mgr inż. Paweł Bachman
Uniwersytet Zielonogórski

ZASTOSOWANIE DŻOJSTIKA DOTYKOWEGO Z CIECZĄ MAGNETOREOLOGICZNĄ DO STEROWANIA WIRTUALNEGO MODELU NAPĘDU HYDRAULICZNEGO

W artykule opisano działanie urządzeń dotykowych oraz podstawowe własności cieczy magnetoreologicznych. Przedstawiono model zastosowanego w badaniach napędu elektrohydraulicznego wykonany w programie Matlab/Simulink. Końcową część artykułu stanowi opis budowy i badań obrotowego hamulca magneto-reologicznego oraz dżojstika dotykowego.

APPLICATION OF HAPTIC JOYSTICK WITH MAGNETO-RHEOLOGICAL FLUID FOR CONTROL OF VIRTUAL ELECTRO-HYDRAULIC SERVO DRIVE'S MODEL

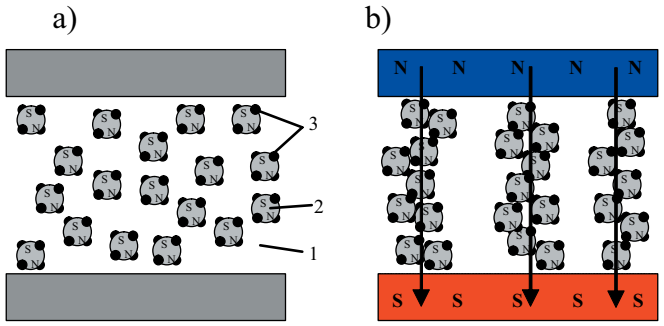
The article describes operation of haptic devices and magneto-rheological fluids' main properties. The model of electro-hydraulic servo drive used in research and prepared using Matlab/Simulink software is presented in the article. The last section forms specification of construction and researches of rotary magneto-rheological dumper and haptic joystick.

1. WSTĘP

Urządzenia dotykowe (ang. *haptic devices*) służą do przekazywania bodźców dotykowych ze sterowanego obiektu do użytkownika. Bodźcem tym może być siła, z jaką obiekt naciska na przedmiot, kształt, masa, tekstura, temperatura lub wibracje. Wykorzystując właściwości cieczy magnetoreologicznych postanowiono zbudować dotykowy dżojstik, który służyłby do sterowania położeniem napędu hydraulicznego, a poza tym informowałby operatora o oporach ruchu. Urządzenie takie mogłoby znaleźć zastosowanie w maszynach, w których jako element wykonawczy zastosowano napęd hydrauliczny, który narażony jest na zmienne, często bliskie znamionowym obciążenia (dźwigi, koparki, podnośniki itp.). Operator maszyny poprzez ruch dźwigni dżojstika do przodu albo do tyłu będzie sterował położeniem siłownika. Układ sterowania, oprócz przekazywania wrażeń dotykowych, mógłby np. poprzez blokadę dżojstika nie dopuścić do pracy siłownika przy obciążeniach znamionowych, co mogłoby zapobiec zniszczeniu maszyny.

2. CHARAKTERYSTYKA CIECZY MAGNETOREOLOGICZNYCH

Ciecz magnetoreologiczna (ang. *Magneto-Rheological Fluid* – MRF) jest układem dyspersyjnym złożonym z nośnika w postaci oleju mineralnego lub syntetycznego, w którym jest rozproszona zawiesina ferromagnetyczna powleczona powłoką powierzchniową. Model cieczy przedstawiono na rys. 1. Szczególną cechą cieczy MR jest wzrost jej lepkosprężystych właściwości wraz ze wzrostem działającego na nią pola magnetycznego. Zachowanie cieczy MR, na którą nie działa pole magnetyczne podobne jest do zachowania zwykłych cieczy newtonowskich. Jeśli ciecz umieszczona jest w polu magnetycznym, zawieszone w niej cząsteczki ferromagnetyczne zaczynają zachowywać się jak „miniaturowe magnesy" i układając się wzdłuż linii sił pola magnetycznego stanowią przeszkodę dla przepływu nośnika.



