

prof. dr hab. inż. Andrzej Milecki
Politechnika Poznańska
mgr Marcin Chciuk
mgr inż. Paweł Bachman
Uniwersytet Zielonogórski

ZASTOSOWANIE LINIOWEGO DŻOJSTIKA DOTYKOWEGO DO STEROWANIA NAPĘDEM ELEKTROHYDRAULICZNYM

W artykule opisano układ sterowania napędem elektrohydraulicznym z siłowym sprzężeniem zwrotnym. Przedstawiono budowę i wyniki badań dotykowego dżojstika liniowego z cieczą magnetoreologiczną. Artykuł zawiera także wyniki badań doświadczalnych procesu sterowania napędem elektrohydraulicznym za pomocą dżojstika dotykowego z cieczą magnetoreologiczną przy pomocy trzech różnych algorytmów sterowania.

APPLICATION OF LINEAR HAPTIC JOYSTICK IN CONTROL OF ELECTROHYDRAULIC DRIVE

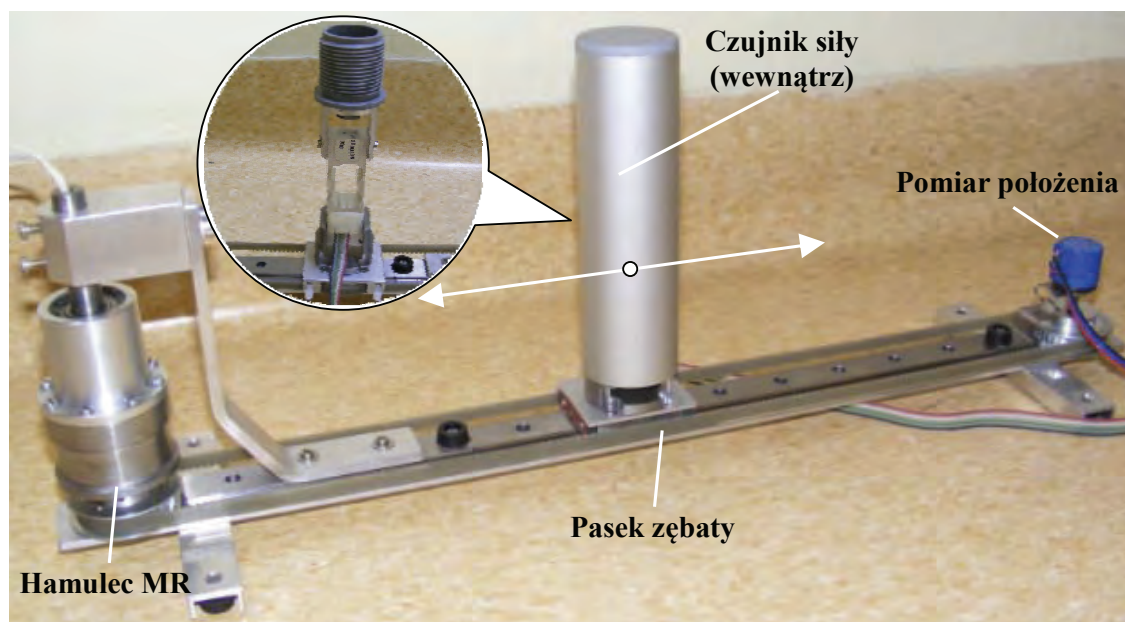
The article describes control system of electrohydraulic drive with force feedback. The structure of linear haptic joystick and their research basic results are presented. The article encompasses also investigation results of three control methods of electrohydraulic servo drive made by haptic joystick with magnetorheological brake.

1. WSTĘP

Podczas sterowania ciężkim sprzętem budowlanym takim jak np. koparki często zdarza się, że na drodze ruchu ich elementów pojawiają się różnego rodzaju przeszkody, które mogą stać się przyczyną awarii. Dlatego te maszyny te powinny dysponować dodatkowymi zabezpieczeniami, aby nie doprowadzić do powstania zniszczeń [7]. Problem związany z występowaniem przeszkód na drodze ruchu elementu wykonawczego maszyn budowlanych występują przy ręcznym sterowaniu manipulatorami za pomocą różnorodnych dźwigni, pedałów albo dżojstików, kiedy widoczność przestrzeni roboczej jest ograniczona. Operator przekazuje zwykle do urządzenia wykonawczego sygnał określający siłę albo prędkość ruchu. W przypadku ograniczonej widoczności operator nie uzyskuje żadnej informacji o kontakcie części roboczej urządzenia z przeszkodą. Problem ten może rozwiązać zastosowanie dżojstików z tzw. siłowym sprzężeniem zwrotnym, w których stosowane są elementy generujące siłę przeciwdziałającą sile działania operatora. Są to tzw. urządzenia dotykowe (ang. *haptic device*), które służą do przekazywania bodźców dotykowych ze sterowanego obiektu do użytkownika. Bodźcem tym zazwyczaj jest siła, z jaką urządzenie wykonawcze oddziałuje na przeszkodę. Podobne badania były już prowadzone dla dżojstika wahadłowego, a ich rezultaty przedstawiono w publikacjach [2, 3, 4, 5, 6, 8].

