

Paweł KOWOL

Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej, Zakład Mechatroniki

## MAGNETOREOLOGICZNE PRZETWORNIKI ELEKTROMECHANICZNE – BADANIA, NOWA KONCEPCJA

**Streszczenie.** W artykule omówiono własności cieczy magnetycznych. Przedstawiono podstawowe typy przetworników elektromechanicznych zawierających ciecz magnetoreologiczną – przetworniki o jednym stopniu swobody. Następnie po dokonaniu opisu stanowiska do badań tłumika z cieczą magnetoreologiczną oraz stanowiska do badania hamulca magnetoreologicznego zaprezentowano wyniki badań. W ostatniej części artykułu zaprezentowano koncepcję magnetoreologicznego hamulca obrotowo-liniowego - przetwornika o dwóch stopniach swobody.

## MAGNETORHEOLOGICAL ELECTROMECHANICAL DEVICES – RESEARCHES AND NEW CONCEPTION

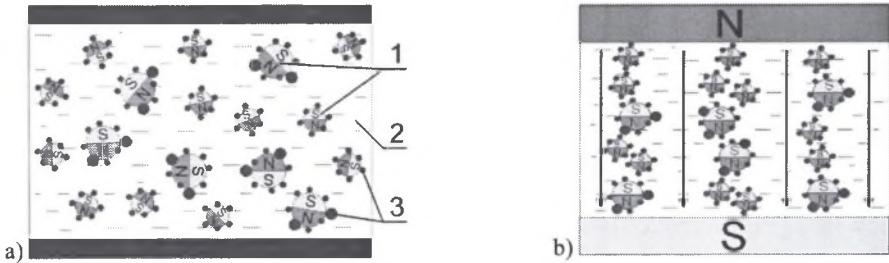
**Summary.** In this article properties of magnetic fluids are described. Basic types of the magnetorheological electromechanical devices – devices with one degree of mechanical freedom – are presented. After description of measurement equipments of magnetorheological linear damper and magnetorheological rotary brake results of measurements are shown. At the end of the article a conception of magnetorheological rotary-linear brake (devices with two degrees of mechanical freedom) is presented.

### 1. WPROWADZENIE

Ciecz magnetoreologiczna jest cieczą magnetyczną. Ciecze te znajdują zastosowanie w różnego rodzaju urządzeniach elektromechanicznych. Urządzenia zawierające ciecz magnetyczną są w swej strukturze synergicznym połączeniem elementów mechanicznych i elektrycznych. Dzięki właściwościom cieczy magnetycznych urządzenia te umożliwiają zmianę parametrów układu mechanicznego (sztywność, siłę tłumienia) w wyniku sterowania wielkościami elektrycznymi (natężenie prądu). Warto zaznaczyć, że sterowanie to odbywa się w prosty sposób, nie wymagający skomplikowanych i energochłonnych układów sterowania, co stanowi dużą zaletę tych urządzeń. Urządzenia z cieczą magnetyczną dzięki swym właściwościom stanowią integralną część systemów mechatronicznych, a ciągły rozwój techniki powoduje poszerzanie zakresu zastosowań tychże urządzeń.

## 2. CIECZE MAGNETYCZNE

Ciecze magnetyczne są zawiesinami drobinek ferromagnetyka w cieczach nośnych (rys.1a), którymi mogą być: woda, olej mineralny, olej syntetyczny, silikon, estry, diestry. Cechą charakterystyczną cieczy magnetycznych jest ich zachowanie w polu magnetycznym. W zewnętrznym polu magnetycznym ciecz magnetyczna zmienia swoje właściwości: z cieczy o gęstawej konsystencji staje się twardą masą niczym zmarznięte masło. Efekt ten wynika ze zmiany struktury cieczy: ferromagnetyczne drobinke zawieszane w cieczy nośnej, stanowiące pojedyncze domeny magnetyczne, pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego ulegają orientacji i koncentracji wzdłuż linii sił pola magnetycznego, tworząc skupiska cząsteczek w postaci łańcuchów (rys. 1b).



