

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

STEROWANIE DWUOSIOWYM PODNOŚNIKIEM ELEKTROHYDRAULICZNYM PRZY POMOCY DŻOJSTIKA DOTYKOWEGO Z CIECZĄ MR

W artykule opisane jest zastosowanie dżojstika z siłowym sprzężeniem zwrotnym do sterowania podnośnika. Na początku artykułu przedstawiony jest krótki opis i budowa dwuosiowego manipulatora z napędem elektrohydraulicznym. Następnie opisana jest budowa dwuosiowego dżojstika dotykowego. W końcowej części artykułu opisany jest układ sterowania manipulatora przy pomocy dżojstika z hamulcami MR, oparty na komputerze PC z kartą wejść/wyjść oraz przedstawione są wyniki badań doświadczalnych.

CONTROL OF TWO-AXIS MANIPULATOR WITH ELECTROHYDRAULIC DRIVE BY HAPTIC JOYSTICK WITH MAGNETORHEOLOGICAL FLUID

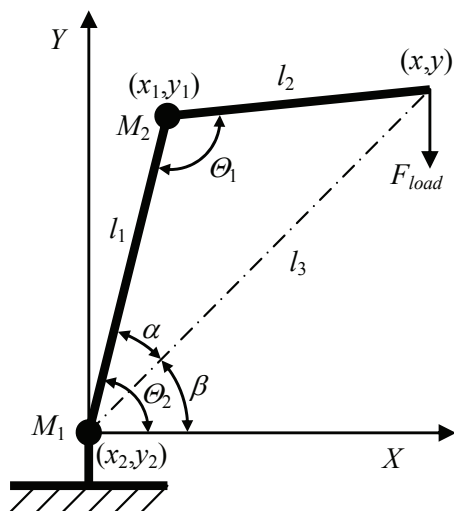
The article is aimed to design and testing of joystick with force feedback used in control of lifting device. The paper starts with the basic description of the construction two-axis manipulator with electrohydraulic drives. Next, the construction of two-axis haptic joystick is described. Finally, the based on PC with input/output card, control system of mentioned above joystick with magnetorheological brake and manipulator, and research results are described.

1. STEROWANIE PODNOŚNIKIEM HYDRAULICZNYM W UKŁADZIE Z SIŁOWYM SPRĘŻENIEM ZWROTNYM

Wykorzystując właściwości cieczy magnetoreologicznych [1, 3] wykonano dwuosiowy dżojstik dotykowy służący do sterowania manipulatorem elektrohydraulicznym. Na końcu ramienia manipulatora znajduje się czujnik siły połączony z zaczepem służącym do podnoszenia różnych przedmiotów. W przegubach manipulatora umieszczone są enkodery, informujące o aktualnym położeniu obu ramion. Czujnik siły ma za zadanie mierzyć, jaka jest masa przenoszonego obiektu. Siła, jaką odczuwa operator jest zależna od tej masy oraz od aktualnego położenia ramion. Analogicznie do rzeczywistych układów tego typu, im większe odchylenie od osi pionowej, czyli im dłuższe ramię, tym większa jest siła oporu odczuwana na dżojstiku.

2. BUDOWA MANIPULATORA ELEKTROHYDRAULICZNEGO

Manipulator [2] w uproszczeniu składa się z dwóch ramion (rys. 1), pionowego l_1 i poziomego l_2 , połączonych obrotowymi przegubami M_1 i M_2 . Całość przymocowana jest do podstawy. Do poruszania ramionami służą dwa siłowniki hydrauliczne sterowane zaworami proporcjonalnymi. Kąty θ_1 , θ_2 odczytywane są z enkoderów zainstalowanych w przegubach ramienia i przedramienia.



Rys. 1. Struktura kinematyczna podnośnika hydraulicznego

Współrzędne wewnętrzne:

- Θ_1 – kąt odchylenia przedramienia względem ramienia $[\circ]$,
- Θ_2 – kąt odchylenia ramienia względem pionu $[\circ]$,
- Współrzędne zewnętrzne:
 - x, y – współrzędne kartezjańskie końca przedramienia wyrażone w układzie bazowym X, Y [mm],
 - x_1, y_1 – współrzędne kartezjańskie przegubu pomiędzy ramieniem a przedramieniem wyrażone w układzie bazowym X, Y [mm],
 - x_2, y_2 – współrzędne kartezjańskie przegubu pomiędzy podstawą a ramieniem wyrażone w układzie bazowym X, Y [mm],

- α – kąt pomiędzy ramieniem a przekątną l_3 $[\circ]$,
- β – kąt pomiędzy przekątną l_3 a płaszczyzną bazową X $[\circ]$,
- Parametry geometryczne:
 - l_1 – długość ramienia [mm],
 - l_2 – długość przedramienia [mm],
 - l_3 – długość przekątnej pomiędzy przegubem (x_2, y_2) a końcem przedramienia (x, y) [mm],
- Siły i momenty:
 - F_{load} – ciężar podnoszony przez podnośnik hydrauliczny [N],
 - M_1 – moment obrotowy występujący w przegubie ramienia [Nm],
 - M_2 – moment obrotowy występujący w przegubie przedramienia [Nm].