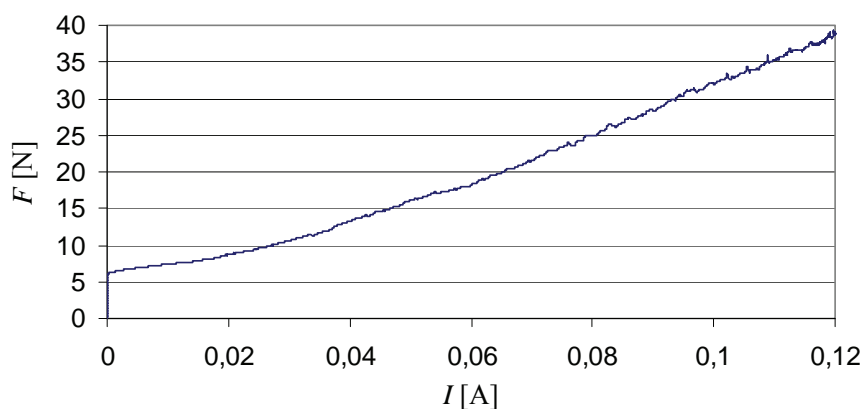
2. BUDOWA DŻOJSTIKA LINIOWEGO

Do opisywanych w tym artykule badań zastosowano nową konstrukcję dźwojstika przesuwne (suwakowego). Został on zbudowany na bazie prowadnicy liniowej, po której poruszał się suwak z dźwignią. Był on połączony z paskiem zębatym współpracującym z dwoma kołami zamocowanymi na końcach prowadnicy. Z jednym z nich połączono potencjometr przeznaczony do pomiaru położenia, a z drugim obrotowy hamulec magnetoreologiczny [1]. W rękojeści dźwojstika został zamontowany czujnik siły. Widok omawianego dźwojstika przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Widok dźwojstika liniowego

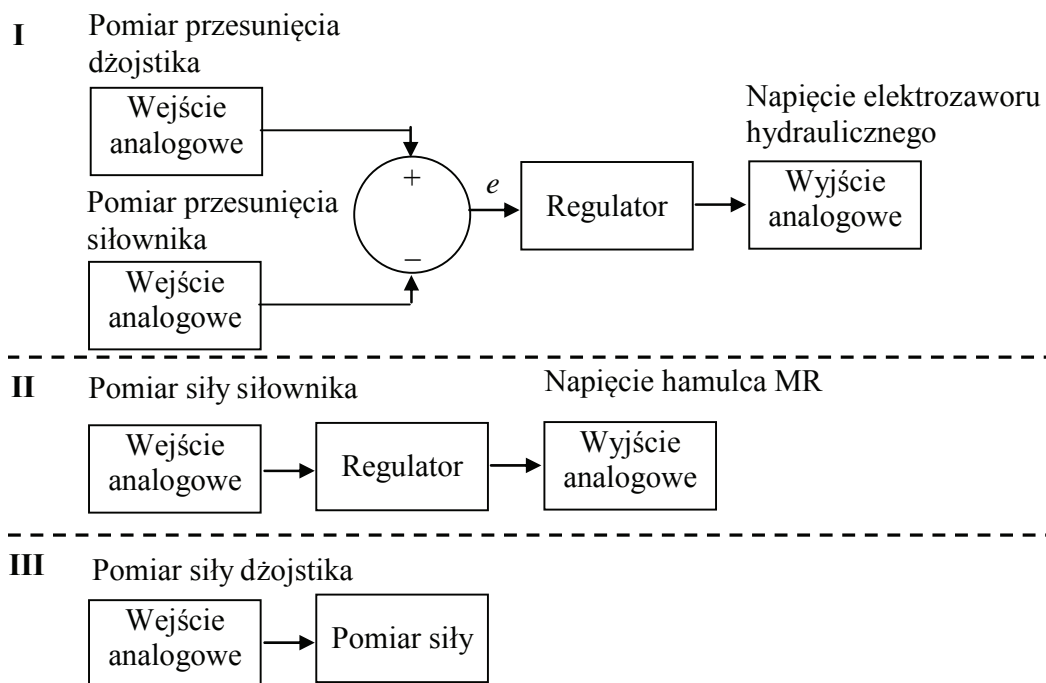
Na rys. 2 pokazano charakterystykę statyczną dźwojstika. Przedstawia ona zależność siły na rękojeści dźwojstika od prądu płynącego przez cewkę hamulca magnetoreologicznego.



Rys. 2. Zależność siły na dźwojstiku od prądu hamulca MR

3. UKŁAD STEROWANIA

Układ sterowania został wykonany przy wykorzystaniu pakietu MATLAB/Simulink. Składał się on z dwóch głównych torów sterujących oraz trzeciego – pomiarowego (rys. 3).



Rys. 3. Schemat poglądowy układu sterująco-pomiarowego

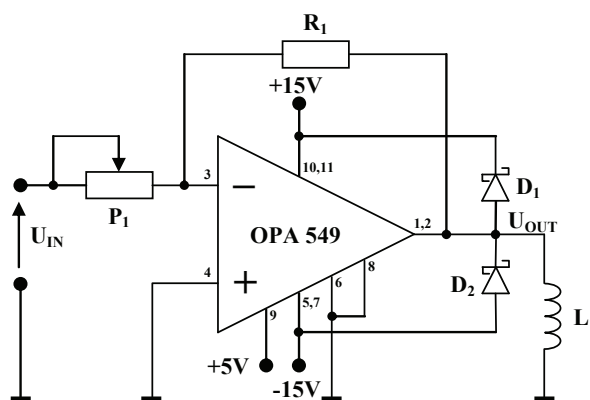
Tor I odpowiada za sterowanie położeniem siłownika. Napięcia z potencjometru położenia dźwostka (0–5 V) oraz z elektroniki indukcyjnego czujnika położenia siłownika (0–10 V) podawane są na wejścia analogowe karty. Sygnały te po odpowiednim przeliczeniu trafiają na wejścia sumatora, w którym wyznacza się uchyb regulacji e . Podawany jest on dalej na regulator, który ustala sygnał podawany na wyjście analogowe jako napięcie sterujące zaworem.

