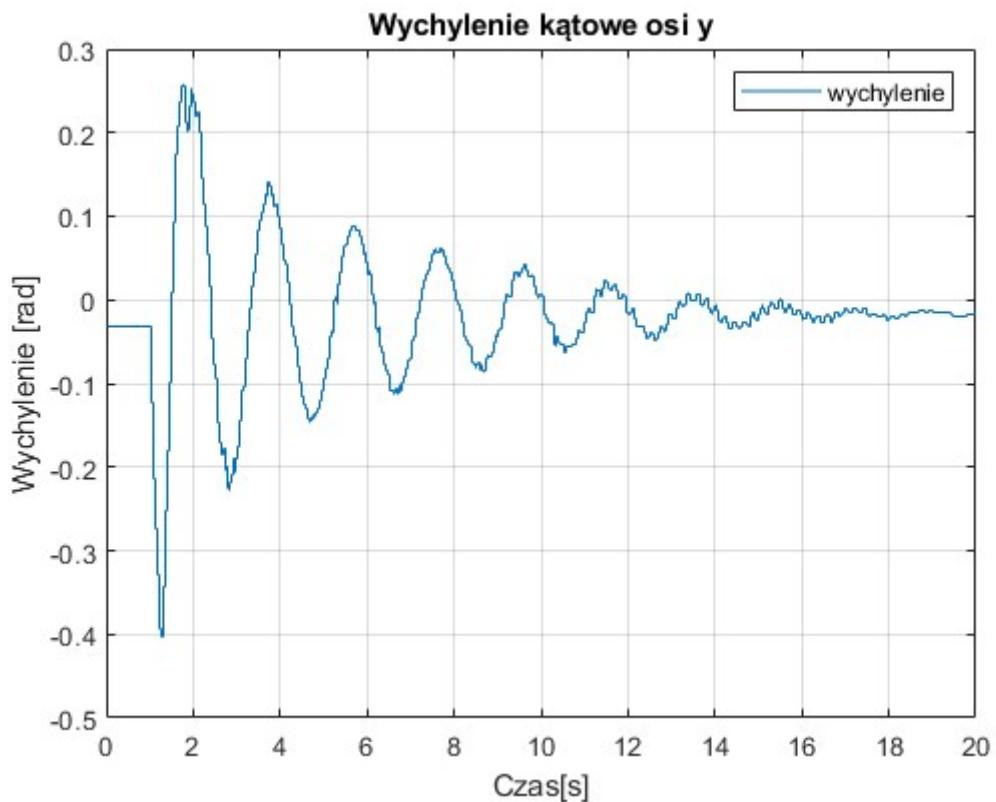
Rys. 5.8. Odpowiedź skokowa osi y układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji



Rys. 5.9. Odpowiedź skokowa osi z układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji



Rys. 5.10. Wychylenie kątowe przy wymuszeniu skokowym w osi x układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji



Rys. 5.11. Wychylenie kątowe przy wymuszeniu skokowym w osi y układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji

Wskaźniki jakości osiągnięte przez powyższy układ regulacji zaprezentowane zostały w tabeli 5.1.

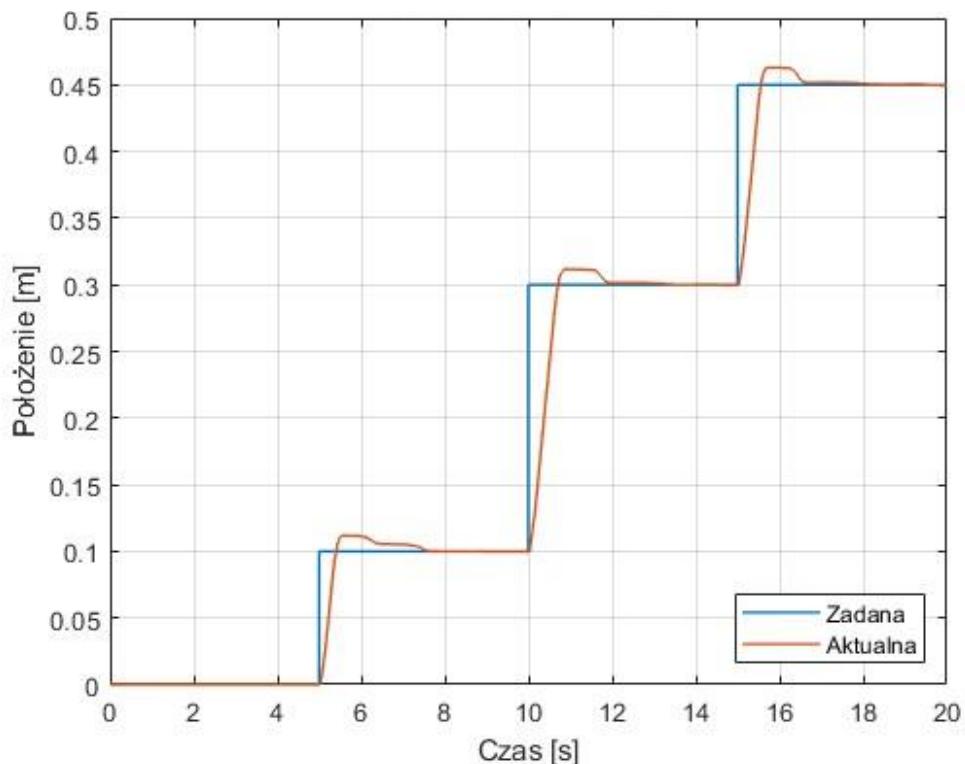
Tabela 5.1. Wskaźniki jakości odpowiedzi skokowej układu regulacji z regulatorem PID

	oś x	oś y	oś z
uchyb	0,0002	0,0007	0,0003
całka z kwadratu uchybu	0,0742	0,0450	0,1598
czas narastania 10-90% [s]	0,9654	0,5597	2,3012
czas regulacji 2% [s]	2,1320	1,2821	1,5893
przeregulowanie [%]	2,9576	5,1112	2,2309
maks. wychylenie dodatnie [rad]	0,16	0,25	
maks. wychylenie ujemne [rad]	-0,215	-0,4	

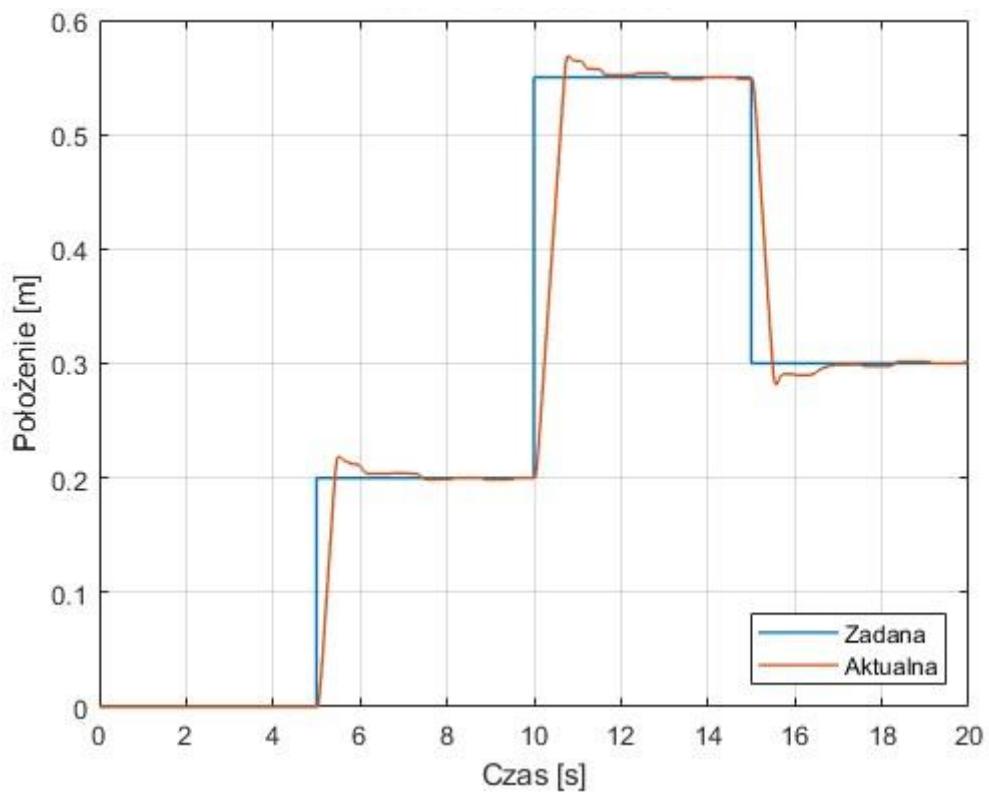
Na podstawie przedstawionych wykresów oraz tabeli ze wskaźnikami jakości zauważać można znaczną poprawę jakości odpowiedzi skokowej układu. Uchyb zniwelowany został do wartości bardzo bliskiej zera. Poprawił się również czas narastania oraz regulacji względem układu bez regulacji lub z parametrami dobranymi w sposób eksperymentalny. Maksymalne wychylenia również zmniejszyły

swoją wartość oraz po pewnym czasie (dla odchylenia w osi x) sprowadziły się do 0, co przekłada się na ogólną jakość procesu na przykład przeładunkowego, gdyż ładunek może zostać postawiony na ziemi w sposób równoległy od podłoża.