Podczas ruchu ramion obliczane jest aktualne położenie końca ramienia l_2 (długość ramienia l_3) i kąty ramion względem powierzchni poziomej, oraz momenty występujące w obu przegubach, których wartości następnie przekazywane są po odpowiednim przeskalowaniu do odpowiednich hamulców magnetoreologicznych dżojstika.

Obliczenie długości przekątnej l_3 z twierdzenia Carnota:

$$l_3 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2 * l_1 * l_2 * \cos \Theta_1} \quad (1)$$

Obliczenie kąta α pomiędzy ramieniem a przekątną z twierdzenia sinusów:

$$\frac{l_3}{\sin \Theta_1} = \frac{l_2}{\sin \alpha} \quad (2)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{l_2}{l_3} \sin \Theta_1\right) \quad (3)$$

Obliczenie kąta β pomiędzy przekątną l_3 a płaszczyzną bazową X :

$$\beta = \Theta_2 - \alpha \quad (4)$$

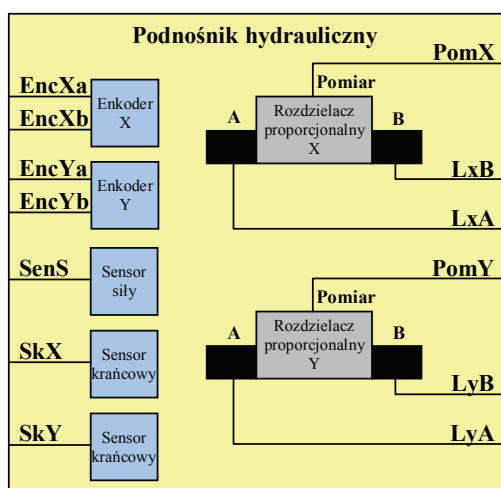
Obliczenie momentu obrotowego M_I w przegubie ramienia:

$$M_1 = F_{load} * l_3 * \cos \beta \quad (5)$$

Obliczenie momentu obrotowego M_2 w przegubie przedramienia:

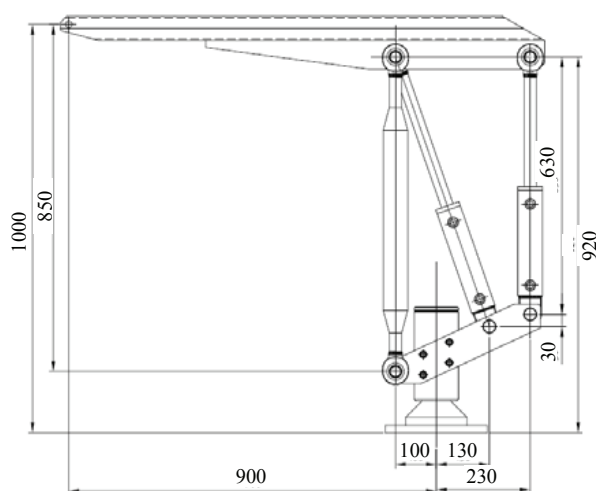
$$M_2 = F_{load} * l_2 * \cos \Theta_1 \quad (6)$$

Na rys. 2 pokazany jest schemat poglądowy układu elektrycznego podnośnika hydraulicznego. Sygnałami wyjściowymi w tym zespole są impulsy z enkoderów X i Y , analogowy sygnał z czujnika siły, oraz logiczne sygnały z wyłączników krańcowych, służących do zerowania manipulatora. Do układu wprowadzane są sygnały sterowania zaworami proporcjonalnymi.



Rys. 2. Schemat poglądowy układu elektrycznego podnośnika hydraulicznego

Rysunek techniczny wraz z głównymi wymiarami oraz widok budowy zewnętrznej manipulatora pokazany jest na rys. 3.