W torze II odbywa się sterowanie hamulcem MR. Siła mierzona na siłowniku poprzez układy wzmacniaczy trafia na wejście analogowe karty komputera, z którego po odpowiednim przeliczeniu (odjęciu wartości odpowiadającej oporom własnym hamulca MR występującym przy napięciu cewki równemu 0 V) trafia na wejście regulator, z którego wychodzi sygnał na wyjście analogowe karty, jako napięcie cewki hamulca MR dźwostka.

Tor III służy jedynie do pomiaru siły na dźwostku. W badanym układzie sygnał siły z dźwostka podawany jest na wejście analogowe karty, a następnie przeliczany na odpowiednie jednostki (N). Wszystkie sygnały występujące w układzie tzn. położenie dźwostka i siłownika, siła na dźwostku i siłowniku, napięcie zaworu oraz prąd hamulca MR dźwostka, rejestrowane są w przestrzeni roboczej programu MATLAB, a następnie eksportowane do plików Excela.

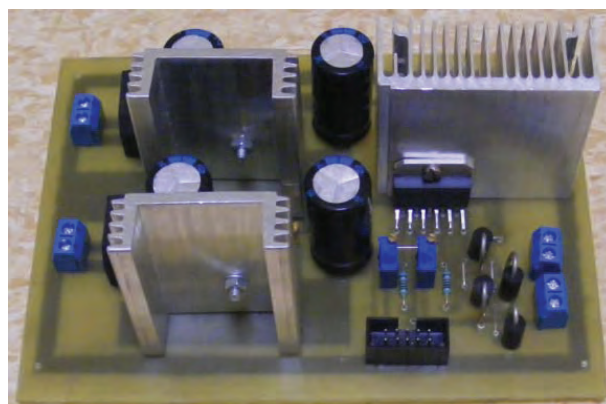
4. ELEKTRONICZNE UKŁADY POŚREDNICZĄCE

Aby podłączyć dźwostek do karty wejść/wyjść komputera należało wykonać elektroniczne układy pośredniczące. Do zasilania hamulca MR zastosowano wzmacniacz operacyjny mocy oparty na układzie OPA549. Schemat tego wzmacniacza przedstawiony jest na rys. 4, a widok gotowej płytki na rys. 5.



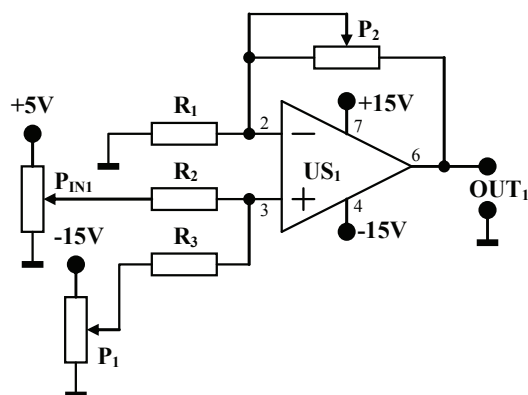
$R_1=10k\Omega$; $P_1=100k\Omega$; $D_1+D_2=1N5822$; $L=$ Hamulec MR

Rys. 4. Schemat ideowy wzmacniacza wysokoprądowego



Rys. 5. Widok płytki wzmacniacza wysoprądowego

Układ pomiaru wychylenia dźwójstika zbudowany jest w oparciu o wzmacniacz operacyjny OP27. Sygnał P_{IN1} jest to sygnał położenia potencjometru zamontowanego w dźwójstiku, informujący o jego położeniu. Aby uniknąć konieczności precyzyjnego mechanicznego ustawiania potencjometru w dźwójstiku zastosowano układ sumatora na wejściu nieodwracającym wzmacniacza operacyjnego. Przy pomiarze potencjometru podłączonego do ujemnego zasilania można doregulować wartość zera dla skrajnego zerowego położenia dźwójstika. Potencjometrem zamontowanym w torze ujemnego sprzężenia zwrotnego można wyregulować napięcie dla maksymalnego wychylenia. Schemat omawianego układu pokazany jest na rys. 6.

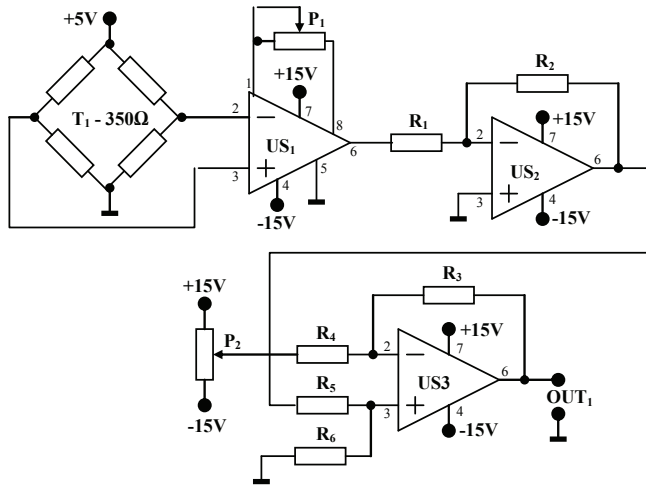


$R_1+R_3=10k\Omega$; $P_1+P_2=100k\Omega$; $US_1=OP27$;

