
Regulator impedancyjny dla elektrycznego zespołu napędowego robota

Edward Jezierski¹, Artur Gmerek²

Streszczenie

W artykule została przedstawiona propozycja regulatora impedancji, zdolnego do wpływania na podatność manipulatora w zależności od informacji uzyskiwanej ze sterownika niskopoziomowego, na temat interakcji robota z otoczeniem. Zaproponowano system w skład którego wchodzi sterownik niskopoziomowy z czujnikiem zbliżeniowym, na którego podstawie kontroler impedancyjny dostosowuje podatność manipulatora. Zamierzeniem twórców było opracowanie uniwersalnego regulatora impedancyjnego, jego warstwy fizycznej i programowej. Dzięki architekturze TCP/IP, regulator można łatwo zaadaptować do różnych kontrolerów robotów. Badania rzeczywiste zostały przeprowadzone na manipulatorze o jednym stopniu swobody napędzanym silnikiem BLDC.

1. WSTĘP

Impedancja mechaniczna robota jest najczęściej utożsamiana z podatnością jego łańcucha kinematycznego. Pojęcie impedancji do obszaru robotyki wprowadził Hogan [3]. Jeżeli założyć, że posługujemy się „naturalną analogią” prędkość-napięcie [5, 6], to impedancję mechaniczną można zdefiniować bardziej precyzyjnie. Mianowicie, po przyjęciu przyrostowego modelu liniowego w otoczeniu wybranego punktu pracy, impedancją mechaniczną łańcucha kinematycznego nazywamy stosunek transformaty Laplace’a prędkości ruchu efektora do transformaty Laplace’a siły zewnętrznej, która oddziałuje na manipulator. We współczesnych warunkach przemysłowych, mamy najczęściej do czynienia ze sterowaniem pozycyjnym robotów. Jest to sterowanie, które odbywa się przy bardzo dużej sztywności manipulatora, a więc małej impedancji łańcucha kinematycznego. Z kolei, przy sterowaniu pozycyjno-siłowym sztywność manipulatora musi być diametralnie odmienna w tych kierunkach, w których zachodzi sterowanie siłowe [4].

Impedancję łańcucha kinematycznego można zmieniać przez odpowiednie sterowanie zespołów napędowych robota. Stosunkowo łatwo jest na nią wpływać w przypadku aktuatorów pneumatycznych lub hydraulicznych [2]. Ich sztywność jest bowiem naturalnie związana z ośrodkami przenoszącymi energię. W przypadku napędów elektrycznych należy zastosować sterowanie usztywniające lub zmiękczające łańcuch kinematyczny przez zastosowanie sprzężenia zwrotnego. W

¹ Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, edward.jezierski@p.lodz.pl, tel. (42) 631 25 40

² Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, artur.gmerek@p.lodz.pl

tym procesie trzeba przewidywać przyszłą interakcję manipulatora z otoczeniem, bowiem zmiany impedancji nie da się dokonać nieskończenie szybko. Wynika to z faktu, że aktuatory elektryczne są sztywne z samej natury (najczęściej wysoka prędkość obrotowa oraz wysokie przełożenie przekładni). Powoduje to, iż interakcja z otoczeniem musi być wykryta odpowiednio wcześniej, aby kontroler mógł skutecznie zareagować. Można to osiągnąć dzięki wykorzystaniu informacji na temat otoczenia, uzyskiwanych od czujników zewnętrznych robota.

W opisywanym artykule został zaproponowany system, który umożliwia łatwą i skuteczną metodę połączenia sterownika silnika manipulatora z zewnętrznym czujnikiem zbliżeniowym. Składa się on ze sterownika niskopoziomowego współpracującego z systemem komputerowym. Dane uzyskiwane przez czujnik są wysyłane do programowego kontrolera impedancji, który przetwarza je oraz steruje skojarzonym z nim napędem elektrycznym, w celu uzyskania kontrolowanej podatności. W ten sposób manipulator może zostać przygotowany na interakcję z człowiekiem, lub kolizję z innym obiektem.