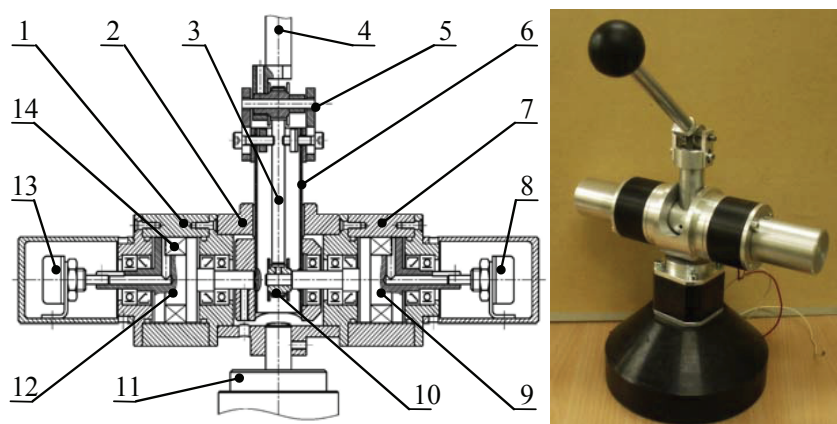


Rys. 3. Rysunek techniczny i widok budowy zewnętrznej manipulatora [2]

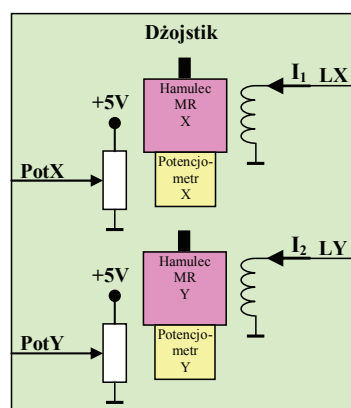
3. BUDOWA DWUOSIOWEGO DŻOJSTIKA DOTYKOWEGO Z CIECZĄ MR

Dżojstik dwuosiowy [2] zbudowano wykorzystując dwa identyczne obrotowe hamulce magnetoreologicznych (rys. 4). Składa się on z podstawy 11, do której zamocowana jest obudowa 2 z przymocowanymi do niej hamulcami MR 1, 7, w których elementami

ruchomymi są wirniki 9, 12. Napięcie wytwarzające pole elektromagnetyczne w hamulcu podawane jest na cewki 14. Ramię 6 dźwistika przymocowane jest bezpośrednio do jednego z wirników hamulca MR, ramię 4 połączone jest z drugim hamulcem poprzez pasek klinowy 3 z kołem pasowym 10. Oba ramiona połączone są ze sobą przegubem obrotowym 5. Położenie ramion dźwistika mierzone jest poprzez potencjometry pomiarowe 8, 13.