Rys. 6. Schemat ideowy pomiaru wychylenia dźwójstika

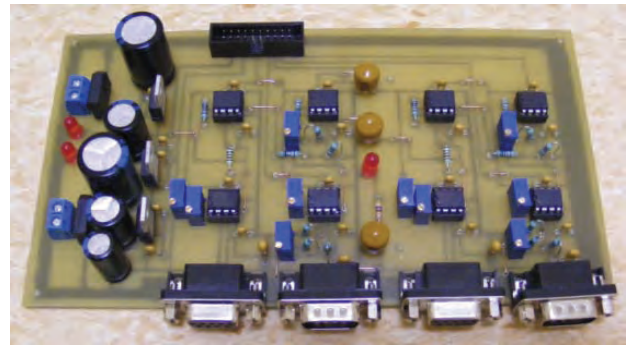
pracującego w układzie różnicowym, w którym przy pomiarze potencjometru P_2 można zerować sygnał siły. Schemat tego układu przedstawiony jest na rys. 7, a widok gotowej płytki pomiaru siły i wychylenia na rys. 8.

Układ pomiaru siły na dźwójstiku zbudowany jest na bazie pomiarowego wzmacniacza operacyjnego INA128 (US_1). W dźwigni dźwójstika zastosowano mostek tensometryczny typu PW 6KRC-3 firmy HBM. W wzmacniacz INA128 wzmacnia kilkadziesiąt razy sygnał z mostka. Wzmocnienie ustala się za pomocą potencjometru P_1 . Następnie sygnał ten wzmacniany jest na kolejnym wzmacniaczu operacyjnym pracującym w układzie odwracającym fazę zbudowanym na niskoszumowym układzie OP27 (US_2). Z wyjścia tego wzmacniacza sygnał trafia do wzmacniacza (US_3)



US₁=INA128; US₂÷US₃=OP27; T₁=PW6KRC-3
 R₁=1kΩ; R₂÷R₆=10kΩ; P₁÷P₂=10kΩ;