Rys. 1. Ciecz magnetyczna: a) budowa cieczy: 1 – drobinke ferromagnetyka, 2 – ciecz nośna, 3 – powłoka niemagnetyczna, b) w jednorodnym polu magnetycznym

Fig. 1. Magnetic fluid: a) structure of the fluid: 1 – ferromagnetic particples, 2 – carrier fluid, 3 – nonmagnetic layer, b) in external magnetic field

Po zaniku zewnętrznego pola magnetycznego ciecz przyjmuje swoją pierwotną postać. Ferromagnetyczne cząsteczki cieczy dzięki niemagnetycznej powłoce nie sklejają się pod wpływem własnego momentu magnetyzacji, lecz podlegając ruchom termicznym ulegają rozproszeniu po zaniku pola magnetycznego.

Im silniejsze pole magnetyczne – im większa indukcja magnetyczna pola  $B$  – tym większe naprężenie łańcuchów utworzonych z ferromagnetycznych cząsteczek cieczy, a tym samym większa lepkość cieczy. Istnieje więc możliwość sterowania polem magnetycznym lepkością cieczy magnetycznej.

Zmianę lepkości cieczy magnetycznej, która jest cieczą nienewtonowską, opisuje prawo Binghama [10] (rys. 2):

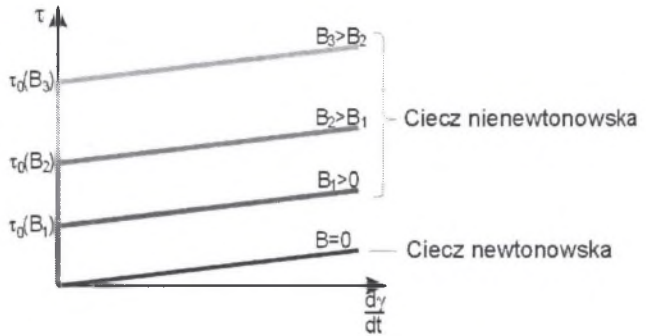
$$\tau = \tau_0(B) + \mu \frac{d\gamma}{dt}, \quad (1)$$

gdzie:

- $\tau$  - naprężenia styczne w cieczy,
- $\tau_0(B)$  – graniczne naprężenia styczne,
- $\mu$  - lepkość dynamiczna cieczy,
- $\gamma$  - odkształcenie postaciowe cieczy.

Jeśli naprężenia styczne w cieczy nie przekroczą naprężeń granicznych  $\tau_0$ , zależnych od zewnętrznego pola magnetycznego o indukcji  $B$ , to ciecz zachowuje się jak ciało sprężyste.

Ze względu na wielkość ferromagnetycznych cząsteczek i związane z tym właściwości cieczy [4] wyróżnia się dwa rodzaje cieczy magnetycznych: ciecze nanomagnetoreologiczne zwane cieczami ferromagnetycznymi i ciecze magnetoreologiczne.



Rys. 2. Zachowanie się cieczy magnetycznej (cieczy nienewtonowskiej) opisane prawem Bingham'a  
 Fig. 2. The feature of the magnetic fluid (no Newton fluid) describing by the Bingham's law

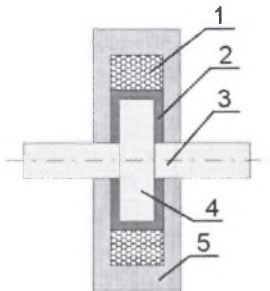
Ciecze magnetoreologiczne posiadają następujące właściwości:

- są zawiesiną koloidalną cząstek ferromagnetyka w cieczy nośnej,
- średnica cząsteczek: (0,5-10)  $\mu\text{m}$ ,
- procentowa zawartość ferromagnetyka: (20-85) %,
- indukcja nasycenia: ok. 0,6 T,
- maksymalne naprężenia styczne: ok. 250 kPa.

### 3. ELEKTROMECHANICZNE PRZETWORNIKI MAGNETOREOLOGICZNE

#### 3.1. Zasada działania

Ciecz magnetoreologiczna ze względu na możliwość uzyskania znacznie większych naprężeń stycznych w cieczy znalazła zastosowania przede wszystkim w hamulcach i tłumikach. Konstrukcje hamulców obrotowych i tłumików liniowych (rys. 3,4) umożliwiają wypełnienie cieczą magnetoreologiczną przestrzeni pomiędzy obudową a elementem ruchomym przetwornika, którym w przypadku hamulca obrotowego jest wirnik, a w przypadku tłumika liniowego tłok.

