

ZASTOSOWANIE REGULATORA PID DO STEROWANIA MANIPULATOREM Z NAPIĘDEM ELEKTROHYDRAULICZNYM O RÓWNOLEGŁEJ KINEMATYCE

Piotr Owczarek, Dominik Rybarczyk

Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania

Streszczenie. Artykuł opisuje zastosowanie regulatora PID do sterowania manipulatorem wyposażonym w napędy elektrohydrauliczne. Konstrukcja manipulatora oparta jest na nietypowej kinematyce równoległej, w której ruchy poszczególnych ramion są od siebie zależne. Autorzy porównali wpływ nastaw regulatora PID z regulatorem proporcjonalnym wykorzystując całkowity wskaźnik jakości z uchybu regulacji.

Słowa kluczowe: regulator PID, kinematyka równoległa, napęd elektrohydrauliczny, manipulator

USE OF THE PID CONTROLLER TO CONTROL OF THE PARALLEL KINEMATIC MANIPULATOR WITH ELECTROHYDRAULIC SERVO DRIVES

Abstract. The article describes the use of the PID controller to control the manipulator equipped with electrohydraulic drives. The design of the manipulator was based on an unusual parallel kinematics, in which arm movements are dependent on each other. The authors attempted to minimize the error of process control by the integral performance indices to compare the tuning parameters of PID controller with a proportional controller.

Keywords: PID controller, parallel kinematics, electrohydraulic servodrives, manipulator

Wstęp

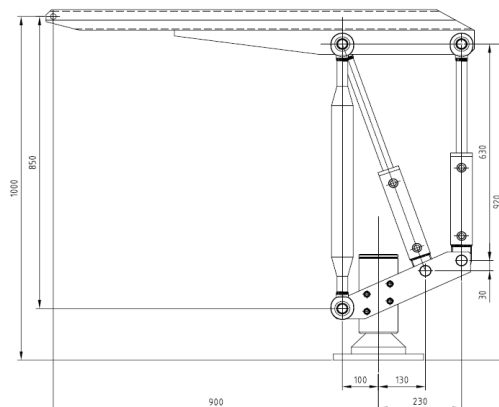
Zastosowanie manipulatorów w przemyśle w znaczący sposób wpływa na szybkość oraz dokładność wykonywanych produktów. Najczęściej spotykanym rodzajem napędów w manipulatorach są silniki elektryczne. W przypadku operowania bardzo dużymi siłami napędy elektryczne mogą okazać się jednak niewystarczające. Rozwiązaniem niniejszego problemu może być zastosowanie urządzeń z napędami hydraulicznymi. Udźwig manipulatora wyposażonego w hydrauliczny układ napędowy zależy w dużej mierze od zastosowanych w nim siłowników oraz od mocy i wydatku pompy zasilacza. Wytworzenie odpowiedniego ciśnienia w układzie jest niezbędne do zachowania poprawnych parametrów pracy. Takie urządzenia operują ogromnymi siłami w zakresie setek kilogramów. Niestety wadą serwonapędów elektrohydraulicznych są ich silne nieliniowości, utrudniające precyzyjne sterowanie. Z tego względu konieczne jest udoskonalanie istniejących oraz poszukiwanie nowych metod sterowania, a także tworzenie innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych pozwalających na zapewnienie określonej dokładności przy zachowaniu dużych sił.