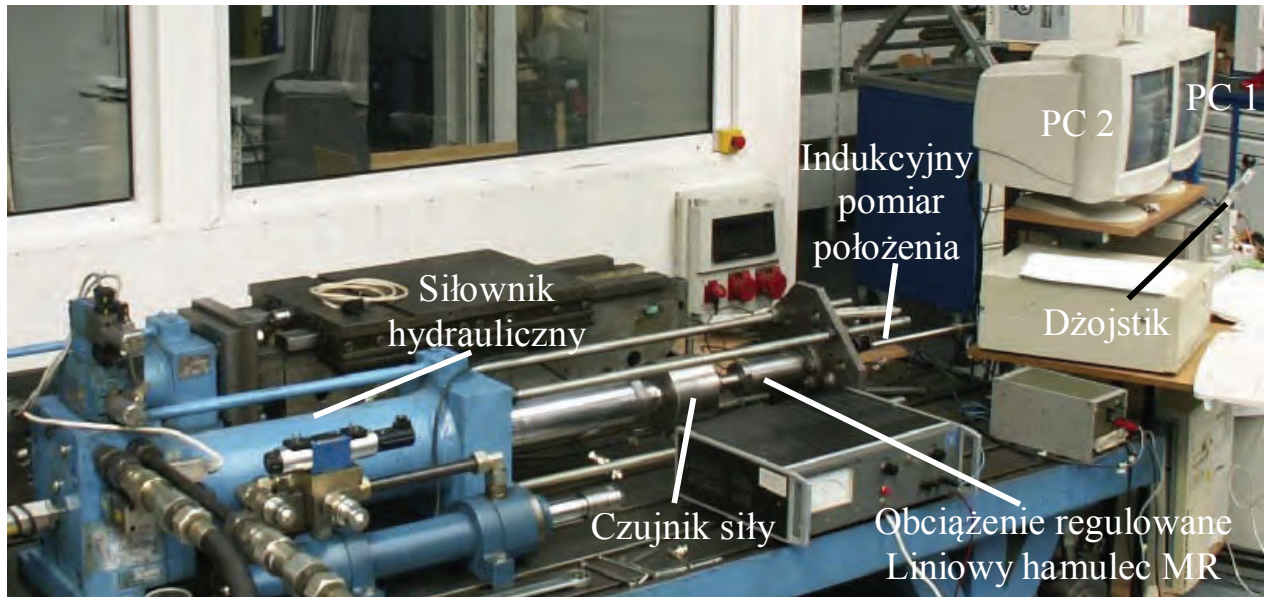
Rys. 7. Schemat ideowy pomiaru siły



Rys. 8. Widok płytki pomiaru siły i wychylenia

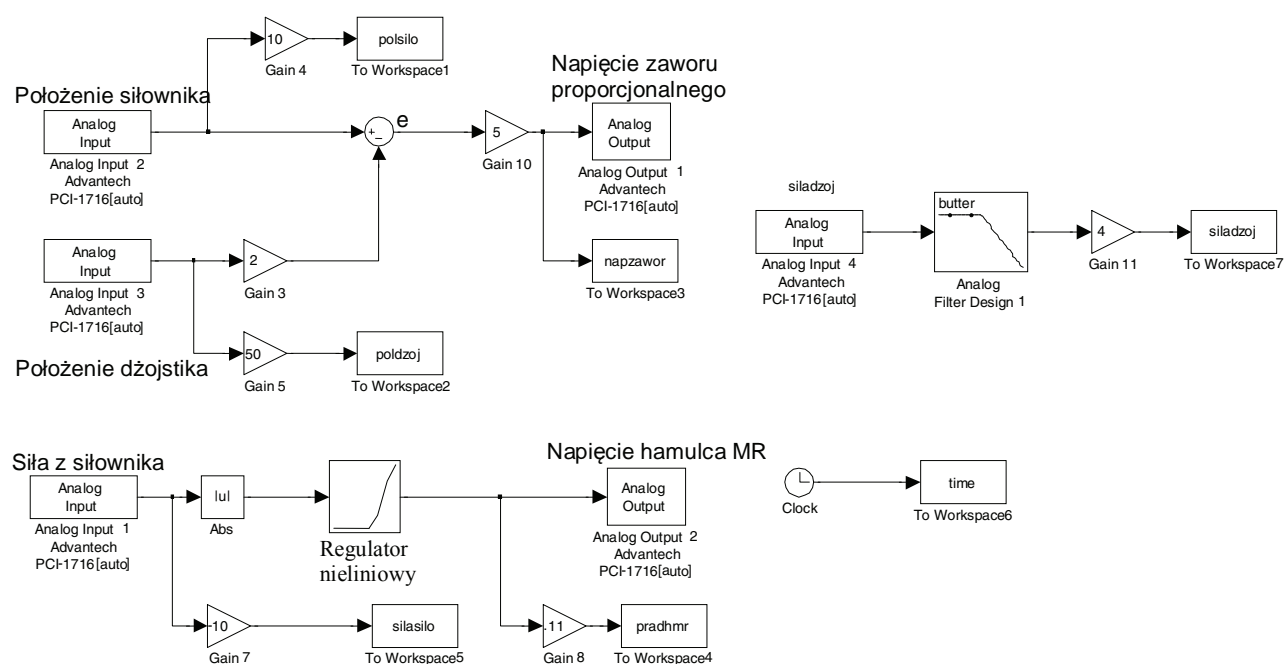
5. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Pomiary zostały wykonane na stanowisku hydraulicznym wyposażonym w siłownik z zaworem proporcjonalnym. Jako obciążenie siłownika zastosowano liniowy hamulec magnetoreologiczny, którego siłę oporu ruchu można było sterować z niezależnego źródła. Pomiędzy tłokiem siłownika i hamulcem MR zamontowano czujnik siły. Widok stanowiska pokazany jest na rys. 9.



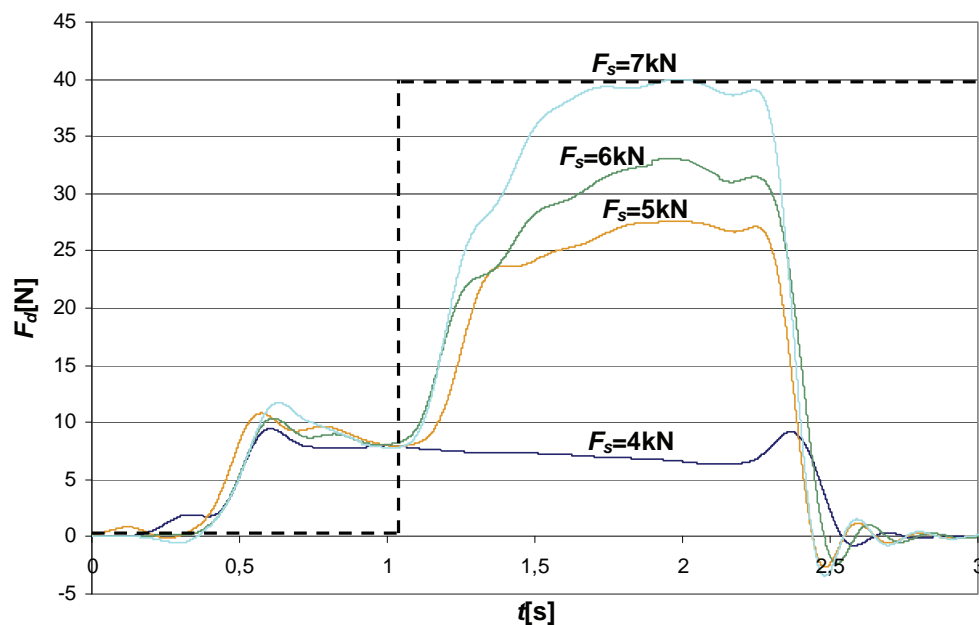
Rys. 9. Widok stanowiska pomiarowego

Pierwszy algorytm sterowania oparty był o regulator linearyzujący układ magnetoreologiczny hamulec obciążający-dźwójstik. Na podstawie charakterystyk dźwójstika i hamulca MR wyznaczono nieliniową funkcję, która pomijała opory własne obciążenia oraz rozkładała w sposób liniowy przyrosty siły na dźwójstiku w zależności od sił uzyskiwanych na siłowniku. Układ sterowania wykonany w programie Simulink przedstawiony jest na rys. 10.