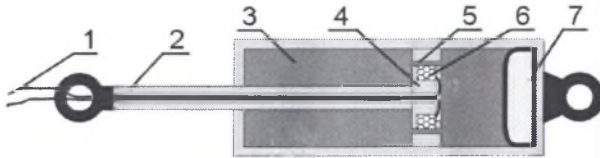


Rys. 3. Hamulec obrotowy z cieczą magnetoreologiczną: 1 – cewka, 2 – ciecz magnetoreologiczna, 3 – wał, 4 – wirnik, 5 – obudowa

Fig. 3. Rotary brake with the magnetorheological fluid: 1 – coil, 2 – magnetorheological fluid, 3 – shaft, 4 – rotor, 5 – casing, 6 – wires of coil

Na elemencie ruchomym lub w odbudowie przetwornika – w zależności od typu konstrukcji – umieszcza się cewkę zasilaną prądem. Prąd przepływający przez cewkę wytwarza strumień magnetyczny przenikający przez warstwę cieczy znajdującej się pomiędzy obudową a elementem ruchomym. Zmiana siły hamującej ruch tłoka wynika ze zmiany lepkości cieczy, która znajduje się w szczelinie pomiędzy obudową a elementem ruchomym przetwornika elektromechanicznego. Zmiany lepkości cieczy dokonuje się poprzez sterowanie polem magnetycznym wytworzonym przez prąd przepływający przez cewkę.

Hamulce zawierające ciecz magnetoreologiczną charakteryzują się możliwością wytworzenia praktycznie stałego momentu hamującego w całym zakresie prędkości hamulca  $n=0 \div n_{max}$ .



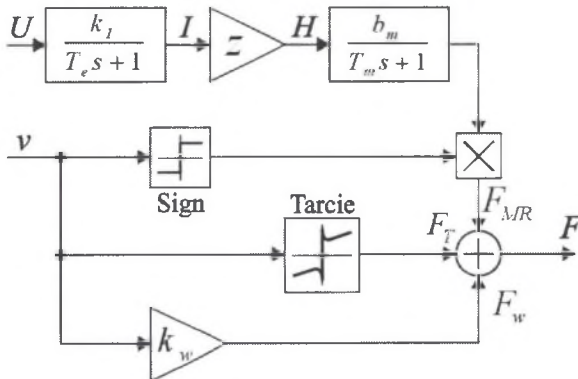
Rys. 4. Tłumik liniowy z cieczą magnetoreologiczną: 1 - przewody zasilające cewkę, 2 - tłoczyisko, 3 - ciecz magnetoreologiczna, 4 - tłok, 5 - szczelina, 6 - cewka, 7 - akumulator gazowy

Fig. 4. Linear damper with the magnetorheological fluid: 1 - wires of coil, 2 - rod, 3 - magnetorheological fluid, 4 - piston, 5 - choke, 6 - coil, 7 - gas accumulator

Tłumiki liniowe z cieczą magnetoreologiczną (tłumiki magnetoreologiczne) są tłumikami semiaktywnymi. Niezasilany tłumik wytwarza siłę hamującą  $F_0$ , co powoduje, że możliwość sterowania prądem (polem magnetycznym) dotyczy niepełnego zakresu siły hamującej.

### 3.2. Magnetoreologiczny tłumik liniowy – model dynamiczny

W celu analizy tłumika magnetoreologicznego stworzono jego model dynamiczny [5,6], w którym uwzględniono trzy źródła siły hamującej wytwarzanej przez tłumik: siłę sterowaną polem magnetycznym (napięciem)  $F_{MR}$ , siłę tarcia  $F_T$ , oraz siłę oporu lepkościowego  $F_w$  ( $F_T + F_w = F_0$ ).



Rys. 5. Model dynamiczny magnetoreologicznego tłumika liniowego

Fig. 5. Dynamic model of the magnetorheological linear damper

W członie modelu generującym siłę  $F_{MR}$  uwzględniono właściwości dynamiczne obwodu elektrycznego i efektu zmian granicznych naprężeń stycznych  $\tau_0(B)$ , przy założeniu liniowości obwodu magnetycznego tłumika oraz liniowości charakterystyki  $\tau_0(B)$ .