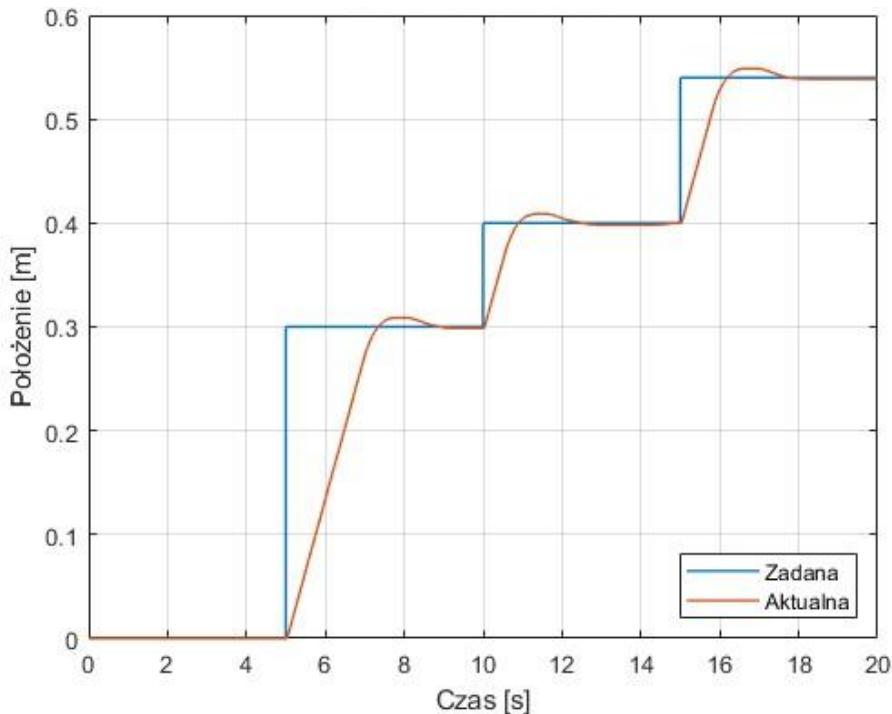
Następnie układ regulacji poddany został wymuszeniu sekwencyjnemu, które zostało opisane w podrozdziale 5.1. Przebiegi wartości zadanej oraz aktualnej obrazują rysunki (5.12) - (5.16).



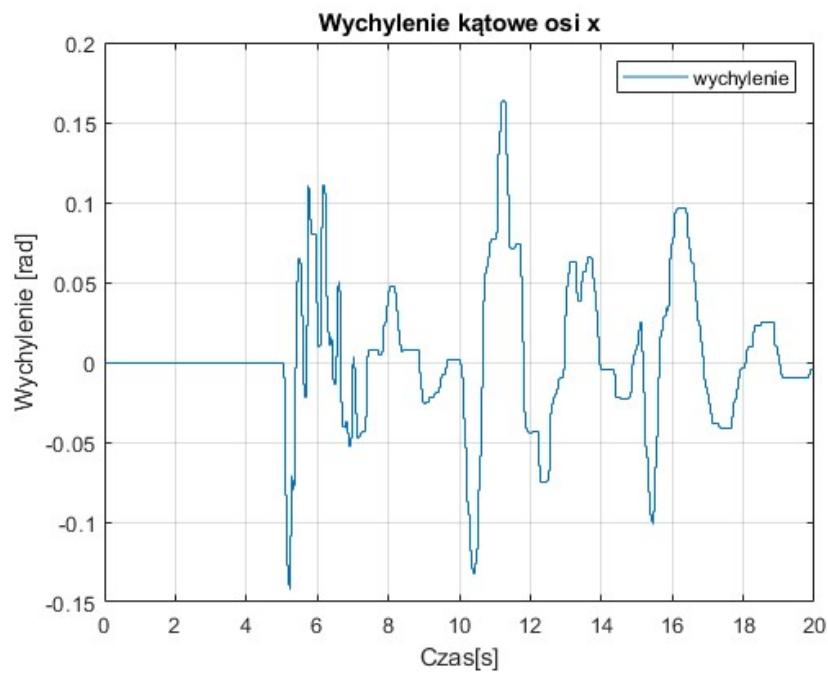
Rys. 5.12. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne osi x układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji



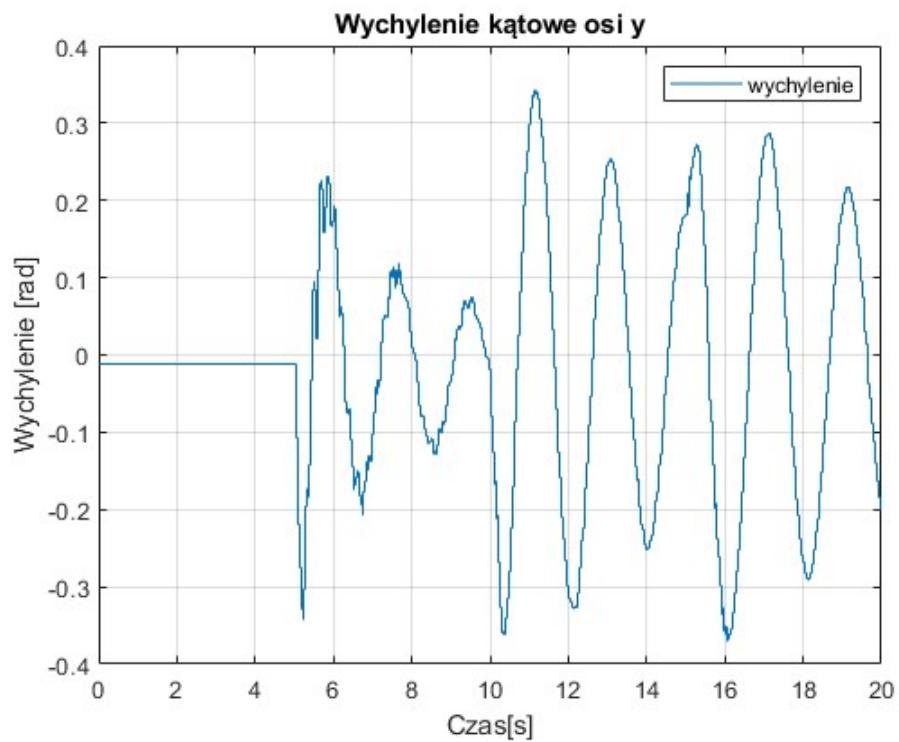
Rys. 5.13. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne osi y układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji



Rys. 5.14. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne osi z układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji



Rys. 5.15. Odchylenie kątowe w osi x podczas wymuszenia sekwencyjnego układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji



Rys. 5.16. Odchylenie kątowe w osi y podczas wymuszenia sekwencyjnego układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji

Wskaźniki jakości dla tego wymuszenia zestawiono w tabeli 5.2. W przypadku sekwencji, sumowanie wartości tych wskaźników byłoby nieintuicyjne, zatem policzone zostały one dla przedziału czasu 10-15s, a więc dla drugiego położenia zadanego.