1. Opis problemu badawczego

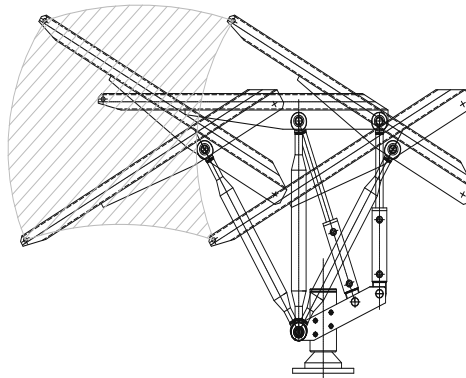
Jedną z podstawowych nieliniowości serwonapędów elektrohydraulicznych zbudowanych na bazie zaworu proporcjonalnego jest występowanie tzw. strefy nieczułości. Wiąże się ona ze specyfiką pracy zaworu. Wewnątrz zaworu znajduje się suwak, który przesuwają pod wpływem pola magnetycznego cewki. Wychylenie suwaka powoduje zmianę szerokości szczeliny, przez którą przepływa ciecz robocza. Ograniczenia konstrukcyjne powodują, że przestrzeń działania suwaka jest nieco zmniejszona lub zwiększona, tworząc w efekcie strefę nieczułości (najczęściej dodatnią). Kolejnym istotnym elementem wpływającym na pracę serwonapędu elektrohydraulicznego są ograniczenia natężenia strumienia cieczy roboczej przepływającej przez elementy hydrauliczne. Problem nieliniowości serwonapędów elektrohydraulicznych oraz ich sterowania został opisany w [1, 6]. Dodatkowym problemem w przypadku opisywanego układu jest kinematyka manipulatora, ponieważ napędy nie znajdują się bezpośrednio w przegubach manipulatora, a to powoduje, że ruch poszczególnych ramion może być zależny, tak jak przedstawiono na rys. 1. Opis kinematyki manipulatorów można znaleźć w [3]. Autorzy założyli, że wykorzystaniem regulatora PID umożliwi skuteczne sterowanie opisywanym urządzeniem oraz w pewnym stopniu zapewni kompensację wpływu wyżej wymienionych nieliniowości.

2. Opis stanowiska badawczego

W celu badania skuteczności sterowania, konieczne stało się zbudowanie stanowiska badawczego. Punktem centralnym był dwuosiowy manipulator o kinematyce równoległej (rys. 1, rys. 2). Każdą z osi wyposażono w siłowniki hydrauliczne połączone z zaworami proporcjonalnymi (rys. 3). Zawory proporcjonalne sterowano za pomocą dedykowanych kart (rys. 4). Całość zasilano za pomocą pompy o stałym wydatku ciśnienia. Jako układ pomiarowy zastosowano enkodery inkrementalne o rozdzielczości 3600 impulsów/obr.



Rys. 1. Budowa manipulatora

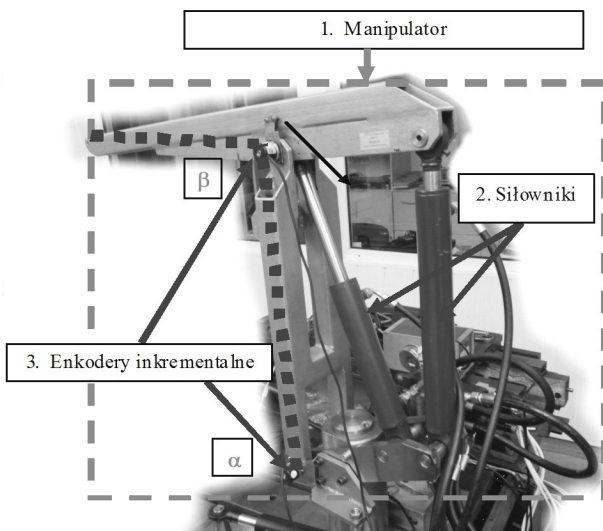


Rys. 2. Zakres pracy manipulatora

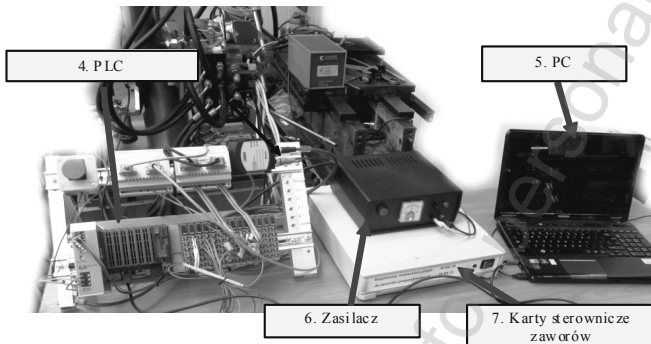
Pomiar kąta pochylenia ramion manipulatora realizowany był za pomocą enkoderów inkrementalnych umieszczonych w jego przegubach. Relacje wynikające z kinematyki manipulatora uzależniają poszczególne ruchy członów wykonawczych. Oś a (rys. 3) - umieszczona w podstawie manipulatora - jest bezpośrednio sterowana przez zamocowany do niej siłownik, natomiast pochylenie osi b jest zależne od obu siłowników. W ten sposób powstała nietypowa konstrukcja o strukturze równoległej, która w dalszej części niniejszego artykułu została wykorzystana do badań.