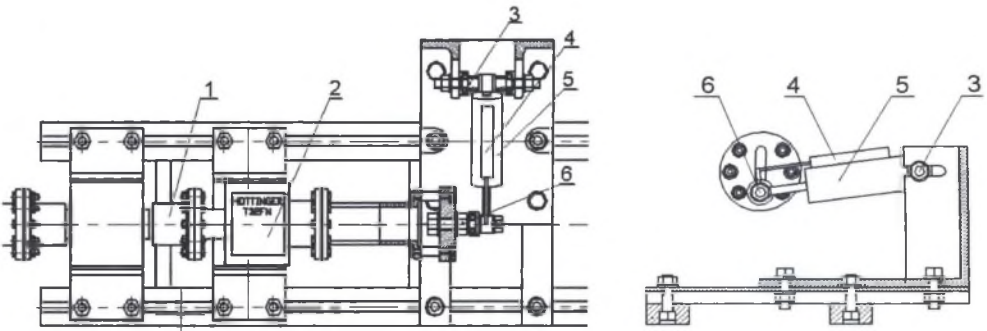
W prezentowanym modelu (rys.5) występują następujące wielkości:  $b_m$  – współczynnik zależny od granicznych naprężeń stycznych w cieczy ( $\tau_0(B)$ ) i geometrii tłumika,  $F$  – siła hamująca wytwarzana przez tłumik,  $H$  – natężenie pola magnetycznego,  $I$  – prąd cewki tłumika,  $k_f = I/R$  – współczynnik proporcjonalności,  $k_w$  – współczynnik tłumienia lepkościowego ( $k_w \sim \mu$ ),  $L$  – indukcyjność cewki tłumika,  $R$  – rezystancja cewki tłumika,  $T_e = L/R$  – stała czasowa obwodu elektrycznego cewki tłumika,  $T_m$  – stała czasowa zmian lepkości cieczy,  $U$  – napięcie zasilania cewki tłumika,  $v$  – prędkość tłoka tłumika,  $z$  – liczba zwojów cewki tłumika.

#### 4. BADANIE ELEKTROMECHANICZNYCH PRZETWORNIKÓW MAGNETOREOLOGICZNYCH O JEDNYM STOPNIU SWOBODY

##### 4.1. Magnetoreologiczny tłumik liniowy - stanowisko badawcze

Stanowisko do badania magnetoreologicznego tłumika liniowego musi umożliwiać pomiar następujących wielkości:

- napięcia i prądu cewki (obwód elektryczny),
- siły hamującej i prędkości tłoka (układ mechaniczny).

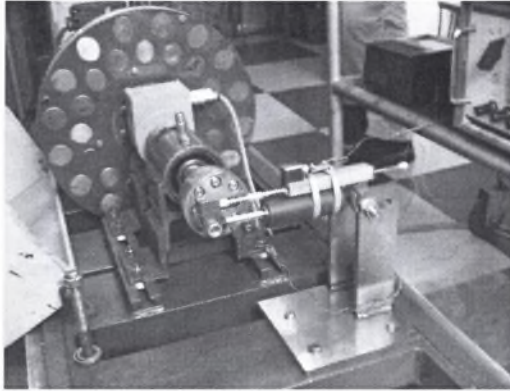


Rys. 6. Konstrukcja stanowiska do badania magnetoreologicznego tłumika liniowego: 1) wał napędzany przez silnik indukcyjny, 2) momentomierz Hottinger, 3) przegub mocujący korpus tłumika do konstrukcji stanowiska, 4) rezystancyjny czujnik położenia, 5) tłumik liniowy firmy *Lord Corporation*, 6) mimośrodkowe zamocowanie tłoczyska do wału

Fig. 6. Construction of measurement equipment: 1) shaft moved by induction motor, 2) torque sensor (Hottinger), 3) articulation fastening housing damper to the construction of measurement equipment, 4) resistance sensor of piston travel, 5) linear damper made by *Lord Corporation*, 6) eccentric articulation of the damper's rode to the shaft