Sterowanie impedancyjne jest rozwijane w coraz większej liczbie ośrodków naukowych. Za prymitywne sterowniki impedancyjne mogą być już uznawane zarówno regulatory sztywności, jak i regulatory tłumienia.

Istnieje niewiele prac, opisujących interakcję systemu sterowania z czujnikami zewnętrznymi w celu zmiany impedancji na bardziej optymalną. Najczęściej interakcja z otoczeniem jest realizowana przy wykorzystaniu czujników siły [1, 7]. Czujniki siły są jednak skuteczne jedynie wtedy, kiedy ruchy manipulatora są dostatecznie wolne [10].

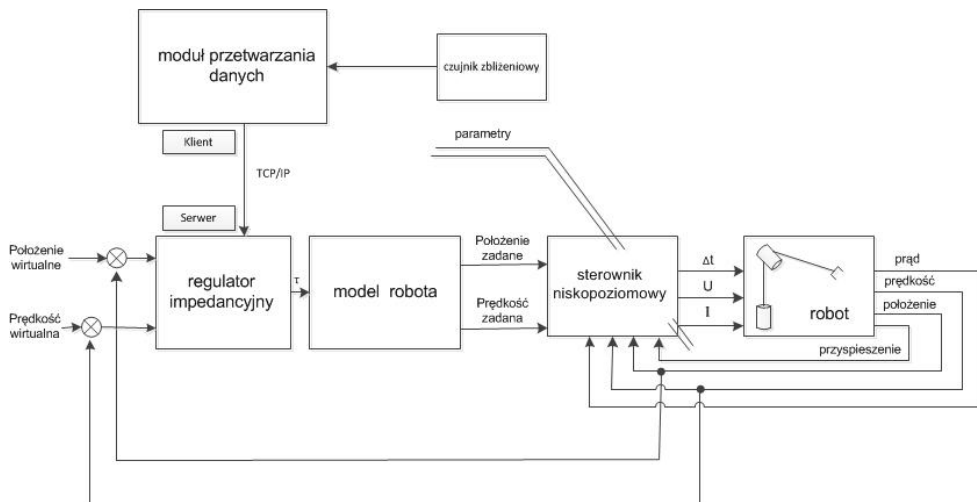
W przypadku, gdy prędkość ruchu jest duża należałoby wykryć potencjalną kolizję ze sztywnym otoczeniem odpowiednio wcześniej. Można byłoby do tego celu wykorzystać np. czujniki zbliżeniowe, radary lub systemy wizyjne. Przykład rozwiązania tego typu został opisany w artykule [9]. Autorzy wykorzystali informacje z systemu wizyjnego do wpływania na podatność manipulatora. Podatność była przełączana skokowo po zbliżeniu się robota do obiektu na założoną odległość.

2. REGULATOR IMPEDANCYJNY

Pożądanne właściwości interakcyjne manipulatora są często odmienne i zdeterminowane są właściwościami otoczenia robota i celem sterowania. Zazwyczaj zakłada się, iż w przypadku, gdy robot np. zbliża się do człowieka to podatność łańcucha kinematycznego powinna rosnać. Podobnie jest w sytuacji, gdy system wykrył niepożądany obiekt znajdujący się na zaplanowanej ścieżce ruchu. W związku z tym działanie zaprojektowanego systemu zostało dopasowane do tego schematu. Gdy czujnik wykrywa zbliżenie się do obiektu, regulator zmienia wartość impedancji manipulatora, w zależności od odległości obiektu od ramienia robota.

Regulator impedancyjny dla elektrycznego zespołu napędowego robota

Opisywany system składa się z silnika bezszczotkowego prądu stałego (BLDC), który napędza ogniwo robota, indukcyjnego czujnika zbliżeniowego wraz ze sterownikiem niskopoziomowym oraz systemu komputerowego, który przetwarza dane i steruje silnikiem. W skład systemu komputerowego wchodzi dwa programy. Jeden z nich przechwytuje i przetwarza dane ze sterownika niskopoziomowego, natomiast drugi steruje silnikiem (Rys. 1).