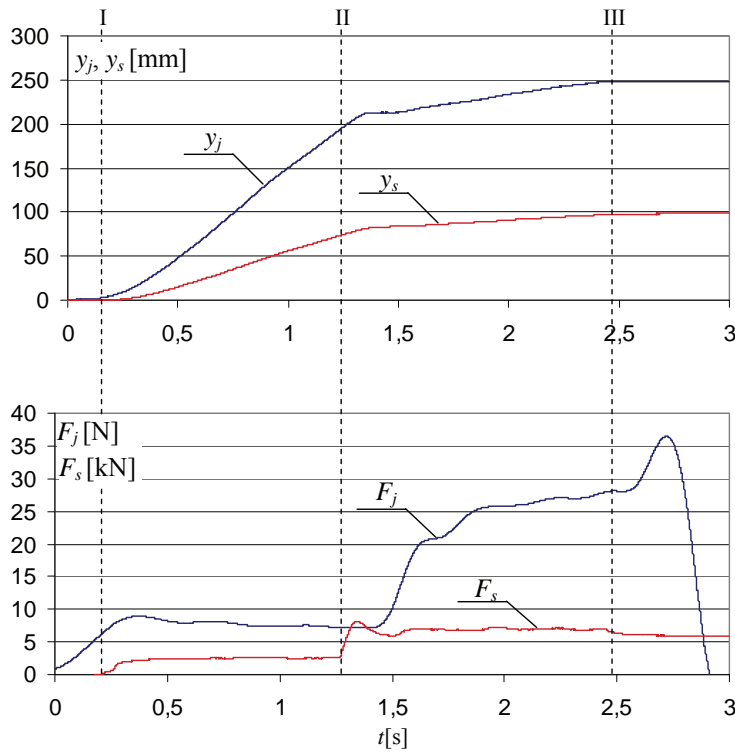


Rys. 10. Układ sterowania wykonany w programie Simulink

Na rys. 11 przedstawiona jest charakterystyka siły na dźwojstiku F_d pojawiająca się w odpowiedzi na skok jednostkowej siły na siłowniku F_s .


 Rys. 11. Zlinearyzowana charakterystyka $F_d=f(t)$ dla różnych sił obciążenia

Na rys. 12 przedstawiono przebiegi siły i położenia dźwojstika oraz siłownika przy obciążeniu 5 kN.



Rys. 12. Przebiegi siły i położenia dźwostika i siłownika przy obciążeniu 5kN

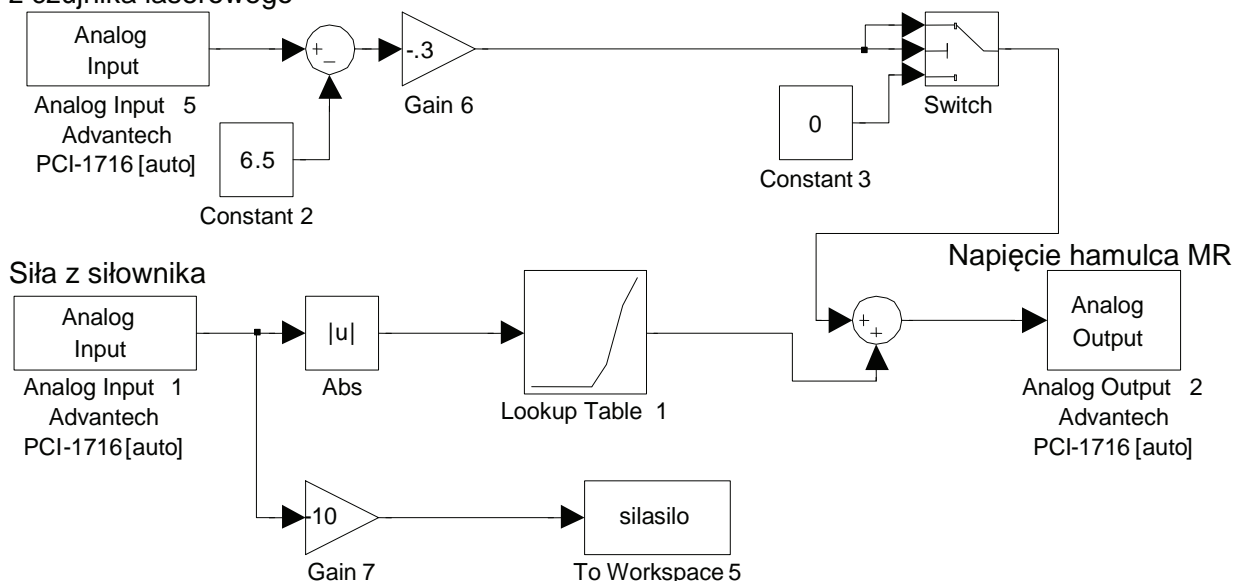
(F_j – siła na dźwostiku; y_j – położenie dźwostika;
 F_s – siła na siłowniku; y_s – położenie siłownika)

Na rys. 12 pionowa linia oznaczona „I” pokazuje początek ruchu siłownika. W miejscu (chwili czasowej) oznaczonym linią „II” pojawiło się obciążenie zewnętrzne (załączenie napięcia na liniowy hamulec MR). Linią „III” oznaczono moment osiągnięcia pozycji skrajnej przez dźwostik.

W następnym algorytmie sterowania założono, że operator powinien dostać informację o zbliżaniu się do przeszkody jeszcze przed uderzeniem w nią. W tym celu na końcu tłoka zamontowano laserowy czujnik odległości, którego zadaniem był pomiar odległości od przeszkody. Sygnał z tego czujnika wprowadzono do komputera poprzez dodatkowe wejście