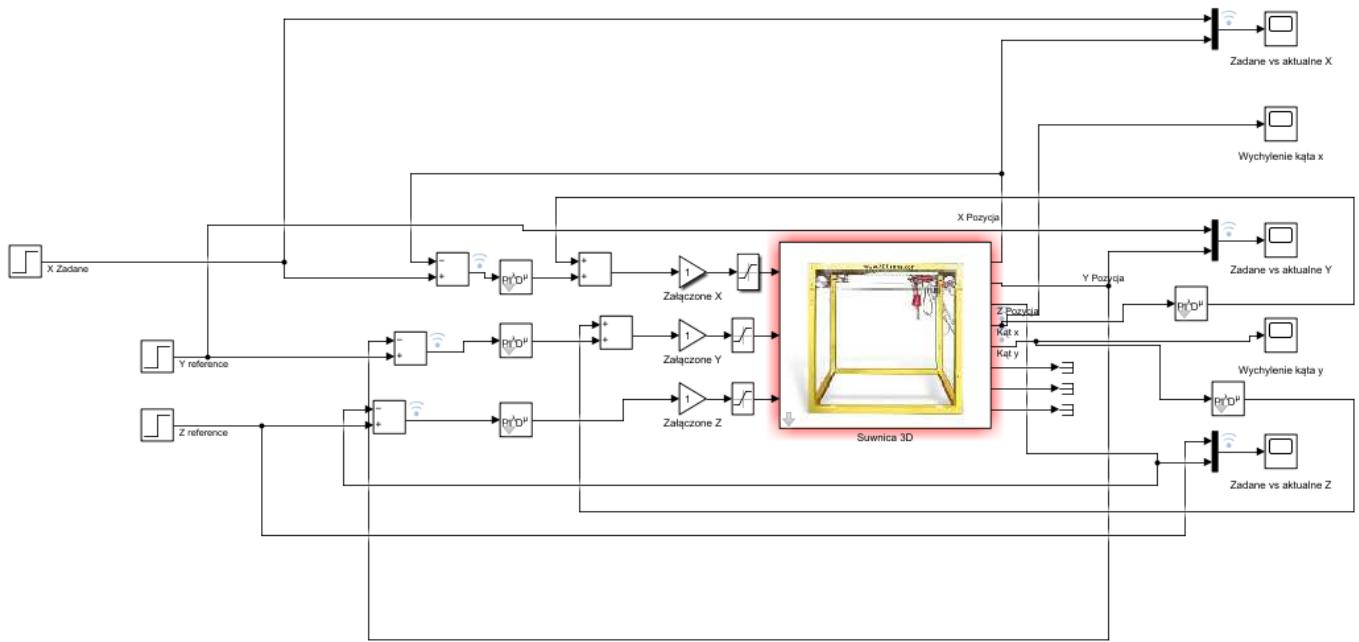
Tabela 5.2. Wskaźniki jakości odpowiedzi na wymuszenie sekwencyjne układu regulacji z regulatorem PID

	oś x	oś y	oś z
uchyb	0,0018	0,0015	0,0014
całka z kwadratu uchybu	0,0107	0,033146	0,0611
czas narastania 10-90% [s]	0,5051	0,556	0,6315
czas regulacji 2% [s]	1,7262	1,137	1,7522
przeregulowanie [%]	3,9008	2,9565	2,200
maks. wychylenie dodatnie [rad]	0,17	0,34	
maks. wychylenie ujemne [rad]	-0,14	-0,37	

W przypadku wymuszenia sekwencyjnego, uchyb regulacji również można przyjąć za zerowy. Dla każdego przedziału czasowego wózek transportowy stabilizuje swoją pozycję w położeniu zadanym. Oznacza to, że niezależnie od wymaganej trajektorii, ładunek po pewnym, skończonym czasie dotrze we wskazane miejsce. W omawianym przypadku występują jednak w dalszym ciągu przeregulowania oraz znaczące odchylenia kątowe w obydwu osiach. Biorąc pod uwagę powyższy fakt, wywnioskować można, że klasyczny regulator PID sprawdza się w przypadku przenoszenia ładunku z punktu A do B po linii prostej. Bardziej złożone sekwencje będą realizowane w sposób niewystarczający ze względu na bujanie się ładunku.

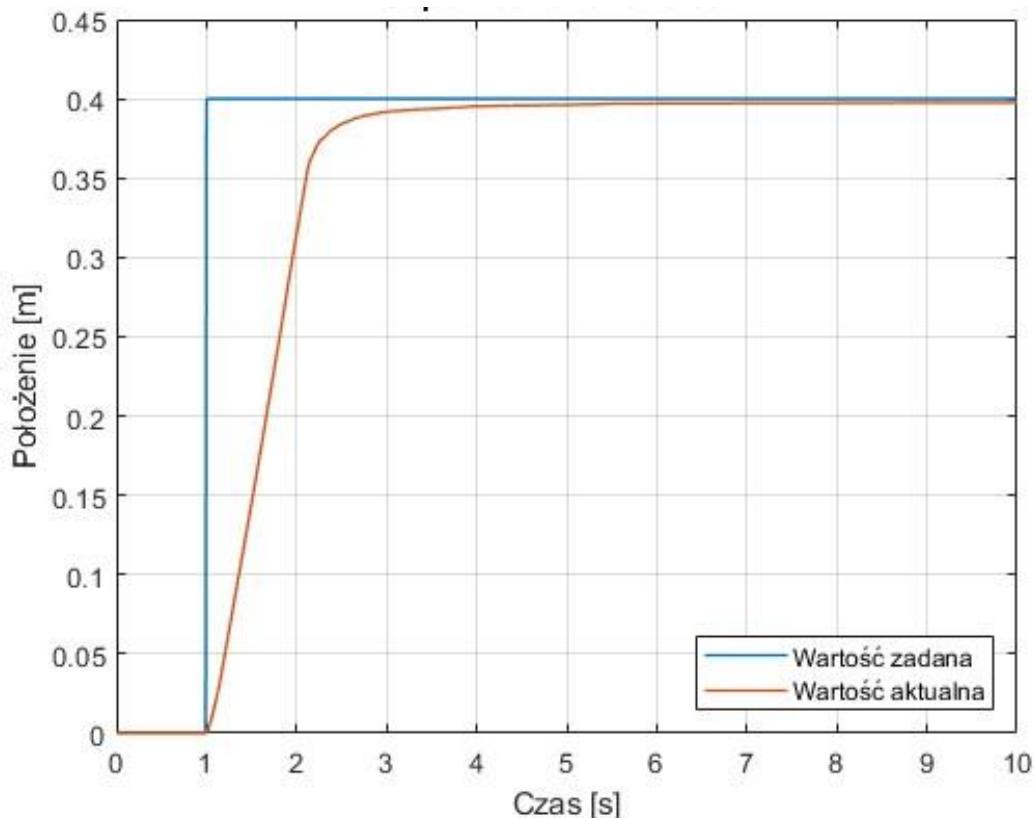
5.3. PID ułamkowy

Następnym rozpatrywanym regulatorem jest PID ułamkowego rzędu. Schemat blokowy układu regulacji z jego wykorzystaniem przedstawia rysunek 5.17.