Rys. 1. Ogólny schemat blokowy wykonanego systemu

2.1 Sterownik impedancyjny

Opis dynamiki manipulatora przy występowaniu kontaktu z otoczeniem można przedstawić następująco

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + h(q) + f(q, \dot{q}) = \tau - F_{ext} \quad (1)$$

gdzie B jest macierzą inercji, C – wektorem sprzężeń prędkościowych i sił Coriolisa, h - wektorem sił grawitacyjnych, f - wektorem sił tarcia, τ - to wektor sił i momentów sterujących manipulatorem, F_{ext} - wektor sił zewnętrznych.

Wektor sił zewnętrznych działający na manipulator, przy założeniu, że właściwości środowiska mogą być przybliżone przy pomocy układu masa-sprężyna-tłumik, można wyrazić w postaci:

$$-F_{ext} = M(\ddot{q} - \ddot{q}_d) + B_d(\dot{q} - \dot{q}_d) + K_p(q - q_d) \quad (2)$$

gdzie M – jest inercją środowiska, B_d - oznacza tłumienie, natomiast K_p to sztywność.

Przekształcając równanie (2) w celu wyznaczenia przyspieszenia złączowego, otrzymujemy:

$$\ddot{q} = \ddot{q}_d - M^{-1}(F_{ext} + B_d(\dot{q} - \dot{q}_d) + K_p(q - q_d)) \quad (3)$$

podstawiając (3) do równania (1) otrzymujemy:

$$B(q)(\ddot{q}_d - M^{-1}(F_{ext} + B_d(\dot{q} - \dot{q}_d) + K_p(q - q_d))) + C(q, \dot{q})\dot{q} + h(q) + f(q, \dot{q}) + F_{ext} = \tau \quad (4)$$

Biorąc pod uwagę dynamikę rozważanego manipulatora (masa inercyjna z przymocowanym doń prętem) uzyskuje się ostatecznie:

$$\left(\frac{1}{2}m_2l^2 + \frac{1}{2}m_1R^2\right)(\ddot{q}_d - M^{-1}(F_{ext} + B_d(\dot{q} - \dot{q}_d) + K_p(q - q_d))) + \frac{1}{2}m_2gl\cos(q) + f(q, \dot{q}) + F_{ext} = \tau \quad (5)$$

Równanie w tej postaci można użyć do sterowania metodą wyznaczonego momentu. Z równania (5), wynika, iż reakcja konwencjonalnego sterownika impedancyjnego zależy od wartości przyspieszenia, prędkości oraz położenia, jak również od wartości siły oraz nastaw regulatora (M , K_p oraz B_d), a także parametrów dynamicznych obiektu (B , C , h , f).

Przedstawione równanie spełnia jednak swoją funkcję jedynie w sytuacji, gdy manipulator aktywnie oddziałuje z otoczeniem. Z uwagi na to, iż siła może być jedynie rejestrowana podczas kontaktu z otoczeniem, a w rozważanym przypadku nie musi do niego dojść, równanie na siłę zmodyfikowano następująco $F_{ext} = \mu a$, gdzie a jest położeniem estymowanym na podstawie informacji uzyskiwanej od czujnika położenia, natomiast μ [N/m] jest współczynnikiem proporcjonalności wyznaczonym eksperymentalnie. Z równania tego wynika, że reakcja manipulatora, zamiast zależeć od siły będzie teraz związana z odległością manipulatora od obiektu. Współczynnik proporcjonalności został tak dobrany, aby zapewniać właściwą reakcję przy zbliżaniu się ramienia do zewnętrznego obiektu.