Konstruując stanowisko do pomiaru siły hamującej magnetoreologicznego tłumika liniowego firmy *Lord Corporation* wykorzystano stanowisko do pomiaru momentu obrotowego (rys.6), dobudowując do niego element mocujący tłumik. Stanowisko do pomiaru momentu obrotowego zawiera momentomierz *Hottinger*, który stanowi element wału napędowego (pomiar momentu metodą tensometryczną z wykorzystaniem wałka skrętnego). Silnik indukcyjny, będący źródłem momentu obrotowego, napędza wał, do którego zamocowano mimośrodkowo tłoczysko tłumika. Dzięki temu połączeniu moment obrotowy jest

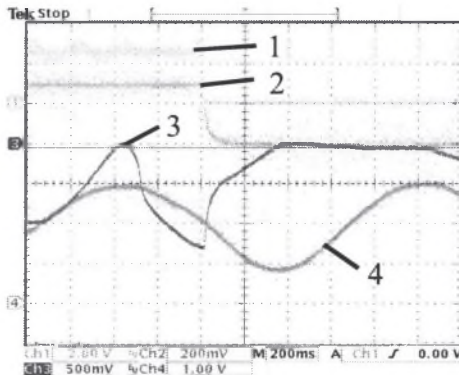
przetwarzany na siłę liniową wymuszającą ruch liniowy tłoka. Korpus tłumika jest zamocowany na przegubie do konstrukcji stanowiska. Pomiar przemieszczenia tłoka, a także pomiar prędkości przemieszczenia tłoka odbywa się za pomocą rezystancyjnego czujnika położenia, przymocowanego do tłumika. Zasilając silnik z falownika napięcia można regulować prędkość obrotową silnika, a co za tym idzie - prędkość liniową tłoka.



Rys. 7. Stanowisko do badania tłumika magnetoreologicznego  
Fig. 7. Measurement equipment of the magnetorheological damper

#### 4.2. Magnetoreologiczny tłumik liniowy - wyniki pomiarów

Na skonstruowanym stanowisku badawczym (rys.7) dokonano rejestracji przebiegów napięcia zasilania cewki tłumika  $u(t)$ , prądu cewki tłumika  $i(t)$ , momentu hamującego  $M(t)$  i przemieszczenia tłoka  $x(t)$  (rys. 8).



Rys. 8. Zarejestrowane przebiegi napięcia zasilania cewki tłumika  $u(t)$  (1), prądu tłumika  $i(t)$  (2), momentu hamującego  $M(t)$  (3) i przemieszczenia tłoka  $x(t)$  (4)

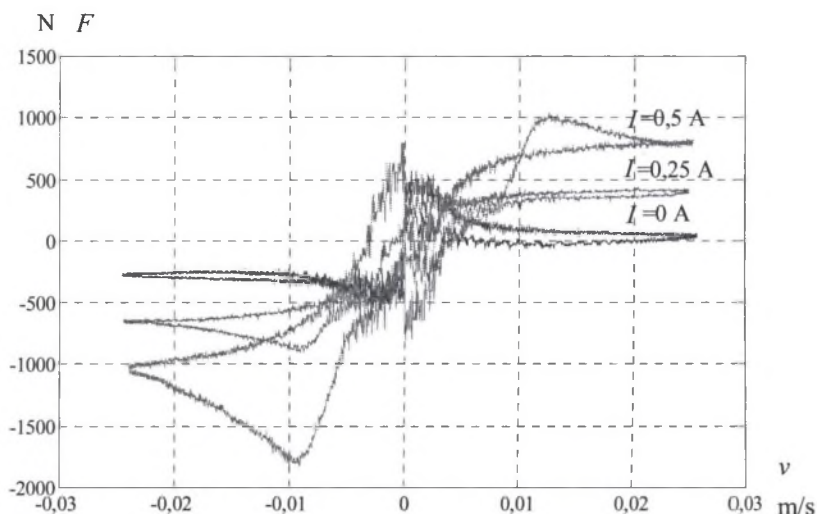
Fig. 8. Record diagrams of damper coil voltage  $u(t)$  (1), damper coil current  $i(t)$  (2), braking torque  $M(t)$  (3) and piston travel  $x(t)$  (4)

Następnie – wykorzystując program *MATLAB* – odfiltrowano zakłócenia z przebiegu przemieszczenia  $x(t)$  i obliczono prędkość liniową tłoka  $v(t)$ . Na podstawie przebiegu

przemieszczenia tłoka  $x(t)$  i znajomości parametrów geometrycznych układu pomiarowego, z przebiegu momentu  $M(t)$  wyznaczono przebieg siły tłumienia  $F(t)$  wytwarzanej przez tłumik.