Kompletne stanowisko badawcze składało się z następujących elementów:

1. manipulator z napędem elektrohydraulicznym,
2. siłowniki hydrauliczne,
3. enkodery inkrementalne,
4. PLC B&R (ang. programmable logic controller),
5. komputer PC,
6. zasilacz kart sterowniczych,
7. karty sterownicze zaworów.



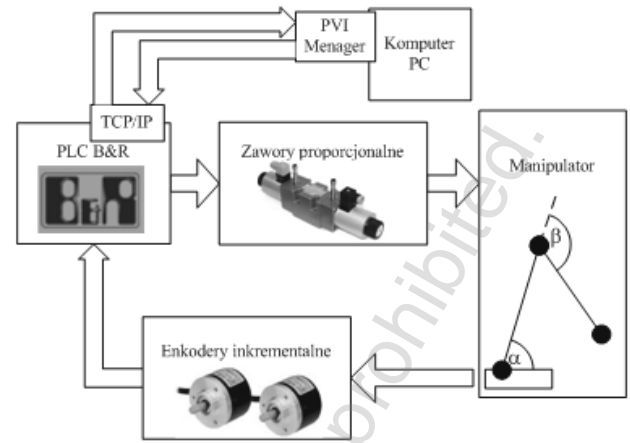
Rys. 3. Widok manipulatora z napędem elektrohydraulicznym



Rys. 4. Układ sterowania

Układ sterowania oparty był na sterowniku PLC firmy B&R komunikujący się z oprogramowaniem PVI Menager (ang. Process Visualization Interface). Schemat blokowy stanowiska został przedstawiony na rys. 5. Karty sterownicze obsługiwane były za pomocą wyjść analogowych (sygnał napięciowy w standardzie $\pm 10V$), natomiast enkodery obsługiwane były za pomocą szybkich wejść licznikowych. Pomiar wartości pochylenia kąowego ramion przy odczycie kwadraturowym wynosi 14400 impulsów/obr, - w efekcie uzyskano rozdzielczość pomiarową kąta wynoszącą 0.025° .

Oprogramowanie sterownika PLC napisano w języku ST (ang. Structured Text) wykorzystując środowisko Automation Studio firmy B&R. Program wykonywany był w czasie rzeczywistym z krokiem $T=1ms$.



Rys. 5. Schemat układu sterowania

3. Przeprowadzone badania

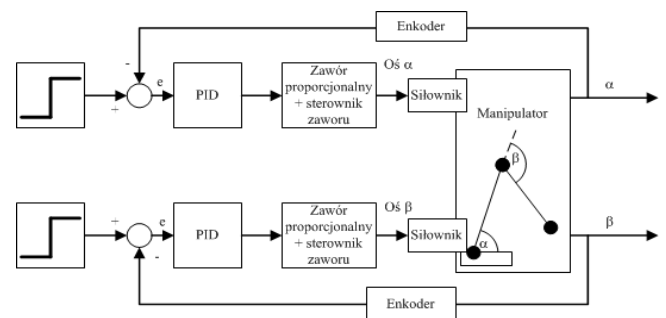
W celu sprawdzenia skuteczności działania opisywanego systemu autorzy przeprowadzili odpowiednie badania. Manipulator wykonywał ruchy typu Point to Point (z punktu do punktu) [5] jako skok jednostkowy z zakresu $0-20^\circ$, dla obu przegubów manipulatora. Przeprowadzane badania nie uwzględniają trapezoidalnego profilu prędkości, tak więc manipulator pracował w jej pełnym zakresie (zakresie prędkości wewnętrznych). Układ hydrauliczny zasilany był ciśnieniem 30 MPa o stałej wydajności przepływu cieczy.

System sterowania oparty był na równoległej strukturze regulatorów proporcjonalnych - w pierwszym cyklu badań - oraz - regulatorów typu PID - w drugim cyklu badań [4, 5]. Zastosowano dyskretną strukturę regulatora o postaci [8]:

$$y(k) = k_p \cdot e(k) + k_d \cdot \Delta e(k) + k_i \cdot I(k) \quad (1)$$

gdzie: k_p - wzmacnienie członu proporcjonalnego, $k_d = T_d/T_p$ - wzmacnienie członu różniczkującego, $k_i = T_p/T_i$ - wzmacnienie członu całkującego, e - uchyb regulacji, I - całka.