Rys. 4. Rysunek przedstawiający budowę wewnętrzną [2] oraz widok dźwistika MR

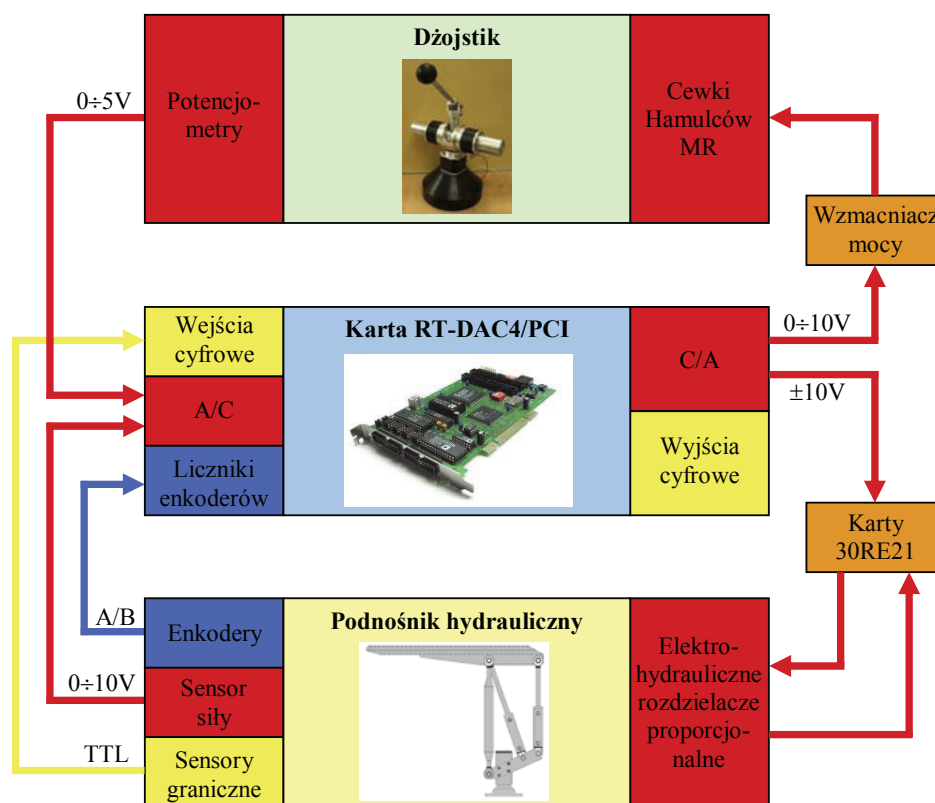


Rys. 5. Schemat poglądowy układu elektrycznego dźwistika

Na rys. 5 pokazany jest schemat poglądowy układu elektrycznego dźwistika dotykowego. Sygnałami wyjściowymi w tym zespole są napięcia potencjometrów X i Y , które podawane są na wejścia analogowe karty. Sygnały wejściowe to napięcia podawane na cewki hamulców magnetoreologicznych, które za pośrednictwem wzmacniaczy mocy pobierane są z wyjść analogowych karty sterującej.