#### 4.2.1. Pomiary przy ustalonej wartości prądu cewki (statyczne)

Na rysunku 9, przedstawiono charakterystykę mechaniczną, tj. zależność siły tłumienia  $F(v)$  od prędkości liniowej tłoka, dla różnych prądów cewki tłumika [2]. Charakterystyka ta jest podstawową charakterystyką tłumika.



Rys. 9. Charakterystyka mechaniczna – zależność siły tłumienia  $F(v)$  od prędkości liniowej dla różnych prądów cewki tłumika

Fig. 9. Mechanical characteristic – braking force curves  $F(v)$  versus linear speed of piston by different currents of the damper's coil

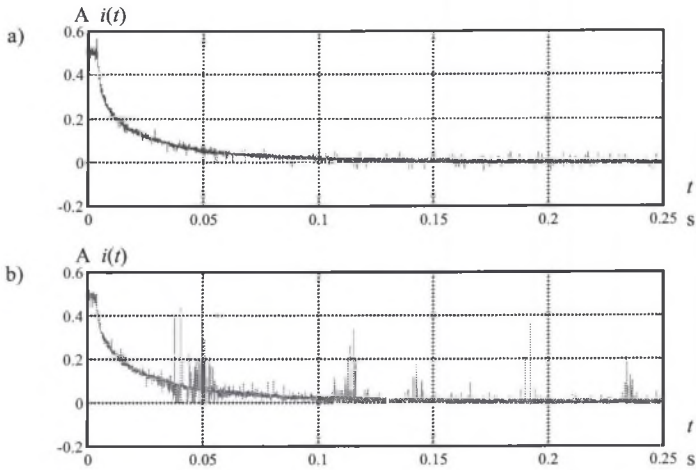
Niesymetryczność charakterystyki mechanicznej tłumika względem punktu  $(0,0)$  wynika z siły generowanej przez akumulator gazowy, dążącej do wysunięcia tłoka. Przy zmianie kierunku przemieszczenia tłoka następują zanikające oscylacyjne zmiany siły (rys. 9), wynikające ze sprężystego oddziaływania układu mocowania tłumika. Po zaniku oscylacji wartość siły tłumienia  $F$  w niewielkim stopniu zależy od prędkości tłoka  $v$ .

#### 4.2.2. Pomiary przy zmianie prądu tłumika (dynamiczne)

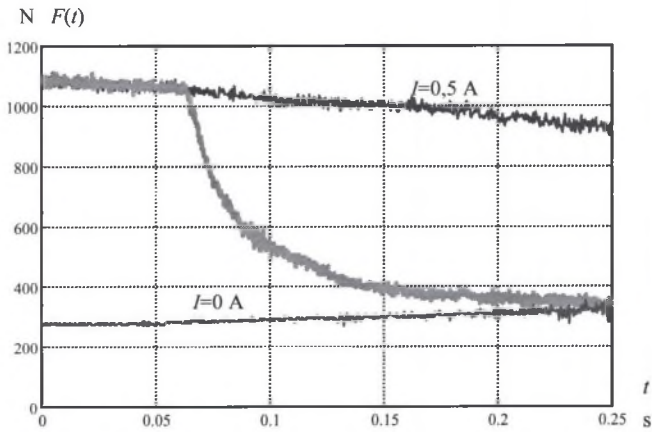
Pomiarów stanów dynamicznych dokonano przy zaniku prądu zasilającego cewkę tłumika. Stan ten uzyskano przez zwarcie odvodu cewki tłumika.

W pierwszej fazie pomiarów dokonano rejestracji przebiegów prądu cewki  $i(t)$  zarówno przy zatrzymanym tłoku (rys. 10a), jak i przy ruchu tłoka (rys. 10b) [3].

Prąd cewki tłumika zmienił się w zakresie  $I=0,5 \div 0$  A. Zaobserwowano nieco wolniejsze zmiany prądu przy ruchu tłumika, wynikające z faktu mniejszego nasycenia poruszającej się cieczy magnetycznej, wobec czego indukcyjność obwodu magnetycznego w tym przypadku jest większa, a co za tym idzie - większa jest też stała czasowa obwodu elektrycznego cewki  $T_e=L/R$ .