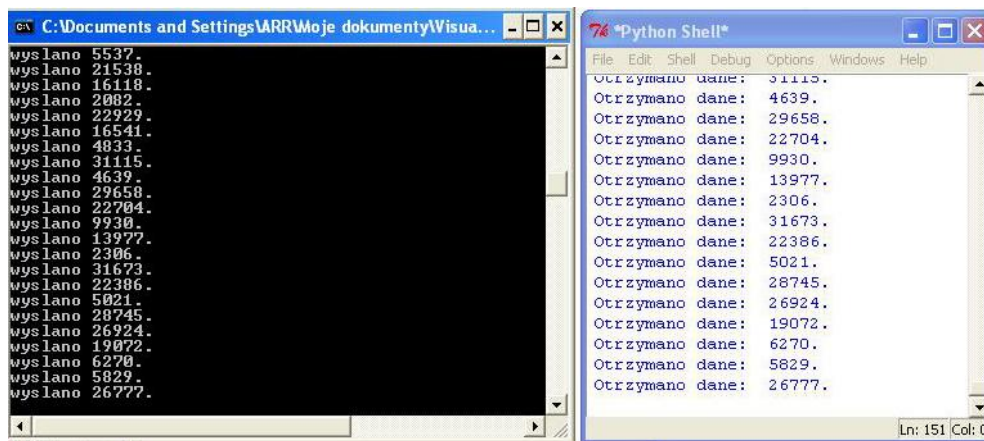
2.2 Implementacja sprzętowo-programowa

Założeniem projektu było takie zaprojektowanie systemu, które umożliwiałoby sprawną implementację sterowania impedancyjnego przy użyciu różnego rodzaju sprzętu fizycznego. Problemy z integracją różnych systemów zdarzają się często. W rozważanym przypadku silnik elektryczny BLDC był sterowany w czasie rzeczywistym przy pomocy interpretera *Python*, natomiast karty pomiarowe, jak również sterowniki są dedykowane do współpracy ze skompilowanymi programami typu C lub innymi kompilatorami. W związku z tym należało stworzyć oprogramowanie, które zapewni poprawną pracę sterownika.

Problem integracji programów pojawia się bardzo często podczas tworzenia bardziej złożonych systemów. Istnieje kilka sposobów na połączenie różnych programów na wspólnej platformie systemowej typu *Windows* lub *Linux*. Jednym z powszechnie stosowanych sposobów jest implementacja multiwątkowości, uruchomienie kilku programów w tym samym czasie i wymiana danych za pomocą wspólnego pliku typu *swap file*. Wspólny zasób może w tym przypadku znajdować