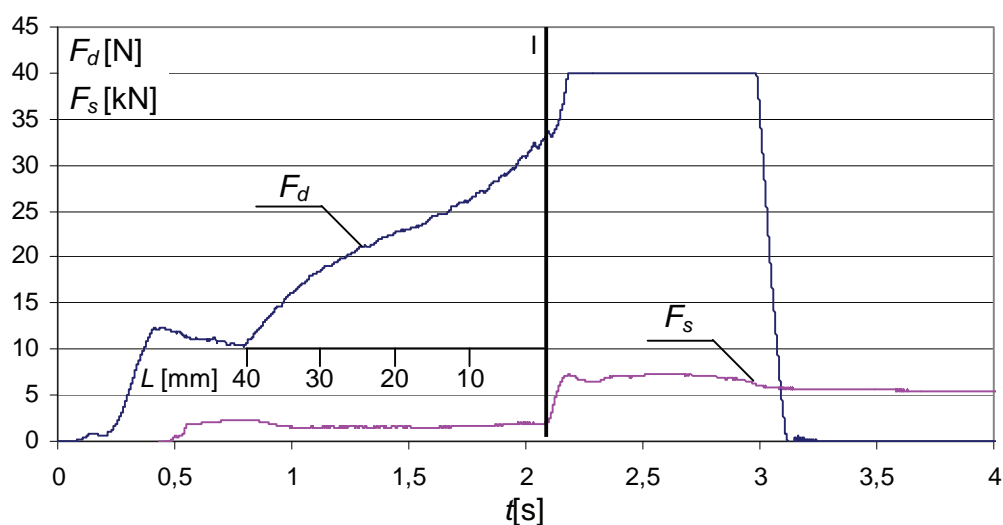
analogowe i po odpowiednim przeliczeniu zsumowano z sygnałem napięcia wychodzącym na hamulec MR dźwostika (rys. 13).

Odległość od przeszkody z czujnika laserowego



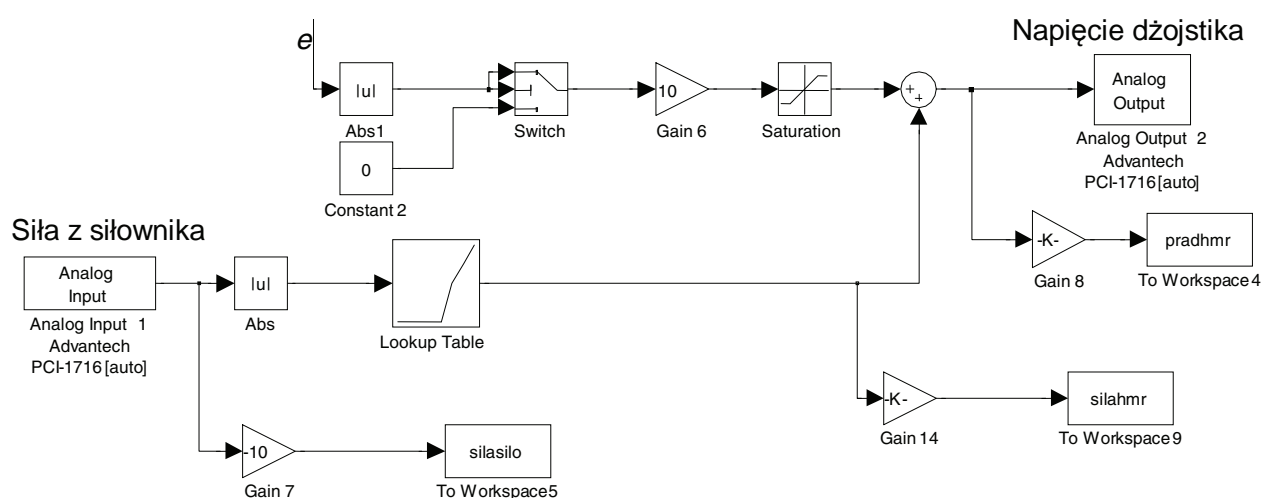
Rys. 13. Schemat układu sterowania hamulcem MR z dodatkowym czujnikiem odległości

Przebiegi sił siłownika i dźwojstika pokazano są na rys. 14. Dodatkowo na tym wykresie naniesiona jest odległość tłoka od przeszkody (L). Linia pionową zaznaczony jest moment zderzenia siłownika z przeszkodą.

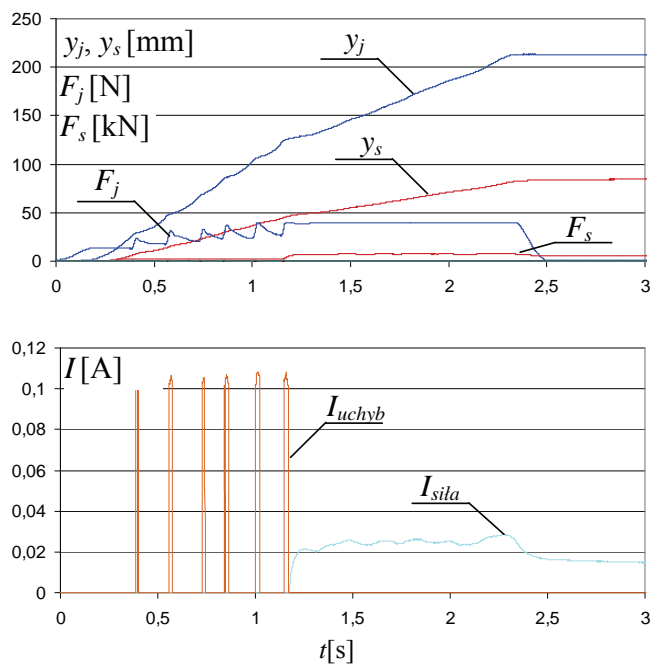


Rys. 14. Charakterystyki z układu sterowania hamulcem MR z dodatkowym czujnikiem odległości