Rys. 1. Model cieczy magnetoreologicznej: a) przy braku pola magnetycznego b) w obecności pola magnetycznego [4] (1 – olej mineralny lub syntetyczny, 2 – cząsteczki zawiesiny ferromagnetycznej, 3 – powłoka powierzchniowa)

Rodzaj cieczy MR oraz jej właściwości określają następujące parametry [1, 3, 4]:

- lepkość (przy braku pola magnetycznego): 0,2÷0,3 Pa·s
- maksymalne natężenie pola magnetycznego: 250 kA/m
- gęstość: 3÷4 g/cm^3
- czas reakcji: kilka milisekund
- zasilanie cewki: 2÷25 V; 1÷2 A
- temperatura pracy: -50÷150 °C.

Opisane powyżej właściwości cieczy MR pozwalają na zbudowanie obrotowego hamulca MR. Do jego budowy zostanie wykorzystana ciecz typu MRF132AD firmy Lord Corp. [4].

3. OPIS WIRTUALNEGO MODELU NAPĘDU HYDRAULICZNEGO

Wykorzystując program Simulink z pakietu Matlab stworzono model serwonapędu elektrohydraulicznego. Rzeczywiste układy serwomechanizmów elektrohydraulicznych to układy nieliniowe. Teoretycznie jednak, przyjmując pewne uproszczenia, można skonstruować ich linowy model o zbliżonych do rzeczywistości parametrach [2, 3]. Do dalszych badań został wykorzystany łatwy w analizie model, którego transmitancja stanowi szeregowe połączenie elementu oscylacyjnego i całkującego opisanego wzorem [2, 3]:

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k_s \omega_s^2}{s(s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2)} \tag{1}$$

gdzie: k_s – współczynnik wzmocnienia, ω_s – pulsacja drgań własnych, ζ_s – współczynnik tłumienia.

Pulsację drgań własnych siłownika opisuje zależność [3]:

$$\omega_s = \sqrt{\frac{c_s}{m}\left(1 + \frac{K_v + K_l}{A^2} \cdot D\right)} \tag{2}$$

gdzie: c_s – sztywność siłownika, m – masa, K_v – współczynnik przecieków, K_l – współczynnik linearyzacji charakterystyki przepływu, A – powierzchnia tłoka siłownika, D – współczynnik tarcia dynamicznego.

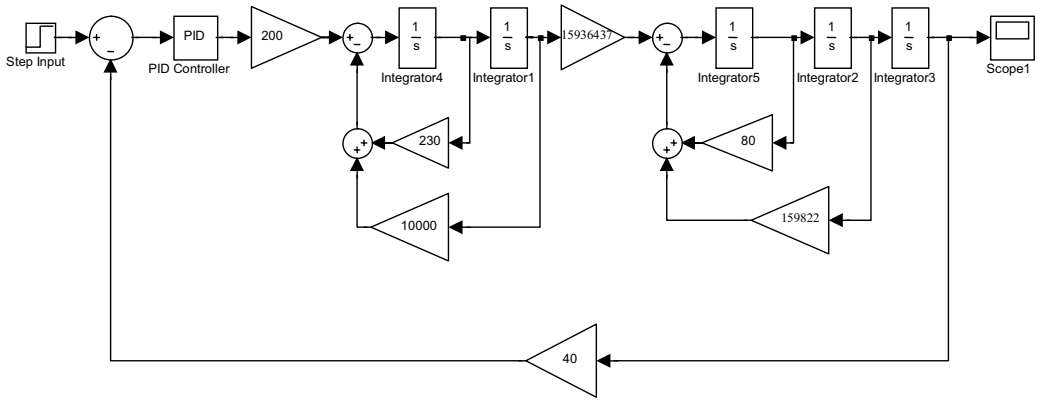
Współczynnik tłumienia i wzmocnienia opisują odpowiednio zależności (3) i (4).

$$\zeta_s = \frac{\frac{D}{m} + \frac{c_s(K_v + K_l)}{A^2}}{2\omega_s} \tag{3}$$

$$k_s = \frac{K_{Qp}}{A(1+\frac{K_v + K_l}{A^2} \cdot D)} \tag{4}$$

gdzie: K_{Qp} – współczynnik przepływu.

Jak widać z powyższych wzorów, na transmitancję siłownika ma wpływ przesuwana przez niego masa. Zależą od niej wartości współczynnika tłumienia ζ_s i pulsacji drgań własnych ω_s siłownika. Model serwomechanizmu elektrohydraulicznego wraz z regulatorem PID zbudowany na podstawie wzoru (1) w programie Simulink przedstawia rys. 2.