Regulator impedancyjny dla elektrycznego zespołu napędowego robota

się w pamięci operacyjnej lub na twardym dysku. Ten rodzaj współpracy dwóch programów powoduje jednak problemy z poprawną implementacją na różnych systemach operacyjnych. Poza tym założeniem projektu było, aby programy komputerowe były łatwo ze sobą integrowane. W związku z tym posłużono się nieco odmienną techniką polegającą na połączeniu dwóch programów za pomocą protokołu TCP/IP. Przy czym jeden program jest serwerem danych, a drugi klientem. Oznaczenie serwer-klient jest w przypadku tego systemu dowolne, ponieważ zarówno serwer może wysyłać, jak i odbierać dane, podobnie klient. W zastosowanym rozwiązaniu serwerem był program napisany w *Pythonie*, sterujący silnikiem, natomiast klientem – program stworzony w C++, przetwarzający dane z czujnika zbliżeniowego (Rys. 2).



```
C:\Documents and Settings\ARR\Moje dokumenty\Visua...
wyslano 5537.
wyslano 21538.
wyslano 16118.
wyslano 2082.
wyslano 22929.
wyslano 16541.
wyslano 4833.
wyslano 31115.
wyslano 4639.
wyslano 29658.
wyslano 22704.
wyslano 9930.
wyslano 13977.
wyslano 2306.
wyslano 31673.
wyslano 22386.
wyslano 5021.
wyslano 28745.
wyslano 26924.
wyslano 19072.
wyslano 6270.
wyslano 5829.
wyslano 26777.

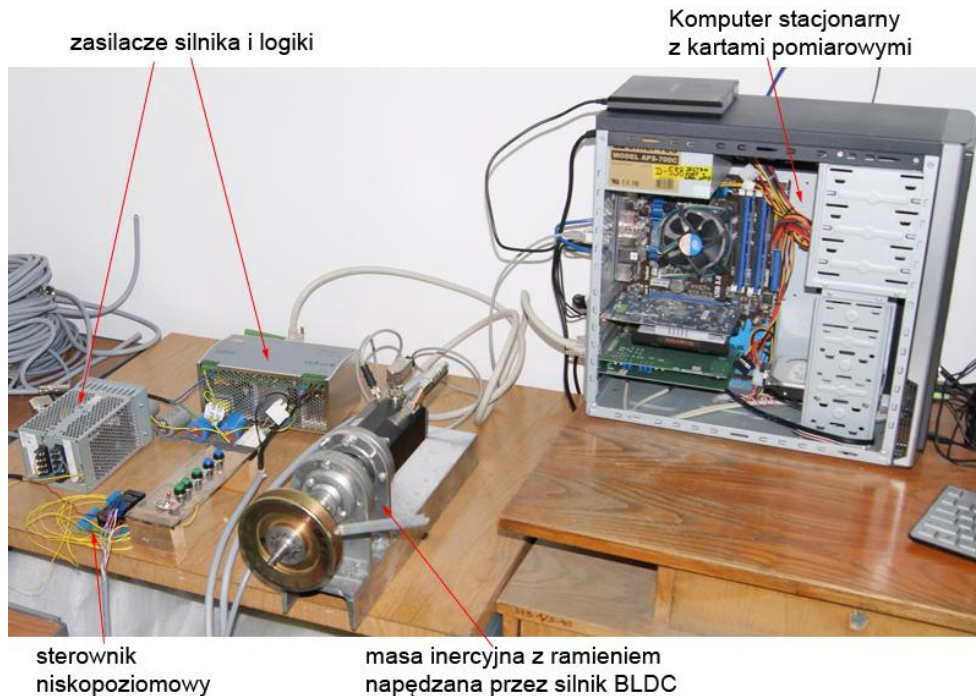
Python Shell
Otrzymano dane: 31115.
Otrzymano dane: 4639.
Otrzymano dane: 29658.
Otrzymano dane: 22704.
Otrzymano dane: 9930.
Otrzymano dane: 13977.
Otrzymano dane: 2306.
Otrzymano dane: 31673.
Otrzymano dane: 22386.
Otrzymano dane: 5021.
Otrzymano dane: 28745.
Otrzymano dane: 26924.
Otrzymano dane: 19072.
Otrzymano dane: 6270.
Otrzymano dane: 5829.
Otrzymano dane: 26777.
```

Rys. 2. Przykład komunikacji pomiędzy skompilowanym programem napisanym w środowisku C++, a interpreterem Python

Eksperymenty były przeprowadzane z użyciem kilku rodzajów kart pomiarowych, w celu wykazania uniwersalności przyjętego rozwiązania. Z powodzeniem zastosowano m.in. karty pomiarowe firmy *Advantech (USB-4704, PCI-1710)*, jak również własne sterowniki, oparte o popularne mikrokontrolery *ATmega8* firmy *Atmel*. Sterowniki komunikowały się z komputerem za pośrednictwem protokołu *USB-UART*.