Ciągłą postać różniczki zastąpiono różnicą pierwszego rzędu, a ciągłą postać całki zastąpiono całkowaniem wykorzystując metodę trapezów (aprosymacja pola powierzchni pod funkcją) [7]. Poniżej (rys. 6) przedstawiono schemat blokowy zbudowanego stanowiska pomiarowego.

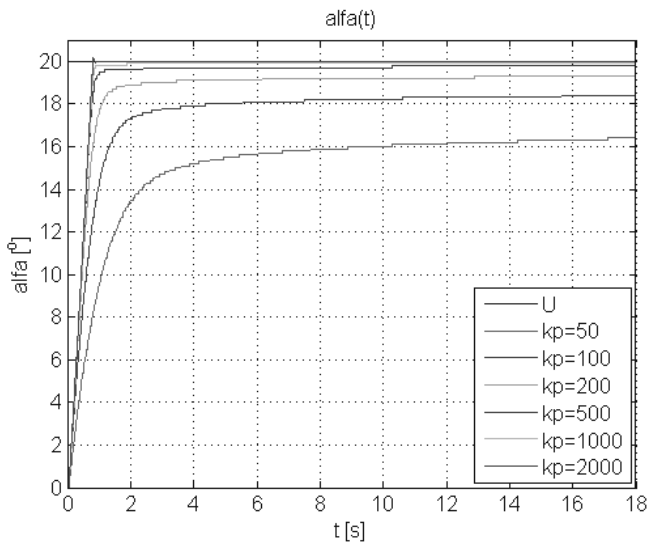


Rys. 6. Schemat blokowy połączenia regulatorów

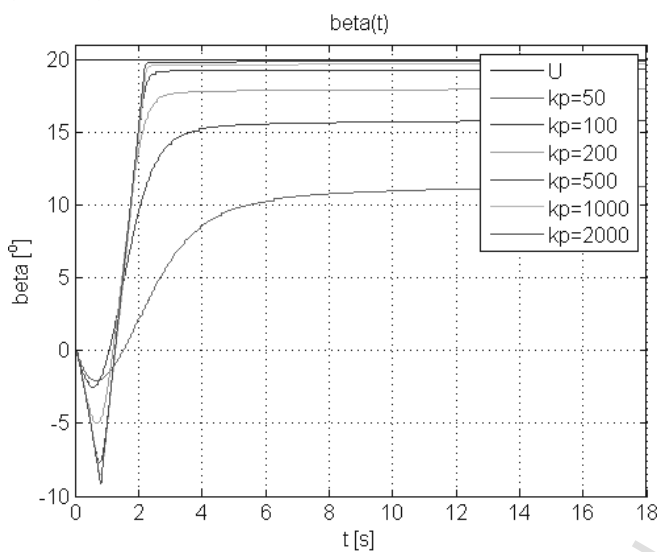
Aby porównać skuteczności działania poszczególnych regulatorów posłużono się całkowymi wskaźnikami jakości [2]. Są one wskaźnikami globalnymi (całościowymi), które mogą wyrażać interpretację energetyczną układu. Autorzy wyliczali całkowite wskaźniki jakości z uchyby regulacji dla obu przegubów manipulatora.

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

gdzie: I - całkowity wskaźnik jakości, e - uchyb regulacji.



Rys. 7. Wykres kąta α dla regulatora proporcjonalnego przy wymuszeniu typu skok jednostkowy



Rys. 8. Wykres kąta β dla regulatora proporcjonalnego przy wymuszeniu typu skok jednostkowy

Pierwszy etap badania został zrealizowany z wykorzystaniem regulatora proporcjonalnego o różnych nastawach wzmocnienia. Na rysunkach 7 oraz 8 przedstawiono przebiegi zmian kątów manipulatora α , β .