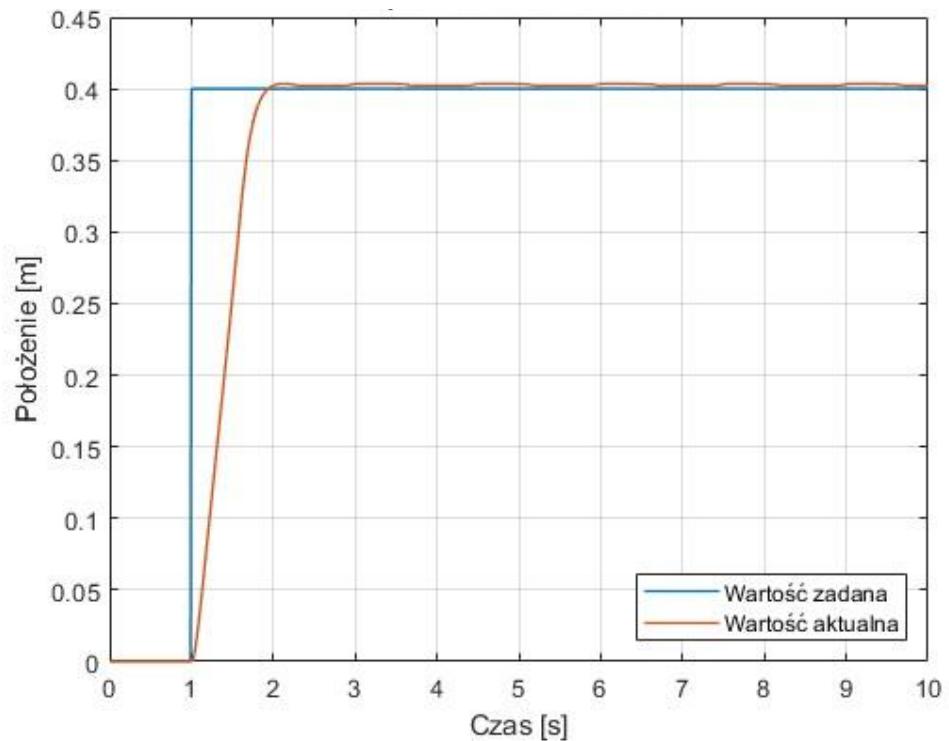


Rys. 5.17. Schemat blokowy układu regulacji z wykorzystaniem regulatora PID ułamkowego rzędu

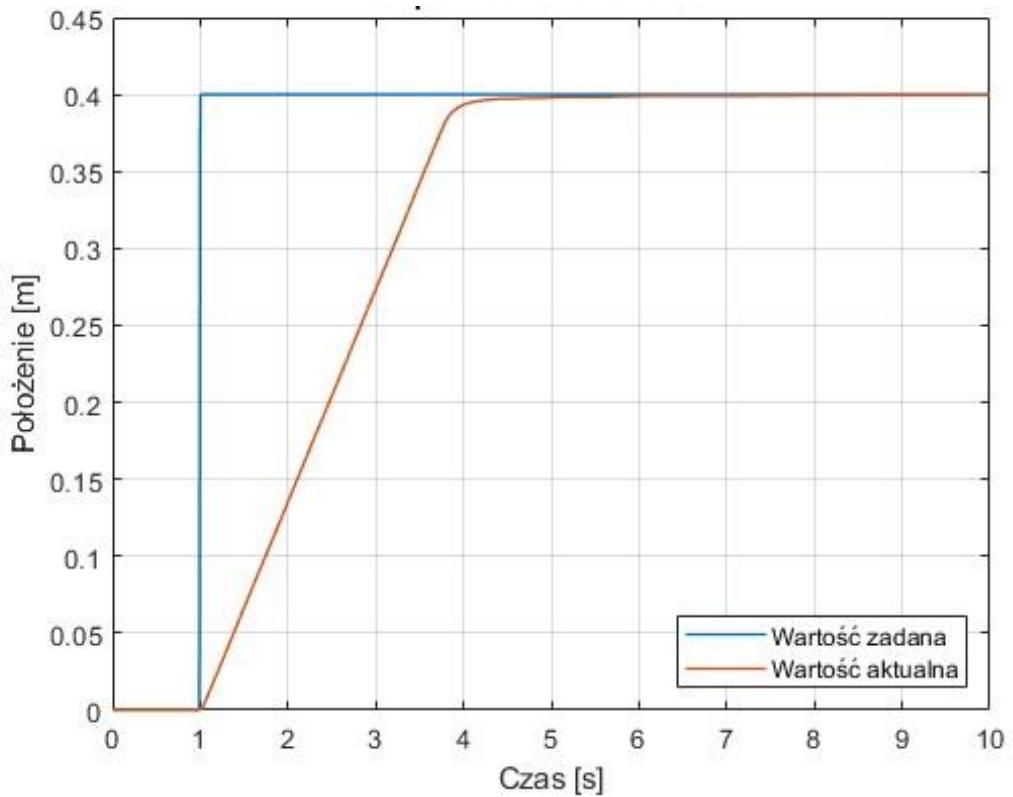
Analogicznie do podrozdziału 5.2, jako pierwsze przeprowadzone zostały testy odpowiedzi skokowej układu. Przebiegi śledzenia trajektorii przedstawiają rysunki (5.18) - (5.22).



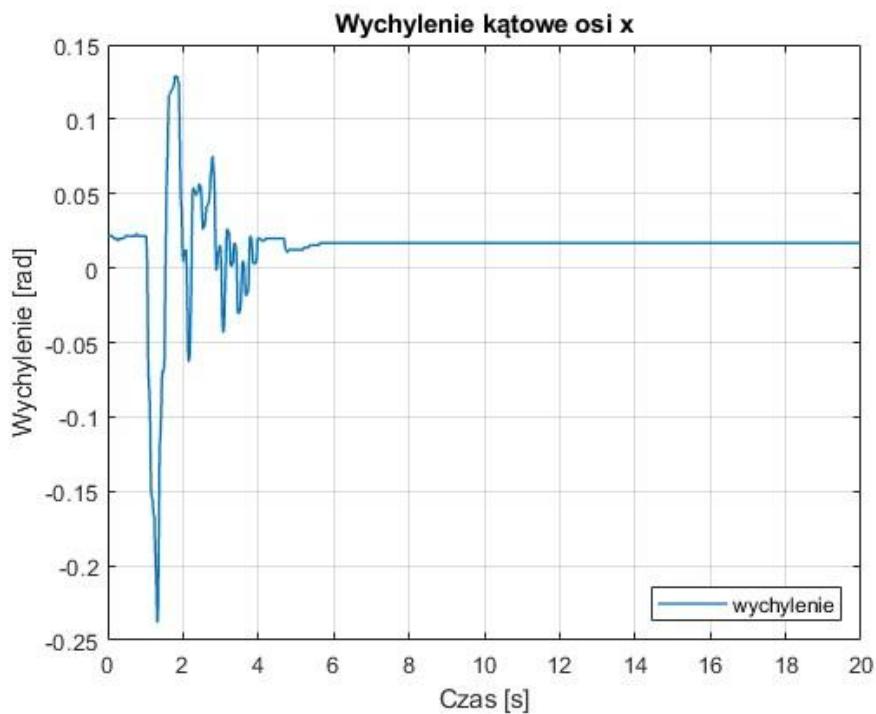
Rys. 5.18. Odpowiedź skokowa osi x układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu po optymalizacji



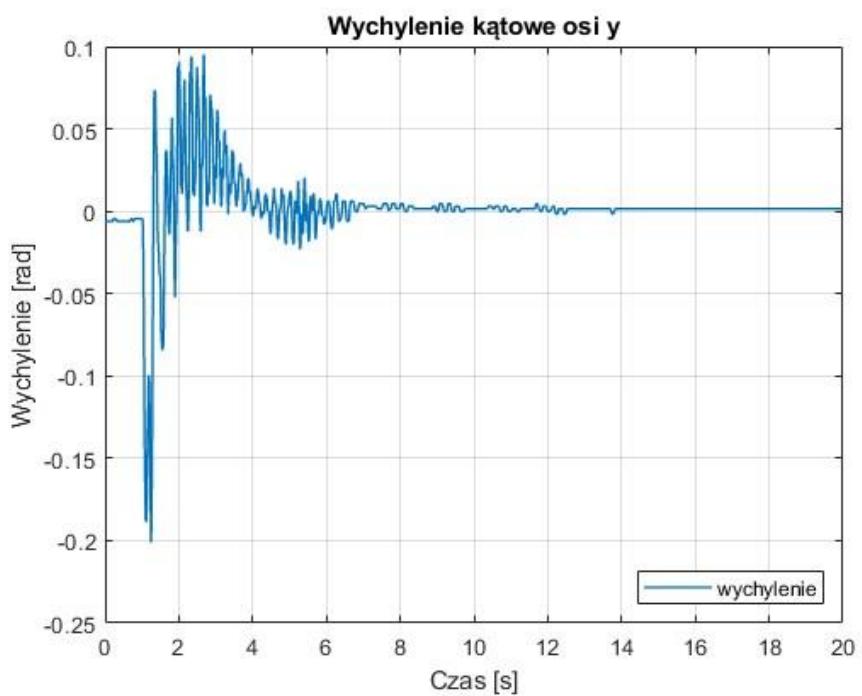
Rys. 5.19. Odpowiedź skokowa osi y układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu po optymalizacji