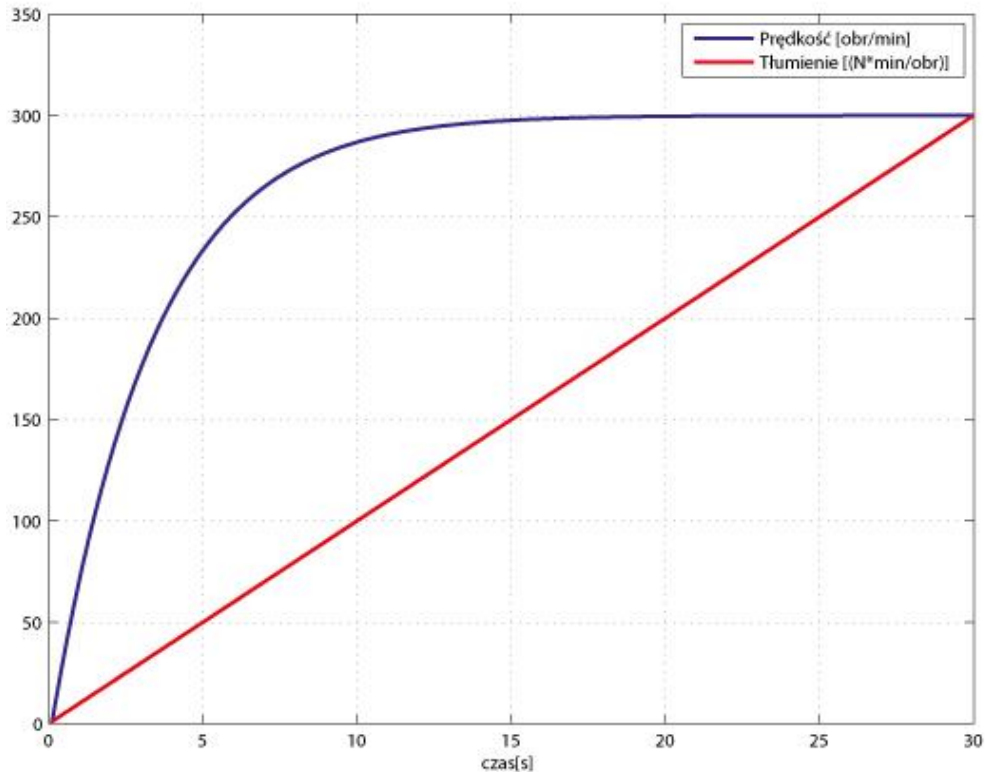
3. EKSPERYMENTY I WNIOSKI

Końcowe eksperymenty zostały przeprowadzone na rzeczywistym modelu złącza o jednym stopniu swobody (Rys. 3).



Rys. 3. Zdjęcie stanowiska eksperymentalnego

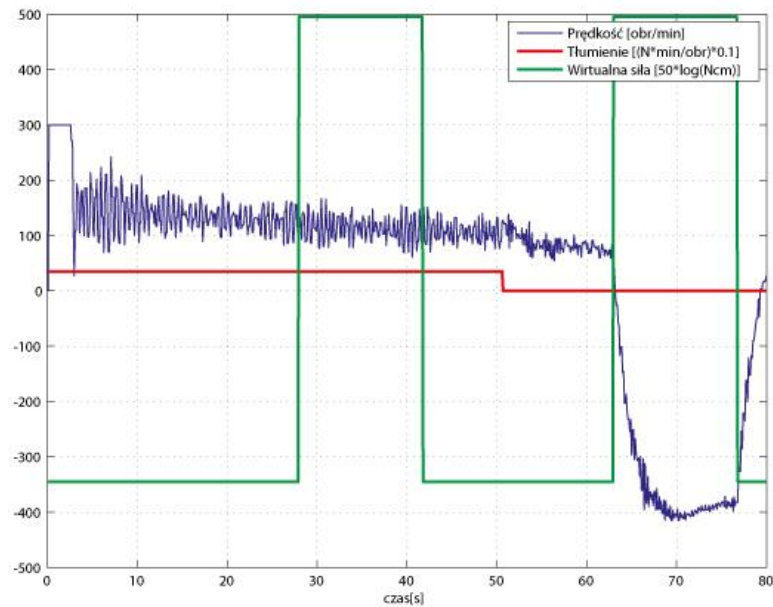
W celu wyznaczenia optymalnych parametrów regulatora wykonano kilka eksperymentów, które pokazały w jaki sposób zmiany współczynników sztywności oraz tłumienia wpływają na właściwości układu. Gdy sztywność manipulatora spada, nie odtwarza on już zadanej trajektorii w takim stopniu, jak w przypadku gdy jego sztywność jest duża. Ta reguła została użyta do wyznaczenia takich wartości parametrów sztywności i tłumienia, które powodują pożądane zmiany w działaniu robota. Eksperymenty te polegały na zmianach wartości parametrów sztywności i tłumienia, w przypadku gdy silnik nie poruszał się ($v = 0$) (Rys. 4).