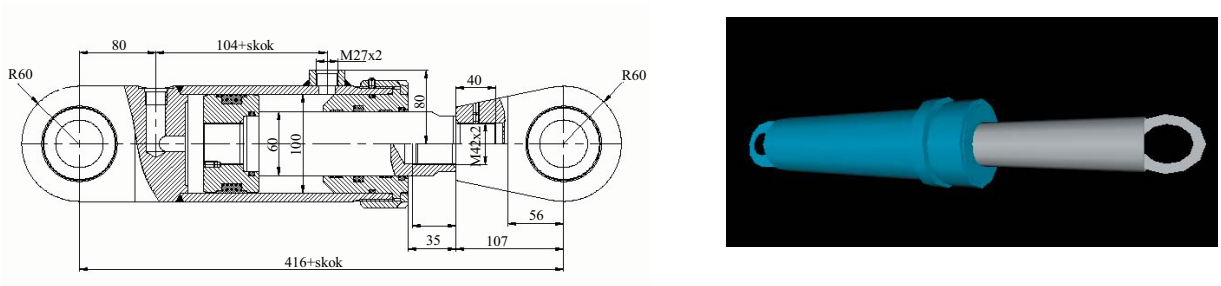
Rys. 2. Schemat serwonapędu elektrohydraulicznego z zaworem i regulatorem wykonany w pakiecie Matlab/Simulink

Pokazany na rys. 2 model serwonapędu jest układem piątego rzędu, w którym zawór proporcjonalny zamodelowano za pomocą elementu drugiego rzędu o transmitancji [2, 3]:

$$G(s) = \frac{x(s)}{w(s)} = \frac{k_z \omega_z^2}{s^2 + 2\zeta_z \omega_z s + \omega_z^2} \tag{5}$$

gdzie: k_z – współczynnik wzmocnienia, ω_z – pulsacja drgań własnych zaworu, ζ_z – współczynnik tłumienia zaworu.

a) b)



Rys. 3. Siłownik hydrauliczny dwustronnego działania serii CB firmy Wamet [8]: a) półprzekrój, b) widok siłownika w wirtualnej rzeczywistości

Do wyznaczenia współczynników modelu wykorzystano parametry rzeczywistego siłownika (rys. 3a) hydraulicznego dwustronnego działania serii CB firmy Wamet: średnica tłoka 110 mm, skok tłoka 500 mm. Widok wirtualnego modelu siłownika pokazany jest na rys. 3b.

3. BUDOWA I BADANIA HAMULCA MR

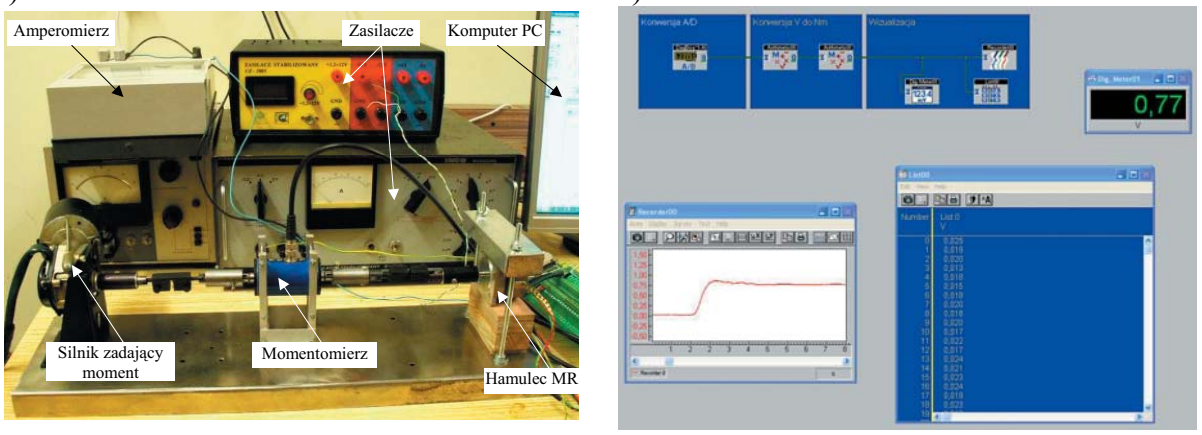
Istnieje kilka różnych wariantów hamulców MR [5, 6, 7]. Są to jednak prototypy urządzeń wyprodukowane do celów badawczych. W sprzedaży dostępny jest magnetoreologiczny hamulec obrotowy firmy Lord Corp. [4]. Ze względu na jego wysoką cenę, do budowy dżojstika wykorzystano hamulec MR własnej konstrukcji. Koszt wykonania był niewielki, gdyż do jego budowy wykorzystano gotowe elementy silnika krokowego. Po wypełnieniu przestrzeni pomiędzy cewkami (rys. 4a) masą uszczelniającą, wirnik umieszczono w stojanie (rys. 4b) i zalano cieczą MR. Z obu stron osi umieszczono oringi uszczelniające. Po uszczelnieniu połączenia pomiędzy korpusem a pokrywką, skręcono obie części śrubami. Kolejne fazy montażu hamulca MR są pokazane na rys. 4.