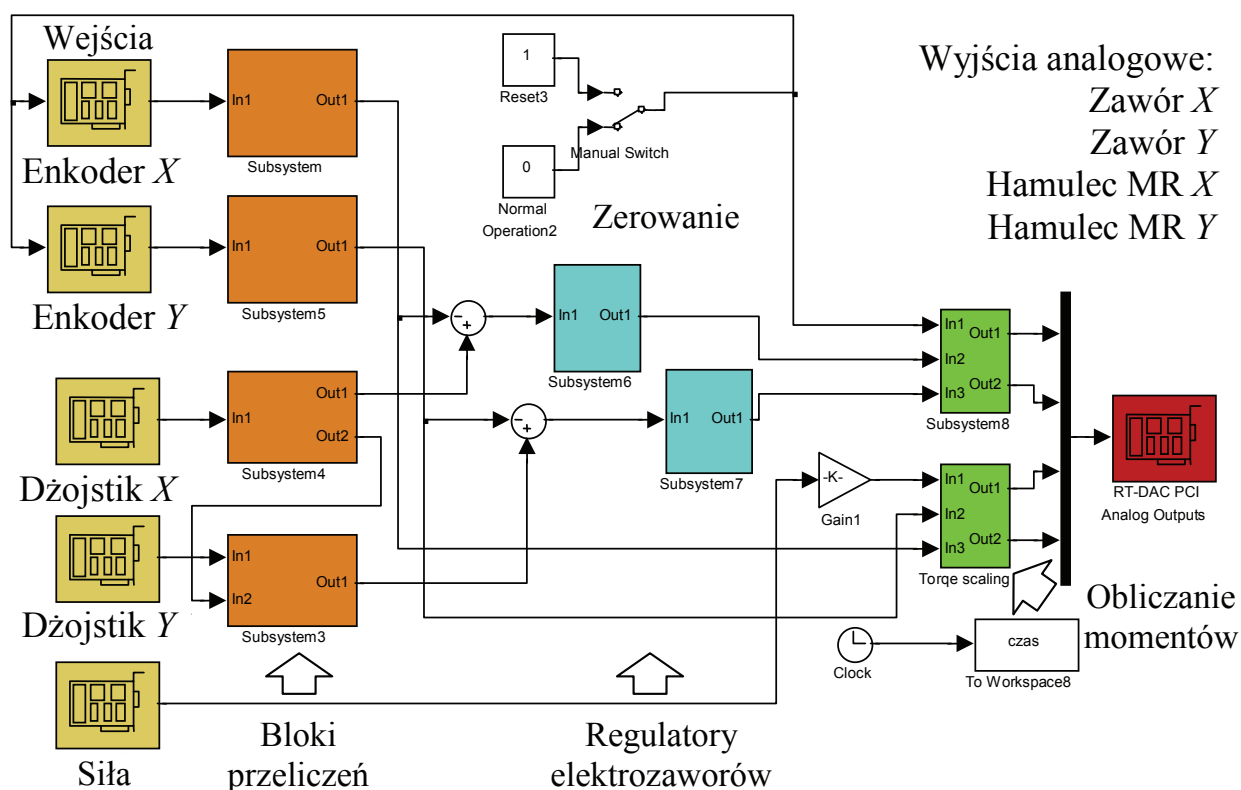
4. UKŁAD STEROWANIA

Do sterowania podnośnika użyto komputer PC z kartą wejść/wyjść RT-DAC 4 PCI i programem MATLAB/Simulink z systemem czasu rzeczywistego. Do wykonywania pomiarów wykorzystano drugi komputer PC z kartą DaqBoard 3000 i programem do akwizycji danych. Schemat blokowy układu sterowania pokazano na rysunku 6. Dodatkowo w układzie sterowania stosowano jeszcze elektroniczne układy pośredniczące. Do podłączenia hamulca MR służył operacyjny wzmacniacz mocy oparty na układzie OPA549. Układ pomiaru wychylenia dźwistika zbudowany był w oparciu o wzmacniacz operacyjny OP27. W skład układu pomiaru siły na dźwistiku wchodził pomiarowy wzmacniacz operacyjny INA128 oraz zbudowany na niskoszumowym układzie OP27 wzmacniacz operacyjny pracujący w układzie odwracającym fazę.

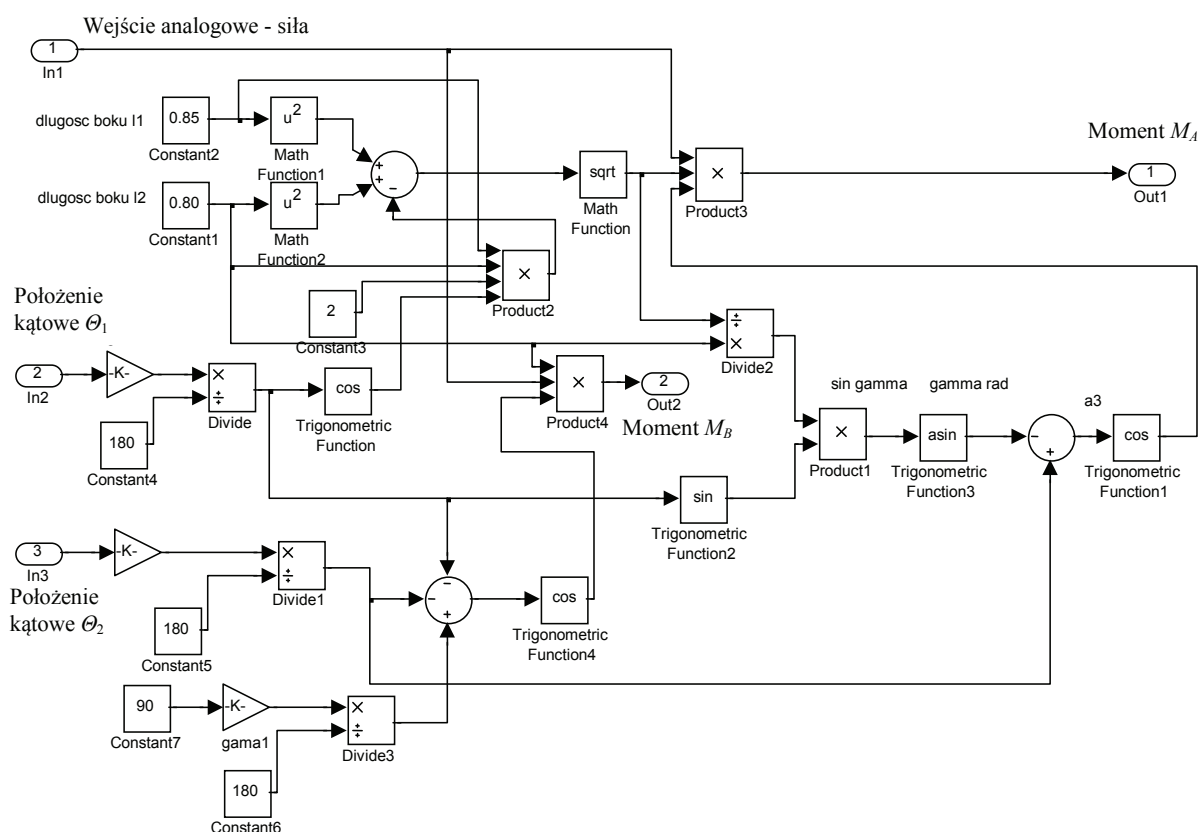


Rys. 6. Schemat poglądowy układu sterowania podnośnika hydraulicznego

Widok głównej części schematu programu sterującego pokazany jest na rys. 7.