Rys. 5.20. Odpowiedź skokowa osi z układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu po optymalizacji



Rys. 5.21. Wychylenie kątowe przy wymuszeniu skokowym w osi x układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji



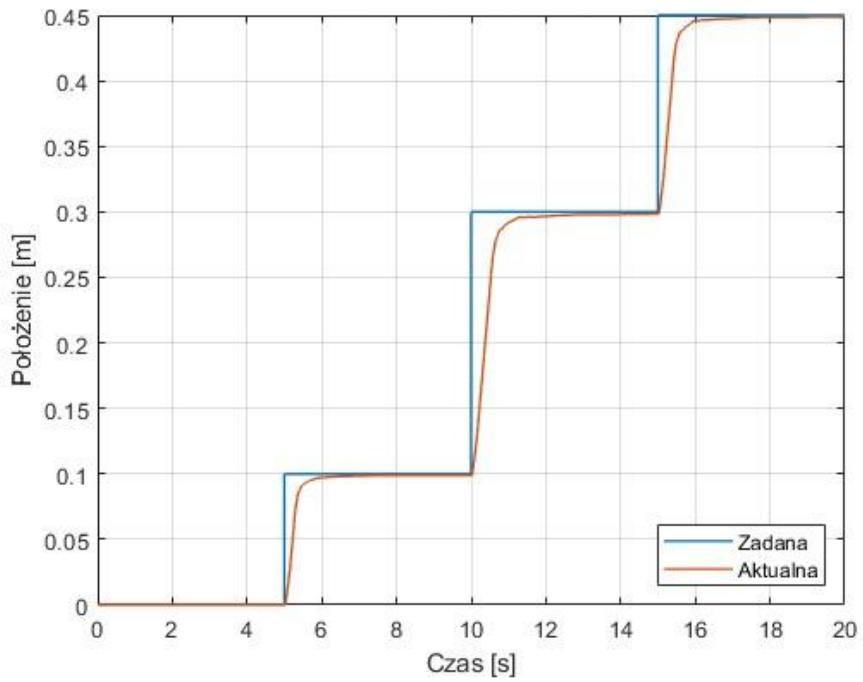
Rys. 5.22. Wychylenie kątowe przy wymuszeniu skokowym w osi y układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji

W tabeli 5.3 zaprezentowano wskaźniki jakości dla poszczególnych osi z wykorzystaniem regulatora FOPID.

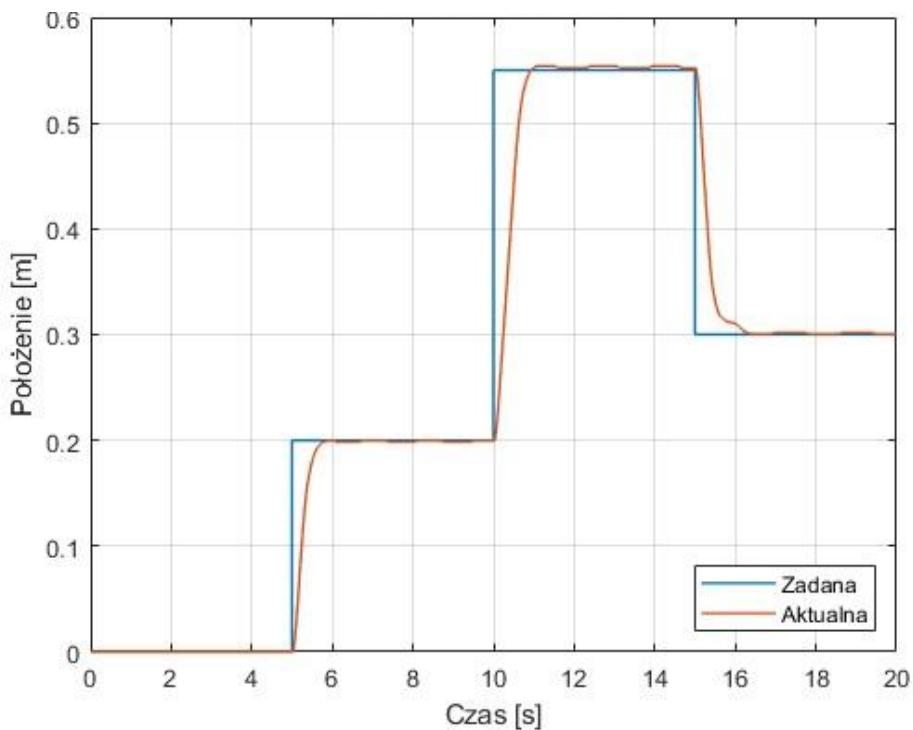
Tabela 5.3. Wskaźniki jakości odpowiedzi skokowej układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu

	os x	os y	os z
uchyb	0,0023	0,0022	0,0004
całka z kwadratu uchybu	0,0740	0,0458	0,1586
czas narastania 10-90% [s]	0,9490	0,5834	2,3111
czas regulacji 2% [s]	2,0434	0,8413	2,9556
przeregulowanie [%]	0	0,8751	0
maks. wychylenie dodatnie [rad]	0,13	0,09	
maks. wychylenie ujemne [rad]	-0,23	-0,20	

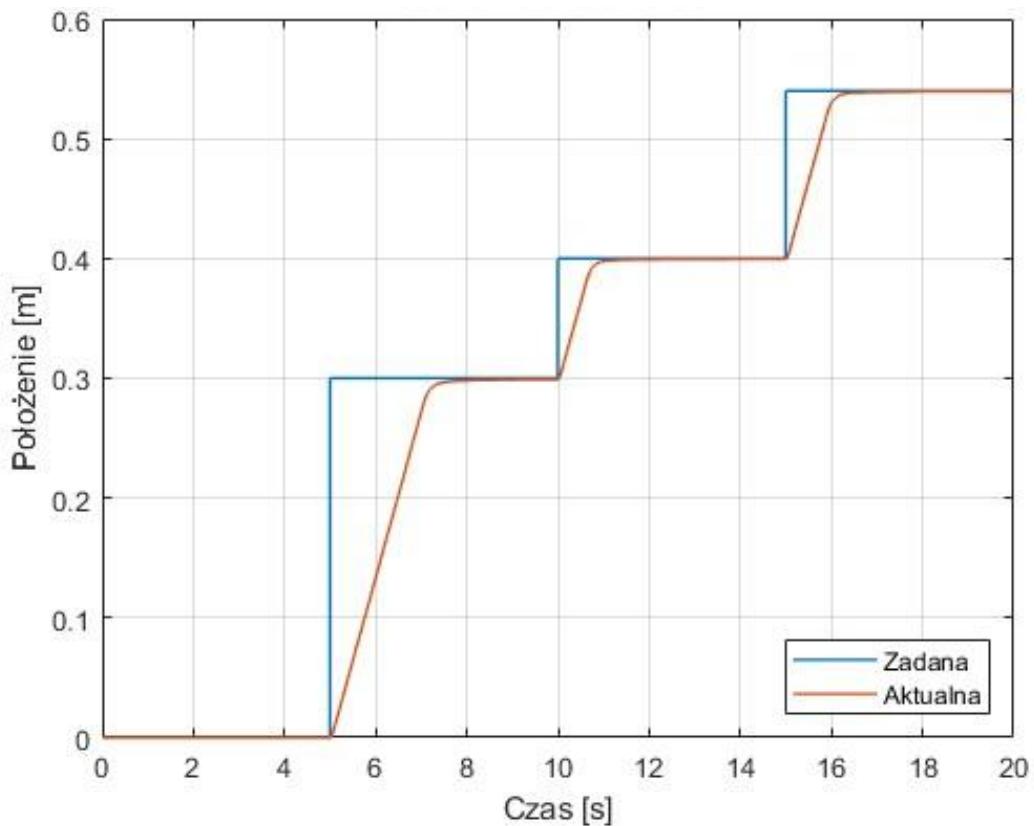
Zastosowanie regulatora PID ułamkowego rzędu przyniosło bardzo zadowalający efekt. W przypadku osi x oraz z, wyeliminowane zostało przeregulowanie podczas odpowiedzi skokowej. Nie występują również oscylacje wielkości sterowanej. Poprawie uległy również odchylenia ciężarka, zarówno wartości liczbowe wychyleń jak i szybkość stabilizacji ładunku. Czasy narastania pozostały bardzo zbliżone, wynika to z budowy suwnicy. Przebiegi odpowiedzi na wymuszenie sekwencyjne układu regulacji z FOPID przedstawiono na rysunkach (5.23) - (5.27).