a) b) c)

Rys. 4. Budowa hamulca MR: a) widok cewek, b) wnętrze hamulca po zalaniu masą uszczelniającą i zamontowaniu wirnika, c) widok zewnętrzny

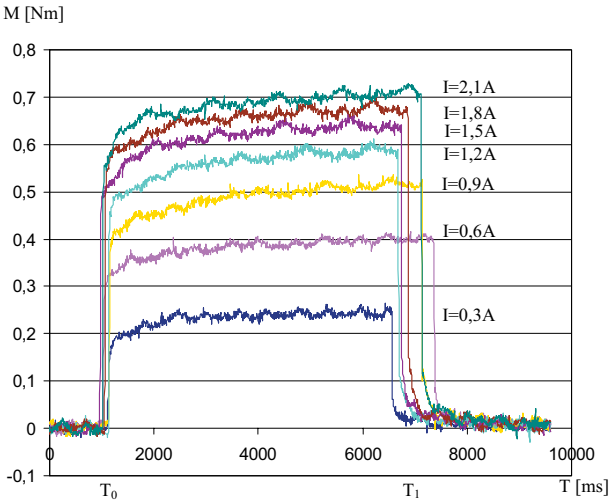
Badania hamulca MR wykonano na stanowisku wyposażonym w momentomierz dynamiczny firmy Magneton Elektronik (typ DFM22 5.0 S ±5 Nm). Widok stanowiska oraz interfejsu pomiarowego przedstawiony jest na rys. 5.

a) b)



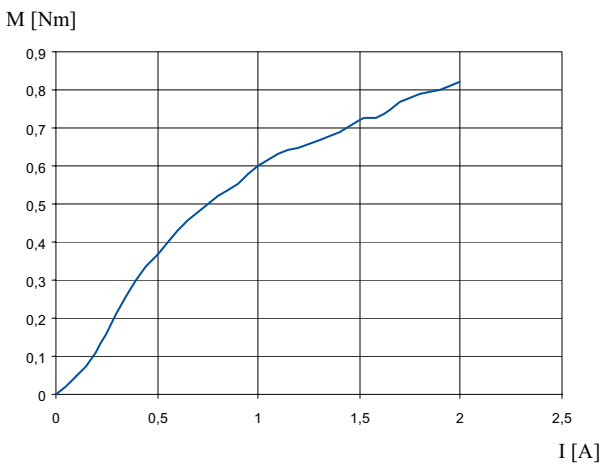
Rys. 5. Badanie hamulca MR: a) widok stanowiska badawczego, b) interfejs wykonany w programie DasyLab

Pomiary wykonywane były za pomocą komputera klasy PC z kartą pomiarową DaqBoard 3001 i programem DasyLab 8.0 (rys. 5b). Częstotliwość próbkowania 100 próbek/sekundę (0,1 kHz). Chwili oznaczonej jako T_0 odpowiada włączenie prądu, a chwili oznaczonej jako T_1 – wyłączenie prądu płynącego przez cewki hamulca (rys. 6).