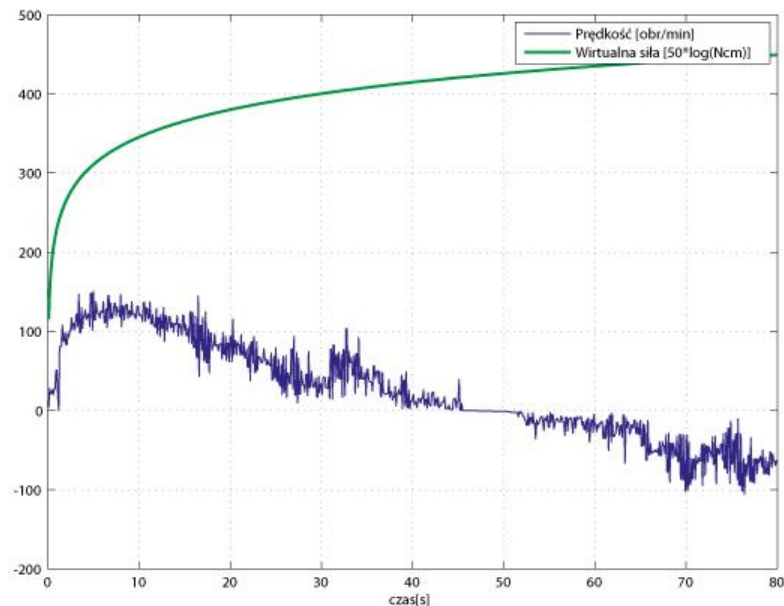
Rys. 4. Wykres zadanej, wirtualnej prędkości manipulatora, przy zmianie współczynnika tłumienia. Wartość wirtualnej prędkości wynosiła 300 obr/min. W trakcie eksperymentu silnik obracał się

Po poznaniu właściwości układu i wyznaczeniu pożądanych nastaw sterownika, przystąpiono do przeprowadzanie końcowych eksperymentów. Jeden z nich polegał na skokowej zmianie wirtualnej siły działającej na manipulator, czyli odległości pomiędzy obiektem a czujnikiem zbliżeniowym, przy jednoczesnej skokowej zmianie wartości tłumienia (Rys. 5). Z wykresu można wywnioskować, że duża wartość tłumienia powoduje, że układ jest na tyle sztywny, iż nie reaguje na działającą siłę. Jeżeli tłumienie jest niewielkie (znajduje się w części charakterystyki wznoszącej, przedstawionej na Rys. 4) sterownik reaguje, powodując zmianę kierunku obrotu silnika. Jest to pożądana reakcja manipulatora.

Drugi eksperyment polegał na zwiększaniu podatności manipulatora w miarę, gdy obiekt znajdował się coraz bliżej robota. Z wykresu wynika również, iż w przypadku gdy wartość wirtualnej siły mieści się w przedziale od 0,18 do 0,19Nm (przedział czasu od 45 do 47,5s) silnik zatrzymuje się. W niektórych sytuacjach jest to najbardziej optymalna reakcja. Po przekroczeniu tego przedziału silnik zaczyna wolno obracać się w przeciwnym kierunku (Rys. 6). Jeżeli obiekt oddaliłby się od silnika, prędkość obrotowa powróciłaby do swojej pierwotnej wartości.



Rys. 5. Charakterystyka zmiany prędkości manipulatora przy skokowych zmianach wirtualnej siły (położenia od czujnika zbliżeniowego) oraz zmianach wartości parametru tłumienia kontrolera. Wartość wirtualnej prędkości wynosiła 300 obr/min.