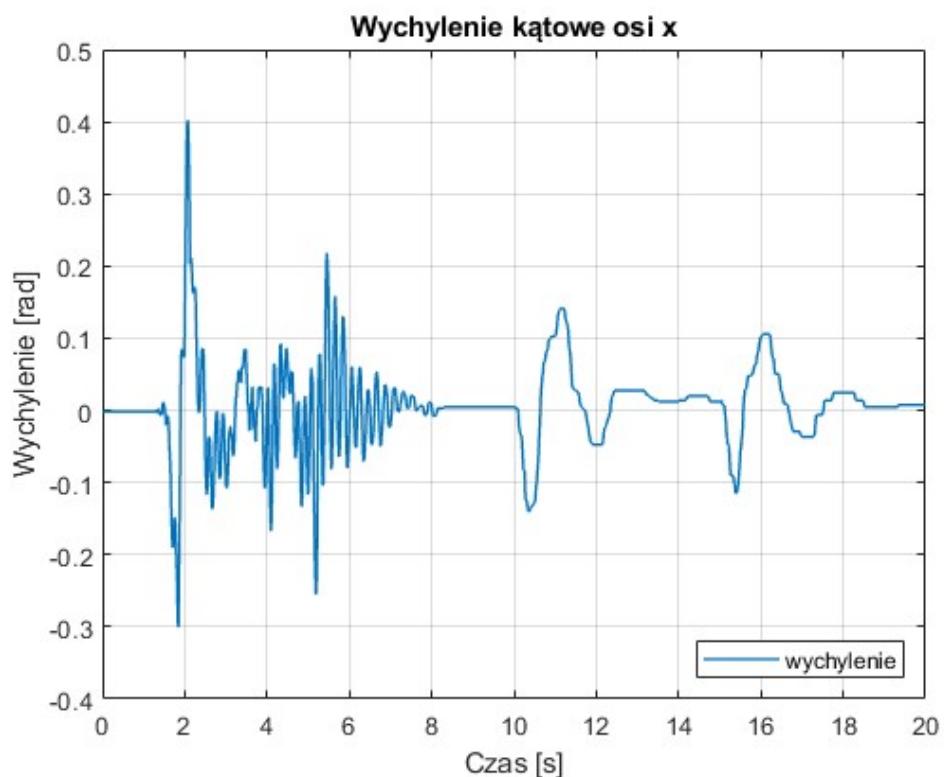
Rys. 5.23. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne osi x układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu po optymalizacji



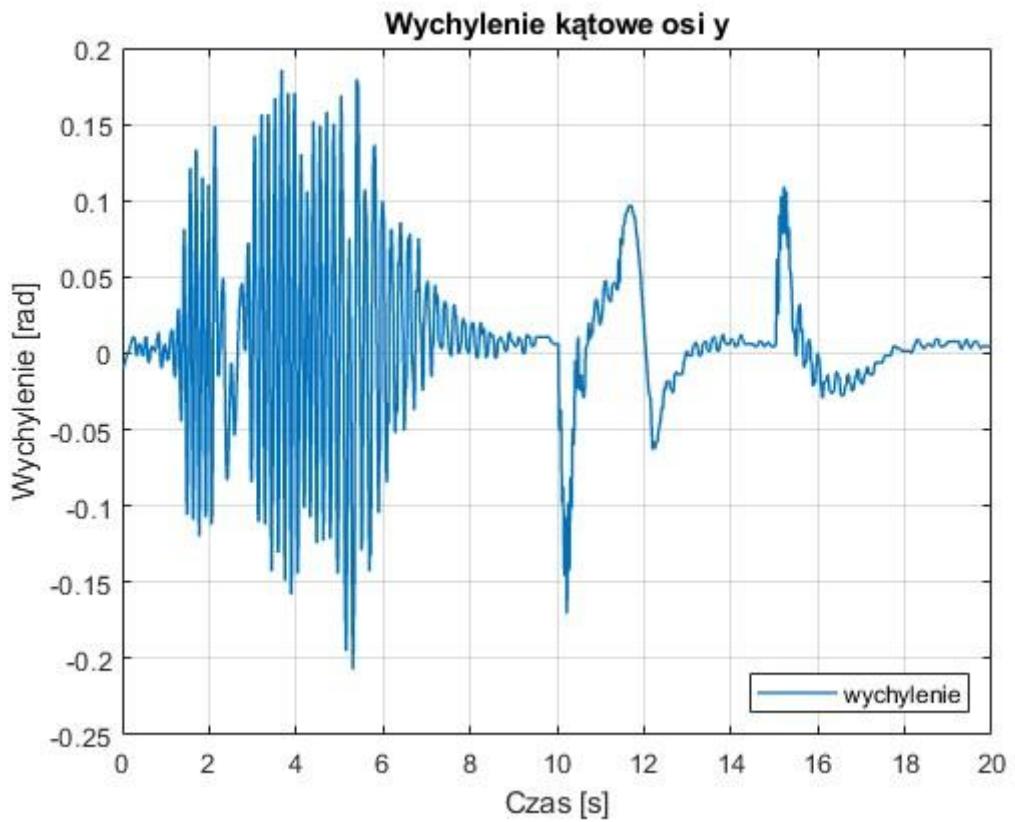
Rys. 5.24. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne osi y układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu po optymalizacji



Rys. 5.25. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne osi z układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu po optymalizacji



Rys. 5.26. Odchylenie kątowe w osi x podczas wymuszenia sekwencyjnego układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji



Rys. 5.27 Odchylenie kątowe w osi y podczas wymuszenia sekwencyjnego układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji

Tabela 5.4 zawiera wskaźniki jakości dla badanego przypadku.

Tabela 5.4. Wskaźniki jakości odpowiedzi na wymuszenie sekwencyjne układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu.

	oś x	oś y	oś z
uchyb	0,0012	0,0024	0,0002
całka z kwadratu uchybu	0,01081	0,0336	0,00278
czas narastania 10-90% [s]	0,571	0,615	0,6
czas regulacji 2% [s]	1,123	0,801	0,747
przeregulowanie [%]	0	0,745	0
maks. wychylenie dodatnie [rad]	0,4	0,18	
maks. wychylenie ujemne [rad]	-0,3	-0,21	

W przypadku podążania za sekwencyjną wartością referencyjną, regulator FOPID szybciej doprowadzał wózek do wartości zadanej oraz robił to w sposób bardziej wygładzony. Niestety zaobserwować można znaczne wychylenia kątowe w osi x, w przeciwieństwie do osi y, w której odchylenia te są mniejsze niż w przypadku regulatora PID. Wynikać to może ze złych warunków początkowych albo ograniczeń podczas przeprowadzania optymalizacji parametrów dla tego regulatora FOPID wychylenia kątowego γ .

5.4. Analiza porównawcza

Najbardziej rzetelnym porównaniem obydwu regulatorów będzie zestawienie wskaźników jakości w jednej tabeli. Działanie to zostanie przeprowadzone osobno dla wymuszenia skokowego oraz sekwencyjnego. Kolor zielony oznacza bardziej korzystny wynik dla danego wskaźnika jakości, czerwony - wynik gorszy oraz żółty - wyniki bardzo zbliżone do siebie.