Rys. 6. Krzywe zmian momentu hamującego w czasie dla różnych prądów płynących przez cewki tłumika MR

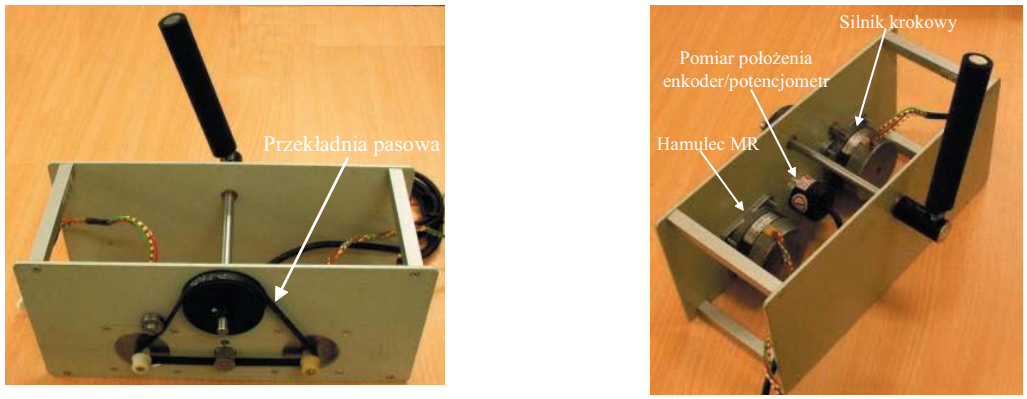
Maksymalna wartość momentu hamującego (rys. 7), jaką można otrzymać dla poszczególnych prądów, jest nieco większa niż pokazują to przebiegi. Wynika to stąd, że odczyt odbywał się dopiero po ustabilizowaniu się wartości momentu, co miało miejsce po znacznie dłuższym czasie, niż pokazany na rys. 6.



Rys. 7. Badanie zależności maksymalnego momentu hamującego od prądu płynącego przez cewki tłumika MR

Zasada działania dżojstika z siłowym sprzężeniem zwrotnym jest następująca: im większa jest masa przesuwana przez tłok, tym na uzwojenia cewki hamulca MR podawane jest większe napięcie, co zwiększa lepkość cieczy MR, a sterujący dżojstikiem wyczuwa narastający opór. Widok dżojstika pokazany jest na rys. 8. W celu zwiększenia momentu hamującego w dżojstiku zastosowano przekładnię pasową (rys. 8a).

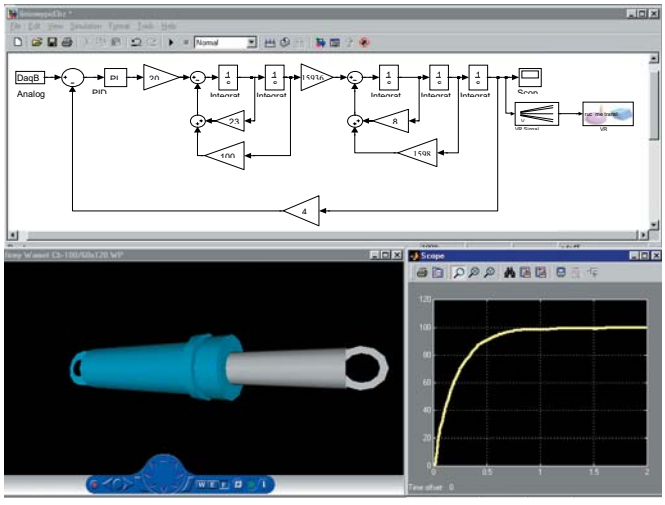
a) b)



Rys. 8. Widok dżojstika: a) przekładnia pasowa, b) wnętrze dżojstika

6. POŁĄCZENIE DŻOJSTIKA Z WIRTUALNĄ RZECZYWISTOŚCIĄ

Dżojstik połączono z opisanym wyżej modelem napędu hydraulicznego za pomocą Virtual Reality Toolbox z pakietu Matlab/Simulink. Sygnał położenia przekazywany był z otencjometru do wirtualnej rzeczywistości za pomocą wejścia analogowego karty DaqBoard 3001. Widok fragmentu schematu wykonanego w programie Simulink, zawierającego model siłownika oraz siłownik w wirtualnej rzeczywistości, jest pokazany na rys. 9.