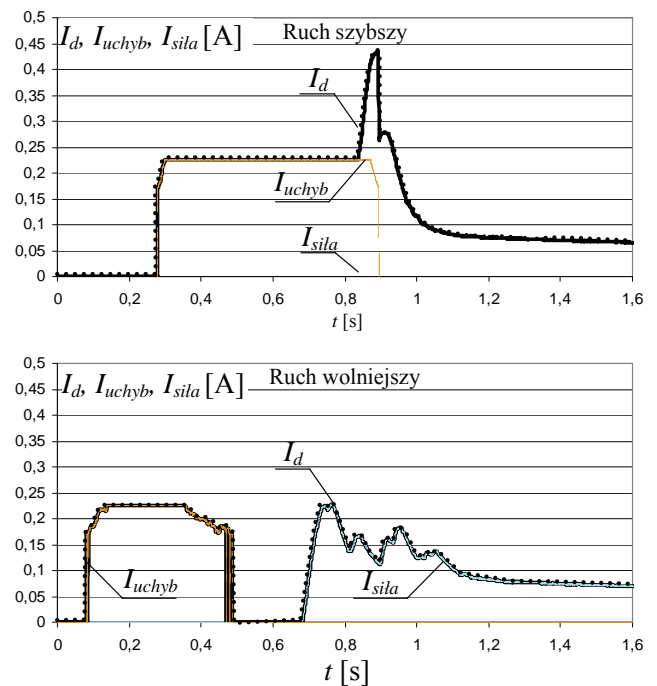
Podczas badań zauważono, że czasami zdarza się, że operator zbyt szybko przesuwając dźwignię, przez co tłoczek napędu hydraulicznego „nie nadąża” za zmianami położenia ramienia dźwojstika. Zaprojektowano więc taki układ sterowania, w którym dźwojstik jest hamowany w momencie, w którym uchyb regulacji e (rys. 10) przekroczy założoną z góry wartość. Schemat tego układu wykonany w programie Simulink przedstawia rys. 15. Na rysunku 16a widoczne są przebiegi siły i położenia dźwojstika oraz siłownika podczas sterowania tą metodą. Rys. 16b pokazuje rozkład składowych prądów płynących przez hamulec MR dźwojstika z podziałem na część pochodzącą od uchybu (kolor czerwony) oraz z czujnika siły (niebieski).



Rys. 15. Schemat układu sterowania algorytmem z dodatkowym sprzężeniem od uchybu wykonany w programie Simulink



Rys. 16. Przebiegi podczas sterowania algorytmem z dodatkowym sprzężeniem od uchybu:
 a) siła i położenie dźwistka i siłownika,
 b) rozkład składowych prądów hamulca MR w dźwistku



Rys. 17. Porównanie prądów dźwistka dla różnych szybkości jego ruchu

Na rys. 17 porównano rozkład prądów pochodzących od uchybu i z czujnika siły dla dwóch różnych szybkości ruchu dźwistka. Widać na nim, że im szybszy ruch tym szersza jest część pochodząca od uchybu.

6. WNIOSKI

Na podstawie przedstawionych w artykule badań można stwierdzić, że zastosowanie dźwistka dotykowego znacznie poszerza możliwości sterowania. Dzięki temu operator za pomocą zmysłu dotyku może doświadczać dodatkowych wrażeń, a przez to, w niektórych warunkach precyzyjniej i bezpieczniej obsługiwać maszynę. Obecnie trwają prace nad opracowaniem jeszcze innych algorytmów sterowania w układzie dźwistek dotykowy – serwonapęd elektrohydrauliczny oraz poszukiwane są kolejne możliwości zastosowania dźwistików dotykowych np. w układach do wykrywania podziemnych linii energetycznych lub rur kanalizacyjnych podczas pracy koparką.

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"

BIBLIOGRAFIA

1. Paweł Bachman, Zastosowanie cieczy MR w dźwostkach typu "haptic", Ciecze elektro- i magneto-reologiczne oraz ich zastosowania w technice, Poznań, 2010.
2. Andrzej Milecki, Paweł Bachman, Konstrukcja i badania urządzeń zadających i dotykowych z cieciami magneto-reologicznymi i z siłowym sprzężeniem zwrotnym – podsumowanie projektu badawczego, Współczesne problemy techniki, zarządzania i edukacji, Zielona Góra, 2008.
3. Andrzej Milecki, Paweł Bachman, Marcin Chciuk, Wykrywanie kolizji w teleoperatorze z interfejsem dotykowym i systemem wizyjnym, Pomiar, Automatyka, Robotyka, nr 2, 2010.
4. Piotr Gawłowicz, Marcin Chciuk, Paweł Bachman, Algorytmy sterowania napędem elektrohydraulicznym przy pomocy wahadłowego dźwostka dotykowego z cieczą MR w układzie z siłowym sprzężeniem zwrotnym, Pomiar, Automatyka, Robotyka, nr 2, 2009.
5. Paweł Bachman, Andrzej Milecki, MR haptic joystick in control of virtual servo drive, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 149, 2009.
6. Piotr Gawłowicz, Marcin Chciuk, Paweł Bachman, Robot sterowany trzyosiowym dźwostkiem dotykowym z cieczą magneto-reologiczną, Pomiar, Automatyka, Robotyka, nr 2, 2009.
7. Paweł Bachman, Siłowe sprzężenie zwrotne w hydraulice, Hydraulika i Pneumatyka, nr 2, 2009.
8. Paweł Bachman, Sterowanie napędem elektrycznym za pomocą dźwostka dotykowego z cieczą magneto-reologiczną, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją, Poznań 2008, nr 8.