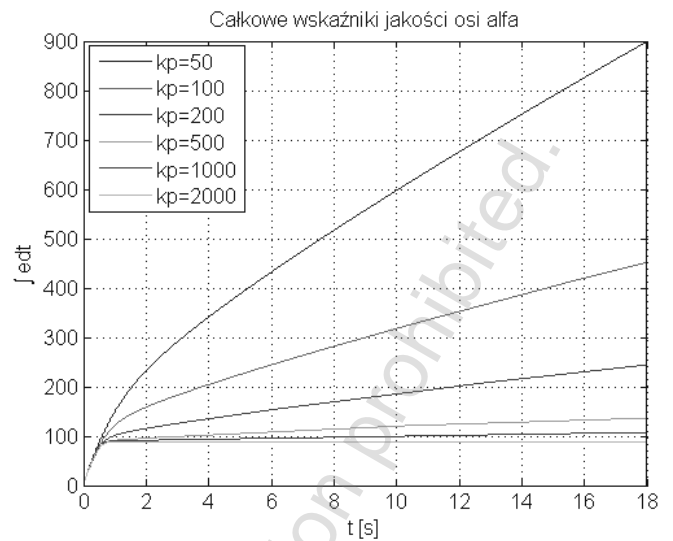
Na rys. 8 (oś β) widać wpływ zależności osi α powodujący odchylenie kątowe w zakresie -9° . Wynika on z wcześniejszej wspomnianej równoległej kinematyki manipulatora podczas maksymalnego przepływu cieczy roboczej w obu siłownikach.

Dla niskich wartości wzmocnienia w układzie widoczne były duże wartości uchybu związane z nieliniowym charakterem zaworu hydraulicznego. W miarę zwiększania wartości wzmocnienia uchyb malał, aż do wartości bliskiej zero. Na przebiegach można zauważyć wyraźny wpływ ograniczenia wynikającego z wartości natężenia strumienia cieczy roboczej przepływającej przez poszczególne elementy układu. Dlatego też, zwiększając wzmocnienie układu powyżej $k_p=200$ nie wpływało znacznie na czas regulacji.

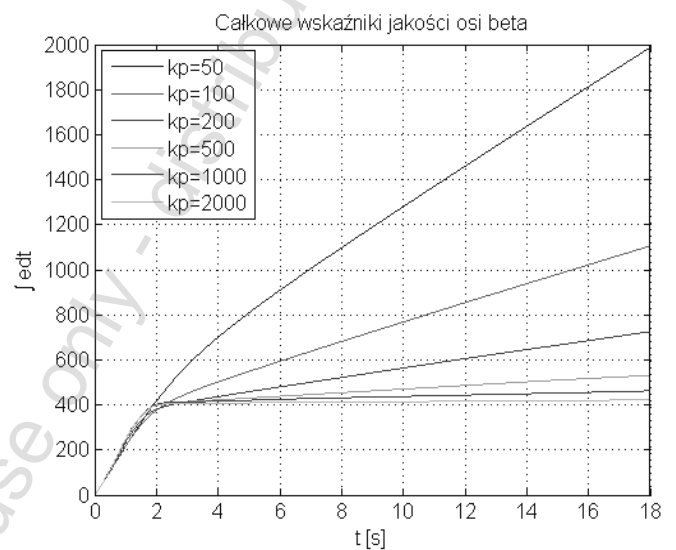
Jako wynik wyjściowy wykorzystano całkowite wskaźniki jakości, a ich przebiegi przedstawiono na rys. 9, 10. Najkorzystniejszy wynik uzyskano dla wzmocnienia $k_p = 2000$.

Drugi etap badań wykonano zmieniając nastawy regulatora PID. Jego stosowanie ma sens jedynie dla niskich prędkości, w których nie występują fizyczne ograniczenia przepływu strumienia cieczy (działanie całkujące).

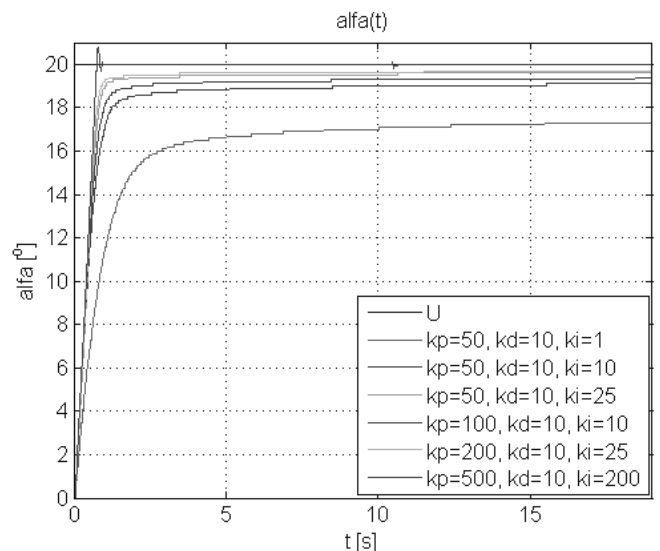
Wyniki badań przedstawiono na rys. 11, 12, 13, 14. Zmieniając wartości wzmocnienia k_i zauważono poprawę regulacji. Dobierano parametry wzmocnień, aż do sprowadzenia uchybu w czasie ustalonym do zera.