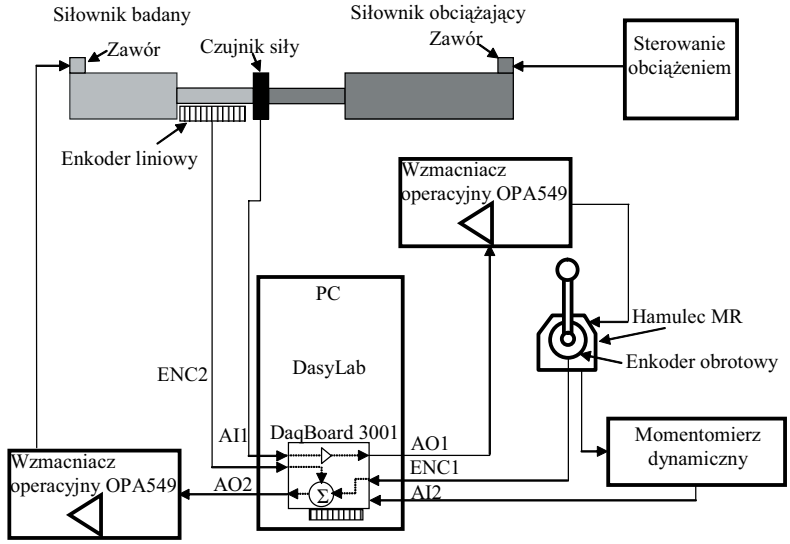


Rys. 9. Widok przeglądarki Virtual Reality Toolbox Viewer wraz z modelem serwomechanizmu elektrohydraulicznego z regulatorem PID zbudowanym w Simulinku

W związku z tym, że podczas badań nie zastosowano czujnika siły, który informowałby o masie przesuwanej przez siłownik, napięcie podawane na cewki hamulca MR generowane było w osobnym układzie elektronicznym i było zależne od wychylenia ramienia dżojstika. Chciano w ten sposób sprawdzić, jak dalece realistyczne są odczucia osoby sterującej wirtualnym modelem siłownika.

7. ZAKOŃCZENIE

Praca ta była przygotowaniem do dalszych badań nad wykorzystaniem opisanego powyżej dżojstika do sterowania napędami hydraulicznymi. Obecnie konstruowane jest stanowisko pomiarowe (rys. 10), na którym będzie badany proces sterowania rzeczywistym napędem hydraulicznym.



Rys. 10. Schemat stanowiska do badania dżojstika dotykowego sterującego rzeczywistym siłownikiem hydraulicznym

Przebadana zostanie również możliwość zastosowania tego dżojstika w wersji „czynnej", czyli takiej, w której obok hamulca MR zostanie zastosowany silnik. Jago zadaniem będzie cofnięcie dźwigni dżojstika w momencie napotkania przez tłok zwiększonego oporu (nagłe zwiększenie masy, uderzenie w przeszkodę). Każde takie zmniejszenie prędkości tłoka będzie odczuwane przez operatora jako szarpnięcie dźwigni dżojstika w kierunku przeciwnym od siły nacisku jego ręki. Trwają też prace nad innymi rozwiązaniami dżojstików MR: m.in. nad modelem z hamulcem zaworowym, dżojstikiem dwuosiowym oraz wieloosiowym, który mógłby zostać zastosowany np. do sterowania ramieniem robota.

LITERATURA

[1] Milecki A., Ławniczak A.: *Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1999.
[2] Milecki A.: *Liniowe serwonapędy elektrohydrauliczne*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2003.
[3] Milecki A.: *Wybrane metody poprawy właściwości liniowych serwonapędów elektrohydraulicznych,* Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1999.
[4] http://www.lord.com
[5] Sang Hwa Kim: *Constrained Rotary MR Damper Design and Its Application*, KAIST Master Thesis, 1998.
[6] Munsang Kim, Seong-Sik Yoon, Sungchul Kang, Seung-Jong Kim, Young-Hwan Kim, Heung-Soon Yim, Choong-Dong Lee, In-Teak Yeo: *Safe arm design for service robot,*

In Proceedings of The Second IARP -IEEE/RAS Joint Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments, Toulouse, France, 2002.
[7] Guha M.; Ali S.Z.; Bhattacharya S.; Burgess S.C., Clarkson P.J.: *The development of a novel rotary damping mechanism for aerospace deployment systems*, Materials and Design, Volume 18, Number 1, February 1997
[8] www.wamet.com.pl

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego KBN pt.: "Konstrukcja i badania urządzeń zadających i dotykowych z cieczami magnetoreologicznymi i z siłowym sprzężeniem zwrotnym" nr 4 T07B 002 29