Rys. 7. Schemat układu sterowania wykonany w programie MATLAB/Simulink



Rys. 8. Schemat układu obliczania momentów hamujących wykonany w programie MATLAB/Simulink

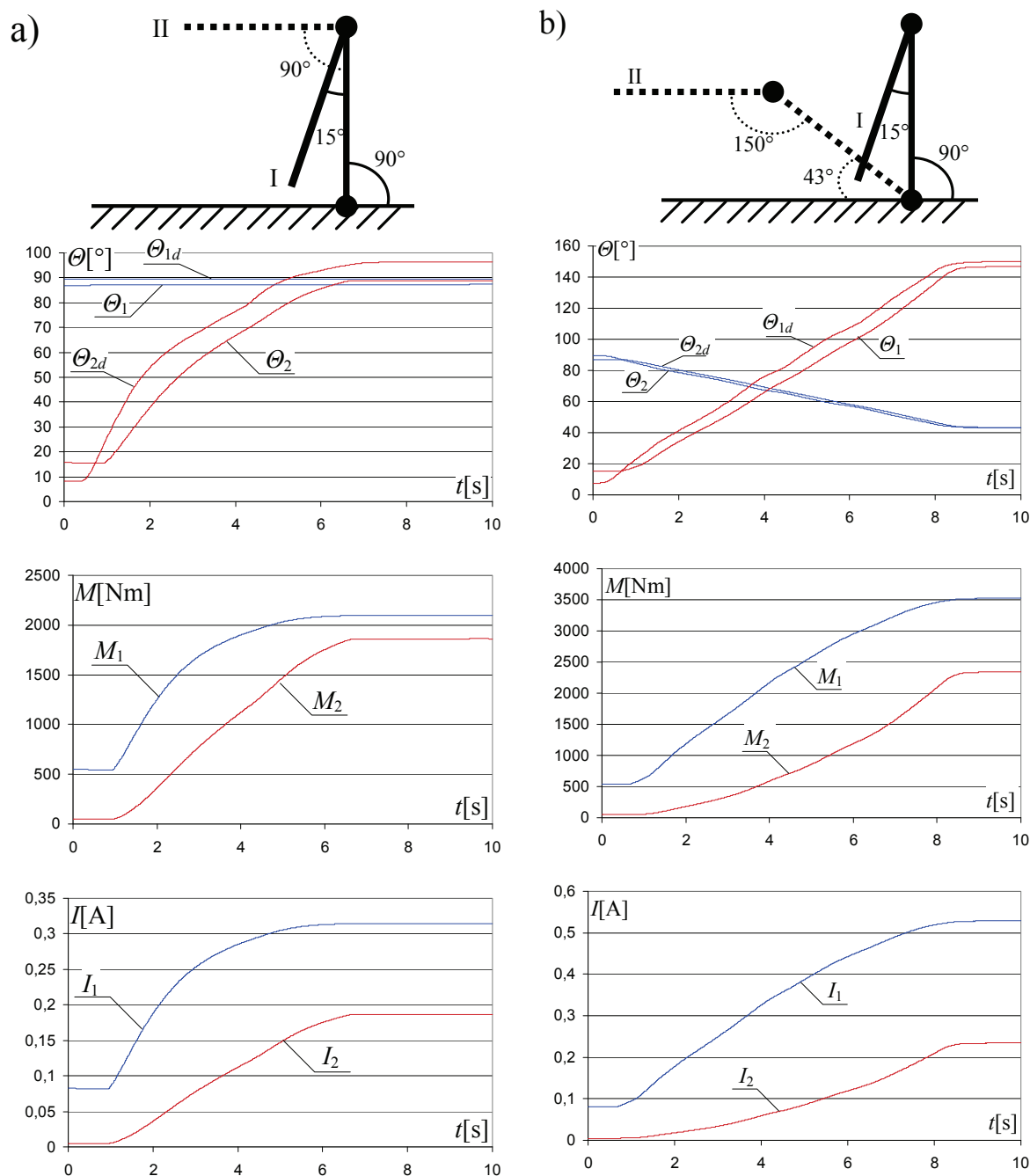
5. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Przed przeprowadzeniem pomiarów na końcu ramienia zamocowano masę około 200 kg.