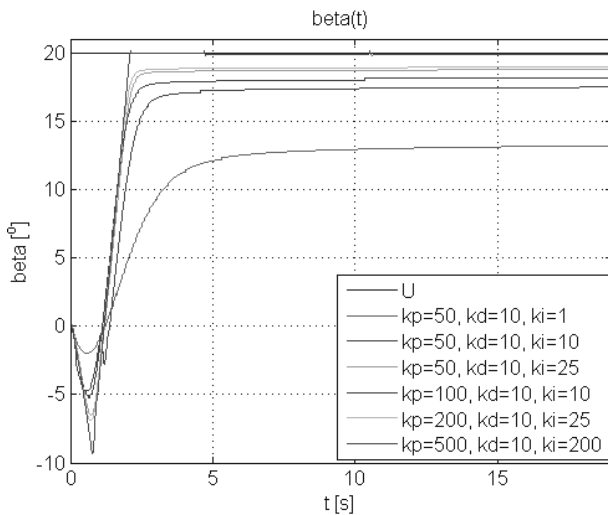
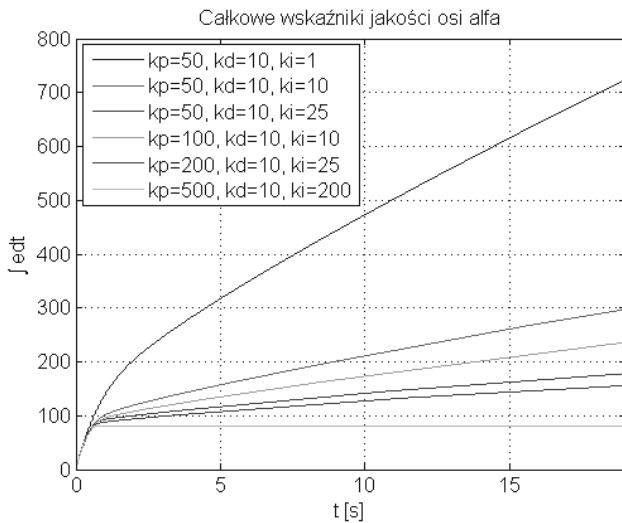
Rys. 9. Wykres całkowitego wskaźnika jakości dla osi α



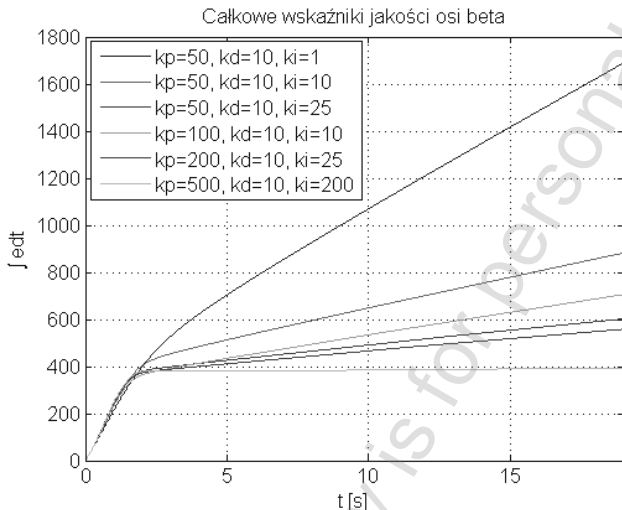
Rys. 10. Wykres całkowitego wskaźnika jakości dla osi β