Rys. 6. Charakterystyka zmiany prędkości przy zbliżaniu się obiektu do czujnika. Po zbliżeniu się obiektu do czujnika na odległość mniejszą od 0.5cm, silnik zmienia kierunek obrotu

4. PRZYSZŁE PRACE BADAWCZE

W trakcie prac eksperymentalnych okazało się, że poprawny dobór parametrów rzeczywistego kontrolera jest skomplikowany. Dobór nastaw jest związany m.in. z właściwościami metod numerycznych stosowanymi do rozwiązywania równań różniczkowych, szybkością przetwarzania danych przez komputer, jak również z odpowiednim doбором współczynników skalujących informacji uzyskiwanych od czujników położenia i prędkości. Jest to prawdopodobnie jedna z przyczyn, dlaczego regulatory impedancyjne/admitancyjne nie są jeszcze stosowane w praktyce. Najbliższe prace badawcze będą w związku z tym związane z utworzeniem adaptacyjnego modelu, najprawdopodobniej opartego na metodach sztucznej inteligencji, przy pomocy którego będzie można skutecznie dobrać właściwe nastawy regulatora, w zależności od pożądanego zachowania się robota. Kolejne zaplanowane prace będą dotyczyły także integracji sterownika impedancyjnego do sterowania robotów o większej ilości stopni swobody.

5. INFORMACJE DODATKOWE

Opisany w artykule projekt został zrealizowany w ramach grantu promotorskiego o numerze N N514 469339 pt. „*Optymalizacja konstrukcji i sterowanie robota do rehabilitacji kończyny górnej z uwzględnieniem biologicznego sprzężenia zwrotnego*” za fundusze z tego grantu, jak również z funduszy Instytutu Automatyki Politechniki Łódzkiej przeznaczonych na naukę.

LITERATURA

- [1] F. Caccavale, B. Siciliano, *Six-DOF Impedance Control Based on Angle/Axis Representations*, IEEE Transactions on robotics automation, v. 15, no. 2, 1999.
- [2] G. Granosik, E. Jezierski, M. Kaczmarek, *Modelling, simulation and control of pneumatic jumping robot*, In: Proc. European Robotics Symposium 2008. Springer Tracts in Advanced Robotics, Berlin, Springer 2008, s. 155-164.
- [3] N. Hogan, *Impedance control: An approach to manipulation, Part I, II, III*, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control, 1985, Vol. 107, s. 1–23.
- [4] E. Jezierski, *Od sterowania pozycyjnego robotów do sterowania impedancyjnego*. W pracy zbiorowej pod redakcją Krzysztofa Tchonia „Postępy robotyki – sterowanie, percepcja, komunikacja. WKiŁ, Warszawa 2006, s. 13 - 36.

- [5] E. Jezierski, *On electrical analogues of mechanical systems and their using in analysis of robot dynamics*, In Kozłowski K. R. (Ed.) *Robot Motion and Control – Recent Developments*, Berlin: Springer, Berlin 2006, s. 391-404.
- [6] E. Jezierski, *Dynamika robotów*, WNT, Warszawa, 2006.
- [7] C. Ott, A. Albu-Schäffer, A. Kugi, G. Hirzinger, *On the Passivity-Based Impedance Control of Flexible Joint Robots*, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 2, 2008.
- [8] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, *Robotics – modelling, planning and control*, Springer, 2009.
- [9] T. Twuji, H. Akamatsu, M. Hatagi and M. Kaneko, *Vision-Based Impedance Control for Robot Manipulators*, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1997.
- [10] T. Winiarski, C. Zieliński, *Podstawy sterowania siłowego w robotach*, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 6/2008, s. 5-10.

IMPEDANCE CONTROLLER FOR ELECTRICAL DRIVE OF A ROBOT

This article presents a proposal of impedance controller, which is able to influence the compliance of a robot based on information obtained from a low-level controller, about robot interaction with the environment. The proposed system consists of a low-level controller with proximity sensor, based on which mechanical impedance is adjusted. The intention of the creators was to develop a universal impedance regulator in the sense of hardware and software layers. Because of TCP/IP architecture, the designed regulator can be easily adapted to different robot controllers. Experiments were conducted on a real 1-DOF manipulator driven by BLDC motor.