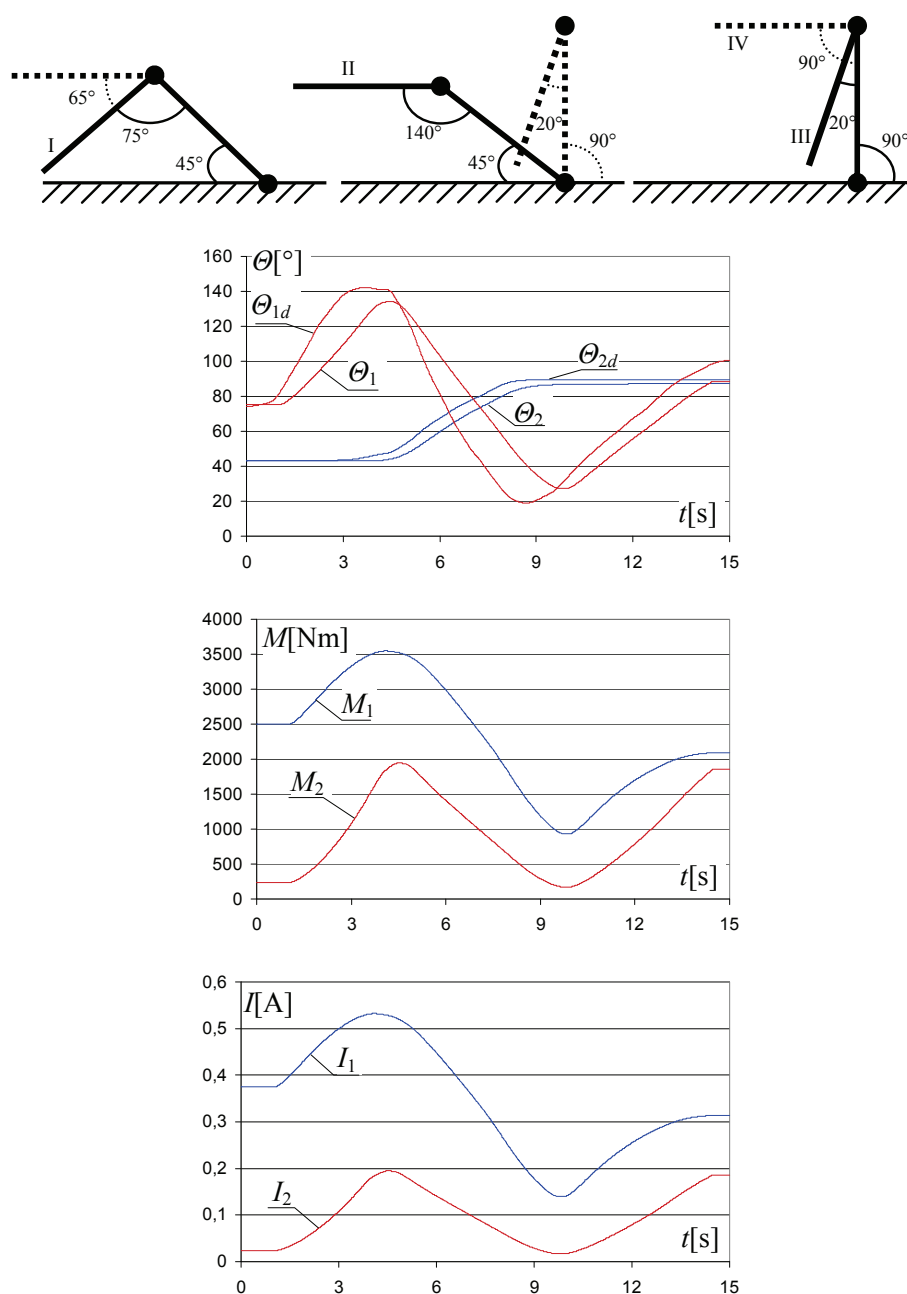
Rys. 9. Widok podnośnika podczas pomiarów

Podczas pomiarów do mierzenia siły obciążenia używano czujnik siły o zakresie pomiarowym 0–5000 N. Sygnał z niego podawano na wzmacniacz pomiarowy, z którego uzyskiwano wartość analogową pomiaru od 0 do 10 V. Na rys. 10a pokazany jest przypadek, w którym porusza się tylko przedramię podnośnika. Pozycja początkowa podnośnika (I) zaznaczona jest linią ciągłą, a końcowa (II) przerywaną. Położenia dźwostka i ramion podnośnika podane jest w stopniach. Kąty zaznaczone na rysunkach odpowiadają skrajnym położeniom ramion podnośnika. Mimo, że ramię l_1 (rys. 1) nie porusza się widać, że moment M_1 się zmienia, gdyż uzależniony jest on od położenia ramienia l_2 . Rys. 10b przedstawia przebiegi dla ruchu bardziej złożonego, w którym poruszają się już oba ramiona.