Rys. 11. Wykres kąta α dla regulatora PID przy wymuszeniu typu skok jednostkowy

Rys. 12. Wykres kąta β dla regulatora PID przy wymuszeniu typu skok jednostkowy

Rys. 13. Wykres całkowitego wskaźnika jakości dla osi a

Rys. 14. Wykres całkowitego wskaźnika jakości dla osi β

Zestawienie wyników otrzymanych całkowitych wskaźników jakości z czasu regulacji 19 sekund dla wybranych nastaw regulatorów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Całkowite wskaźniki jakości

	wzmocnienie	$I(e_a)$	$I(e_b)$
P	$k_p=2000$	87,03	427,56
PID	$k_p=500, k_d=10, k_i=200$	80,86	399,49

Analizując otrzymane wartości wskaźników zauważono, że jakość regulacji jest lepsza w przypadku regulatora PID, dla obu osi manipulatora, a uchyb w czasie ustalonym został sprowadzony do zera.

4. Wnioski

Autorzy zastosowali regulatora PID do sterowania manipulatora z napędem elektrohydraulicznym. Konstrukcja manipulatora oparta była na nietypowej kinematyce równoległej (ruchy w osiach dla poszczególnych ramion a,b były od siebie uzależnione). Autorzy porównali wpływ nastaw regulatora PID z regulatorem proporcjonalnym. Stosowanie dużych wartości wzmocnienia w przypadku pierwszego rodzaju regulatorów niweluje uchyb, jednak praca urządzenia jest niedopuszczalna ze względu na powstające szarpnięcia w końcowej fazie ruchu. Z uwagi na ograniczenia wynikające z wartości natężenia strumienia cieczy roboczej przepływającej przez elementy hydrauliczne stosowanie regulatora PID wykazało poprawę regulacji minimalizując całkowity wskaźnik jakości.

Nad zastosowaniem regulatora PID w manipulatorze z napędem elektrohydraulicznym prowadzone będą dalsze badania. Weryfikacji wymagać będzie przede wszystkim zachowaniu układu w warunkach zdefiniowanego trapezoidalnego profilu prędkości.

Literatura

- [1] Dorr H., Ewald R., Hutter J., Kretz D., Liedhegerer F., Schmitt A.: *Vademecum Hydrauliki Tom 2 Technika hydraulicznego sterowania zaworami proporcjonalnymi i serwowzorami*. Mannesmann Rexroth GmbH, 1986.
- [2] Horla D.: *Podstawy automatyki – ćwiczenia laboratoryjne*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003.
- [3] Jezierski E.: *Dynamika robotów*. WNT, Warszawa 2005.
- [4] Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R.: *Podstawy teorii sterowania*. WNT, Warszawa 2005.
- [5] Kozłowski K., Dutkiewicz P., Wróblewski W.: *Modelowanie i sterowanie robotów*. WN PWN, Warszawa 2003.
- [6] Milecki A.: *Liniowe serwonapędy elektrohydrauliczne. Modelowanie i sterowanie*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003.
- [7] Palczewski A.: *Równania różniczkowe zwyczajne Teoria i metody numeryczne z wykorzystaniem komputerowego systemu obliczeń symbolicznych*. WNT, 2004.
- [8] www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2558.pdf

Mgr inż. Piotr Owczarek

e-mail: piotr.owczarek@doctorate.put.poznan.pl

Doktorant w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych Politechniki Poznańskiej. Urodzony 01.05.1987 r. w Sieradzu. Ukończył studia w 2011r. na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Jest na studiach doktoranckich od 2011 r. na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej. Jego zainteresowania obejmują nowoczesne metody cyfrowego przetwarzania obrazów (między innymi algorytmy rozpoznające twarze), metody sztucznej inteligencji. Projektowanie urządzeń elektronicznych mechatronicznych. Programowanie w językach wyższego poziomu takich jak: C, C++, AVR-GCC, ST, LD.



Mgr inż. Dominik Rybarczyk

e-mail: dominik.rybarczyk@put.poznan.pl

Asystent w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej. Urodzony 13.05.1986 r. w Poznaniu. Ukończył studia w 2010 r. na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej. Jego zainteresowania obejmują urządzenia mechatroniczne, sterowniki mikroprocesorowe, metody sztucznej inteligencji oraz serwonapędy elektrohydrauliczne.



Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy pt. „Zastosowanie metod sztucznej inteligencji do nadzorowania pracy urządzeń mechatronicznych z napędami elektrohydraulicznymi sterowanymi bezprzewodowo.”