Tabela 5.5. Porównanie wskaźników jakości odpowiedzi skokowej regulatora PID oraz PID ułamkowego rzędu

Oś:	Oś x		Oś y		Oś z	
Regulator:	PID	FOPID	PID	FOPID	PID	FOPID
uchyb	0,0002	0,0023	0,0007	0,0022	0,0003	0,0004
całka z kwadratu uchybu	0,0742	0,074	0,045	0,0458	0,1598	0,1586
czas narastania 10-90% [s]	0,9654	0,949	0,5597	0,5834	2,3012	2,3111
czas regulacji 2% [s]	2,132	2,0434	1,2821	0,8413	1,5893	2,9556
przeregulowanie [%]	2,9576	0	5,1112	0,8751	2,2309	0
maks. wychylenie dodatnie [rad]	0,16	0,13	0,25	0,09		
maks. wychylenie ujemne [rad]	-0,215	-0,23	-0,4	-0,2		

Powołując się na powyższą tabelę, regulator PID ułamkowego rzędu okazał się być lepszy od zwykłego w 11 "kategoriach", natomiast gorszy w 5. Jest to znacząca przewaga, która pozwala stwierdzić, że w przypadku odpowiedzi na wymuszenie skokowe radzi sobie lepiej. Porównanie tych dwóch regulatorów na podstawie sekwencyjnej wartości referencyjnej przedstawia tabela 5.6.

Tabela 5.6. Porównanie wskaźników jakości podczas zmiennej trajektorii zadanej regulatora PID oraz PID ułamkowego rzędu

Oś:	Oś x		Oś y		Oś z	
Regulator:	PID	FOPID	PID	FOPID	PID	FOPID
uchyb	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]	-0,14	-0,3	-0,37	-0,21		

W przypadku śledzenia zmiennej trajektorii, wyniki są bardzo zbliżone do wymuszenia skokowego. W tym wypadku również lepszy okazał się regulator FOPID, z ponad dwukrotną przewagą nad reguляtorem klasycznym PID.

6. PODSUMOWANIE

Na podstawie badań wykonanych w rozdziale 5, jednoznacznie można potwierdzić zasadność treści poruszonych w podrozdziale 4.3. Wykresy zamieszczone w tym dziale znacznie różnią się od tych otrzymanych bez regulatorów, oczywiście na korzyść PID oraz FOPIID. Nie są one niestety idealne i wychylenia kątowe wykraczają poza normy uznawane w przemyśle, na przykład stoczniowym. Powody takich wychyleń pomimo bardzo dobrych wyników w przypadku regulatorów osi mogą być dwa. Pierwszy z nich, to metoda doboru nastaw. Drugi powód, o większym znaczeniu, to osobne optymalizowanie każdego z regulatorów. Głównie chodzi tu o osobne optymalizowanie regulatora osi x i wychylenia kątowego w osi x, analogicznie w przypadku osi y. Gdyby zastosować łączoną optymalizację tych dwóch regulatorów, ten odpowiedzialny za oś "widziałby" drugi (sterujący odchyleniem w tejże osi). W podejściu prezentowanym w pracy, jedynie regulator wychylenia "widzi" parametry regulatora drugiego, w odwrotną stronę nie, zatem wyniki nie są idealnie zoptymalizowane. Nawiązując do analizy porównawczej, zauważać można iż regulator PID klasyczny nie zawsze jest wystarczającym rozwiązaniem oraz nie sprawdzi się w przypadku wszystkich obiektów dynamicznych. Gdy nie jest wymagana szybka i precyzyjna odpowiedź, można zastosować ten typ. Znacznie lepsze rezultaty przyniosły regulator PID niecałkowitego rzędu różniczkowania i całkowania. Posiada on jednak jedną główną wadę. Mianowicie, operacje niecałkowitego rzędu wymagają nieograniczonych zasobów środowiska obliczeniowego. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem tego problemu jest aproksymacja filtrem Oustaloup'a oraz jego modyfikacjami: filtr równoległy i czasowy [17]. Zatem zastosowanie regulatora FOPIID znaczco poprawia jakość regulacji, ale wymaga implementacji dodatkowych operacji matematycznych. W przypadku pracy, wykorzystana została dodatkowa, darmowa biblioteka środowiska Matlab, która oferuje gotowe bloki do niecałkowitych operacji, które umożliwiają i ułatwiają stosowanie tego typu. Podsumowując, badana suwnica 3D wymaga stosowania algorytmów regulacji w celu poprawnego jej działania. Przy ich projektowaniu, przemyśleć należy wszystkie aspekty związane z obiektem, tak aby wyniki były jak najlepsze.

WYKAZ LITERATURY

1. Aksjonov A. (2015). *The Modelling and Control of 3D Crane*. Praca magisterska, Politechnika w Tallinie, Wydział Elektryczny.
2. Schindeler D., Aschemann H. (2011). *Fast Nonlinear MPC for an Overhead Travelling Crane*. Proc. of the 18th World Congress The International Federation of Automatic Control, Milano, August 28 - September 2.
3. Antić D., Jovanović Z. (2012). *Anti-Swing Fuzzy Controller Applied in a 3D Crane System*. ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 2, No. 2, pp. 196-200.
4. Pauluk M., Korytowski A., Turnau A., Szymkat M. (2001). *Time optimal control of 3D Crane*. Proc. of the 7th Inter. Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, August 28.
5. Pogorzelski R. (2017). *Modularne sieci neuronowe w sterowaniu modelem laboratoryjnym suwnicy przemysłowej*. Czasopismo akademickie Politechniki Poznańskiej, Inżynieria elektryczna, No. 91, s. 277-283
6. 3D Crane User's manual, http://www.inteco.com.pl/Docs/3DCrane_um.pdf, (otworzono 5.09.2023).
7. Piotrowski R., Dziendziel T., Gruk M. (2014). *Optymalizacja nastaw regulatorów PID do sterowania suwnicą 3D*. Pomiary Automatyka Robotyka, Nr. 6, s. 77-85.
8. Computer Science Viki, https://computersciencewiki.org/index.php/Computer_modeling, (otworzono 1.10.2023).
9. C. Kuo B., Golnaraghi F. (2017). *Automatic Control Systems*. Wydawnictwo Wiley.
10. King M. (2011). *Process Control: A practical approach*. Wydawnictwo Wiley.
11. Ocena jakości pracy układu regulacji (2010)., <https://home.agh.edu.pl/~pautom/pliki/wykłady/przykładowe/09.pdf>
12. Kreyszig E. (2015). *Advanced engineering mathematics*. Wydawnictwo Wiley.
13. ElektronikaB2B (2022). Regulacja PID - w teorii i praktyce, <https://elektronikab2b.pl/technika/54527-regulacja-pid-w-teorii-i-praktyce>, (otworzono 11.10.2023).
14. Łukasik S. *Regulacja ciągła PID*, zajęcia laboratoryjne z przedmiotu Podstawy Inżynierii Sterowania.
15. Puchalski B. (2023). *Regulator PIΔDμ o niecałkowitych rzędach całkowania i różniczkowania*, wykład z przedmiotu Przemysłowe Układy Sterowania PID.
16. Duzinkiewicz K. *Teoria sterowania - Dynamika układów pierwszego i drugiego rzędu – wpływ rozmieszczenia biegunów*, materiały pomocnicze do ćwiczeń laboratoryjnych z przedmiotu Teoria Sterowania.
17. Bauer W. (2020). *Implementacja układów niecałkowitego rzędu w systemach wbudowanych*. Autoreferat, Akademia Górnictwa - Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej.