Rys. 10. Przebiegi sygnałów podczas ruchu ramion podnośnika

Wartości położenia z indeksem „d” (Θ_{1d} , Θ_{2d}) dotyczą położenia adekwatnych ramion dźwistika. Rys. 11 obrazuje sytuację, w której cykl pracy podnośnika składał się z czterech pozycji. Z wykresów pokazujących położenie dźwistika i podnośnika widać, że podnośnik ma niewielkie opóźnienie w stosunku do dźwistika. Jest to spowodowane zastosowaniem w układzie regulatorów (rys. 7), których zadaniem było spowolnienie ruchu podnośnika i niedopuszczenie do rozkołysania się obciążenia.



Rys. 11. Przebiegi sygnałów podczas złożonego ruchu ramion podnośnika

6. ZAKOŃCZENIE

W chwili obecnej trwają dalsze prace nad udoskonalaniem układu sterowania zespołu dźwojstik dotykowy – podnośnik. Skupiają się one na takim doborze algorytmu sterowania i takim rozkładzie momentów na poszczególne przeguby dźwojstika, aby wrażenia odczuwane przez operatora były jak najbardziej realistyczne. Przewiduje się zastosowanie w regulatorze prawa Webera-Fechnera, które wyraża relację pomiędzy fizyczną miarą bodźca a reakcją układu biologicznego. Dotyczy ono reakcji na bodźce zmysłów człowieka. Jest to prawo fenomenologiczne będące wynikiem wielu obserwacji praktycznych i znajdujące wiele zastosowań technicznych m. in. w technologii haptic [4]. Według tego prawa, jeśli

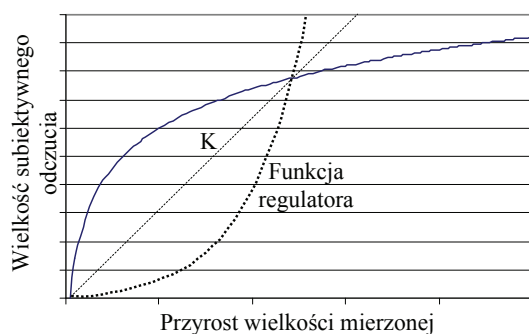
porównywane są wielkości bodźców, na percepcję człowieka oddziałuje nie arytmetyczna różnica między nimi, lecz stosunek porównywanych wielkości. Wykazano, że stosunek najmniejszej zauważalnej różnicy między bodźcami (B_0) do absolutnej wielkości bodźca (B) ma wartość stałą. W roku 1860 zależność Webera została zmodyfikowana przez Fechnera, który zaproponował stosowanie zależności logarytmicznej:

$$w = k \cdot \ln \frac{B}{B_0} \quad (7)$$

gdzie:

w – reakcja układu biologicznego (wrażenie zmysłowe), B – natężenie danego bodźca, siła bodźca wywołującego wrażenie o intensywności w , B_0 – wartość początkowa natężenia danego bodźca, siła najslabszego wyczuwalnego bodźca (bodźca progowego), $\ln$ – logarytm naturalny.

Zgodnie z tą zależnością można przyjąć, że przy małych wartościach sygnału będzie odczuwany nawet niewielki jego wzrost, jednak przy dużym sygnale, aby odczuć różnicę potrzebny jest o wiele większy wzrost amplitudy. Sytuację tę dobrze obrazuje wykres na rys. 12. Pokazany jest na nim też przybliżony kształt, jaki powinna mieć funkcja realizowana przez regulator.



Rys. 12. Logarytmiczna charakterystyka odczucia subiektywnego

Rozpatrywana jest też zmiana konstrukcji manipulatora i zastosowanie dwóch czujników siły, zamontowanych przy każdym z siłowników. Rozwiązanie takie znacznie uprościłoby algorytm sterowania hamulcami MR dźwostika zmniejszając liczbę obliczeń, jakie muszą być wykonywane, a to wpłynęłoby na poprawę szybkości działania całego układu. Jest to ważne, ponieważ w przyszłości układ ten będzie sterowany bezprzewodowo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Milecki A., Ławniczak A., Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- [2] Milecki, A., Myszkowski A., Chciuk M.,: Applications of magnetorheological brakes in manual control of lifting devices and manipulators, 11th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Dresden 2008.
- [3] <http://www.lord.com>
- [4] Hinterseer P. and Steinbach E., "A psychophysically motivated compression approach for 3^d haptic data," in Proc. of the IEEE Haptics Symposium, Alexandria, VA, USA, March 2006, pp. 35–41.

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"