WYKAZ RYSUNKÓW

2.1. Budowa suwnicy.....	11
2.2. Rzeczywisty wygląd badanej suwnicy z obciążeniem w punkcie początkowym.....	11
2.3. Komunikacja PC - obiekt (suwnica).....	12
3.1. Opis fizyczny sił i wielkości działających na obiekt.....	13
3.2. Pozycja, prędkość oraz sterowanie dla osi X (Czas, Amplituda).....	15
3.3. Pozycja, prędkość oraz sterowanie dla osi Y (Czas[s], Amplituda).....	16
3.4. Pozycja, prędkość oraz sterowanie dla osi Z (Czas[s], Amplituda).....	16
3.5. Porównanie przebiegu aktualnej pozycji ciężarka w czasie, oraz przebiegu prędkości w czasie dla obiektu symulacyjnego a rzeczywistego dla osi X.....	17
3.6. Porównanie przebiegu aktualnej pozycji ciężarka w czasie, oraz przebiegu prędkości w czasie dla obiektu symulacyjnego a rzeczywistego dla osi Y.....	18
3.7. Porównanie przebiegu aktualnej pozycji ciężarka w czasie, oraz przebiegu prędkości w czasie dla obiektu symulacyjnego a rzeczywistego dla osi Z.....	18
3.8. Okres drgań wahadła oraz jego długość.....	19
4.1. Schemat badawczy zachowania układu bez regulacji.....	21
4.2. Porównanie wartości zadanej oraz aktualnej położenia ciężarka w osi x bez regulacji.....	22
4.3. Porównanie wartości zadanej oraz aktualnej położenia ciężarka w osi y bez regulacji.....	23
4.4. Porównanie wartości zadanej oraz aktualnej położenia ciężarka w osi z bez regulacji.....	23
4.5. Wychylenie kątowe w osi y bez regulacji.....	24
4.6. Wychylenie kątowe w osi y bez regulacji.....	24
4.7. Porównanie wartości zadanej oraz aktualnej położenia ciężarka w osi x wraz z nastawami regulatora PID dobranymi w sposób eksperymentalny.....	25
4.8. Porównanie wartości zadanej oraz aktualnej położenia ciężarka w osi y wraz z nastawami regulatora PID dobranymi w sposób eksperymentalny.....	25
4.9. Porównanie wartości zadanej oraz aktualnej położenia ciężarka w osi z wraz z nastawami regulatora PID dobranymi w sposób eksperymentalny.....	26
4.10. Wychylenie kątowe w osi x wraz z nastawami regulatora PID dobranymi w sposób eksperymentalny.....	26
4.11. Wychylenie kątowe w osi y wraz z nastawami regulatora PID dobranymi w sposób eksperymentalny.....	27
4.12. Schemat blokowy regulatora PID równoległego IND.....	30
4.13. Schemat blokowy regulatora PID szeregowego idealnego ISA (ang. ideal standard algorithm) ..	32
4.14. Zobrazowanie wpływu stałej czasowej całkowania regulatora [14].....	33
4.15. Model przygotowany w celu optymalizacji nastaw regulatora osi x.....	35
4.16. Model przygotowany w celu optymalizacji nastaw regulatora osi y.....	36
4.17. Model przygotowany w celu optymalizacji nastaw regulatora osi z.....	36
4.18. Model przygotowany w celu optymalizacji nastaw regulatora wychylenia kątowego osi x.....	36
4.19. Model przygotowany w celu optymalizacji nastaw regulatora wychylenia kątowego osi y.....	37
4.20. Schemat blokowy ułamkowego regulatora PID.....	40
4.21. Płaszczyzna , [15].....	41
4.22. Struktura zaimplementowanego regulatora FOPID w środowisku Matlab.....	42
4.23. Model optymalizacyjny regulatora FOPID osi x.....	42
4.24. Model optymalizacyjny regulatora FOPID osi y.....	43
4.25. Model optymalizacyjny regulatora FOPID osi z.....	43
4.26. Model optymalizacyjny regulatora FOPID odchylenia kątowego osi x.....	44
4.27. Model optymalizacyjny regulatora FOPID odchylenia kątowego osi y.....	44

5.1. Model symulacyjny suwnicy.....	47
5.2. Okno kontrolne suwnicy 3D w środowisku Matlab.....	48
5.3. Trajektoria zadana na osi x.....	48
5.4. Trajektoria zadana na osi y.....	49
5.5. Trajektoria zadana na osi z.....	49
5.6. Schemat blokowy układu regulacji z wykorzystaniem regulatora PID.....	50
5.7. Odpowiedź skokowa osi x układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	51
5.8. Odpowiedź skokowa osi y układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	51
5.9. Odpowiedź skokowa osi z układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	52
5.10. Wychylenie kątowe przy wymuszeniu skokowym w osi x układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	52
5.11. Wychylenie kątowe przy wymuszeniu skokowym w osi y układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	53
5.12. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne osi x układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	54
5.13. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne osi y układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	55
5.14. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne osi z układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	55
5.15. Odchylenie kątowe w osi x podczas wymuszenia sekwencyjnego układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	56
5.16. Odchylenie kątowe w osi y podczas wymuszenia sekwencyjnego układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	56
5.17. Schemat blokowy układu regulacji z wykorzystaniem regulatora PID ułamkowego rzędu.....	58
5.18. Odpowiedź skokowa osi x układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu po optymalizacji.....	59
5.19. Odpowiedź skokowa osi y układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu po optymalizacji.....	59
5.20. Odpowiedź skokowa osi z układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu po optymalizacji.....	60
5.21. Wychylenie kątowe przy wymuszeniu skokowym w osi x układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	60
5.22. Wychylenie kątowe przy wymuszeniu skokowym w osi y układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	60
5.23. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne osi x układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu po optymalizacji.....	62
5.24. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne osi y układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu po optymalizacji.....	62
5.25. Odpowiedź na wymuszenie sekwencyjne osi z układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu po optymalizacji.....	63
5.26. Odchylenie kątowe w osi x podczas wymuszenia sekwencyjnego układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	64
5.27 Odchylenie kątowe w osi y podczas wymuszenia sekwencyjnego układu regulacji z regulatorem PID po optymalizacji.....	64

WYKAZ TABEL

3.1. Wyliczone współczynniki transmitancji silników.....	15
4.1. Wyniki optymalizacji nastaw dla osi x.....	37
4.2. Wyniki optymalizacji nastaw dla wychylenia kątowego w osi x.....	38
4.3. Wyniki optymalizacji nastaw dla osi y.....	38
4.4. Wyniki optymalizacji nastaw dla wychylenia kątowego w osi y.....	38
4.5. Wyniki optymalizacji nastaw dla osi z.....	39
4.6. Finalny dobór nastaw parametrów dla regulatorów PID dla trzech osi.....	39
4.7. Wyniki optymalizacji regulatora FOPID dla osi x.....	44
4.8. Wyniki optymalizacji regulatora FOPID dla wychylenia kątowego osi x.....	45
4.9. Wyniki optymalizacji regulatora FOPID dla osi y.....	45
4.10. Wyniki optymalizacji regulatora FOPID dla wychylenia kątowego osi y.....	45
4.11. Wyniki optymalizacji regulatora FOPID dla osi z.....	46
4.12. Finalnie dobrane nastawy dla regulatora FOPID.....	46
5.1. Wskaźniki jakości odpowiedzi skokowej układu regulacji z regulatorem PID.....	53
5.2. Wskaźniki jakości odpowiedzi na wymuszenie sekwencyjne układu regulacji z regulatorem PID.	57
5.3. Wskaźniki jakości odpowiedzi skokowej układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu.	61
5.4. Wskaźniki jakości odpowiedzi na wymuszenie sekwencyjne układu regulacji z regulatorem PID ułamkowego rzędu.....	64
5.5. Porównanie wskaźników jakości odpowiedzi skokowej regulatora PID oraz PID ułamkowego rzędu.....	65
5.6. Porównanie wskaźników jakości podczas zmiennej trajektorii zadanej regulatora PID oraz PID ułamkowego rzędu.....	66

WYKAZ ZAŁĄCZNIKÓW

Załącznik 1 - funkcja uruchamiająca model na potrzeby symulacji

Załącznik 2 - funkcja optymalizująca regulator PID trzech osi

Załącznik 3 - funkcja optymalizująca regulator PID wychyleń kątowych

Załącznik 4 - funkcja optymalizująca regulator FOPID trzech osi

Załącznik 5 - funkcja optymalizująca regulator FOPID wychyleń kątowych

Załącznik 6 - model przygotowany w celu optymalizacji regulatora PID osi x

Załącznik 7 - model przygotowany w celu optymalizacji regulatora PID osi y

Załącznik 8 - model przygotowany w celu optymalizacji regulatora PID osi z

Załącznik 9 - model przygotowany w celu optymalizacji regulatora PID wychylenia w osi x

Załącznik 10 - model przygotowany w celu optymalizacji regulatora PID wychylenia w osi y

Załącznik 11 - model przygotowany w celu optymalizacji regulatora FOPID osi x

Załącznik 12 - model przygotowany w celu optymalizacji regulatora FOPID osi y

Załącznik 13 - model przygotowany w celu optymalizacji regulatora FOPID osi z

Załącznik 14 - model przygotowany w celu optymalizacji regulatora FOPID wychylenia w osi x

Załącznik 15 - model przygotowany w celu optymalizacji regulatora FOPID wychylenia w osi y