Rys. 10. Zanik prądu zasilającego cewkę tłumika  $i(t)$ : a) przy zatrzymanym tłoku, b) przy ruchu tłoka  
 Fig. 10. Damper's coil current decay  $i(t)$ : a) by fixed piston's position, b) by piston's motion

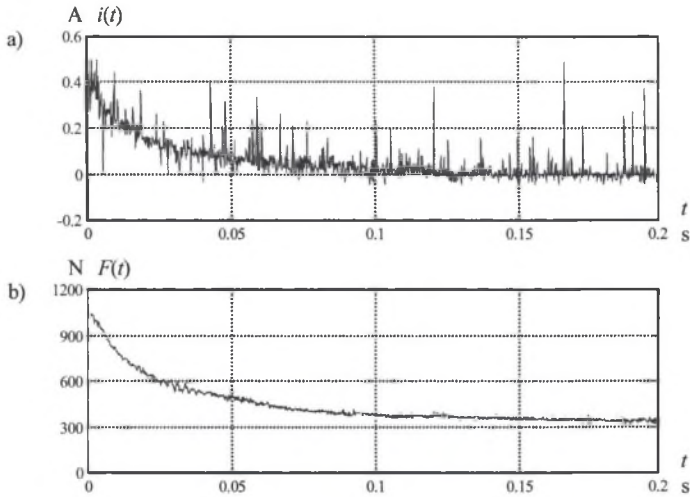


Rys. 11. Przebieg siły tłumiącej  $F(t)$  dla ustalonych prądów cewki tłumika oraz dla zaniku prądu  
 Fig. 11. Diagrams of damping force  $F(t)$  for fixed currents of damper's coil and for current decay

W kolejnym etapie pomiarów dynamicznych tłumika dokonano rejestracji przebiegów napięcia zasilania cewki tłumika  $u(t)$ , prądu cewki tłumika  $i(t)$ , momentu hamującego  $M(t)$  i przemieszczenia tłoka  $x(t)$  (rys. 8). Następnie podobnie jak dla pomiarów statycznych wyznaczono wartość siły hamującej  $F(t)$  (rys. 11). Tak jak w pierwszej fazie pomiarów prąd cewki tłumika zmienił się w zakresie  $I=0,5 \pm 0$  A. Pomiarów dokonano przy prędkości zmieniającej się w nieznacznym zakresie. Utrzymanie stałej prędkości tłoka jest niemożliwe ze względu na rodzaj ruchu, jaki wykonuje tłocznik tłumika. Przebiegi prądu zasilającego cewkę tłumika  $i(t)$  oraz odpowiadający mu przebieg siły hamującej  $F(t)$  zestawiono na rys. 12. Przebieg siły  $F(t)$  (rys. 12b) jest zbliżony z odpowiedzią elementu inercyjnego drugiego rzędu.



W przebiegach prądu  $i(t)$  na rys. 10 i 12 widoczne są zakłócenia pochodzące od falownika napięcia.



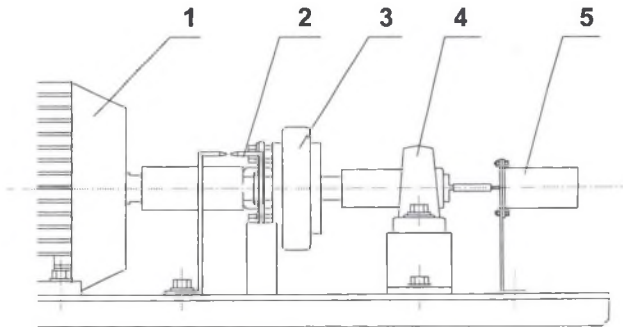
Rys. 12. Zanik prądu zasilającego cewkę tłumika  $i(t)$  – a) oraz odpowiadający mu przebieg siły hamującej  $F(t)$  – b)

Fig. 12. Current decay of the damper's coil  $i(t)$  – a) and corresponded to it transient of the braking force  $F(t)$  – b)

#### 4.3. Hamulec magnetoreologiczny - stanowisko badawcze

Badanie hamulca magnetoreologicznego jest związane z pomiarami na stanowisku badawczym następujących wielkości:

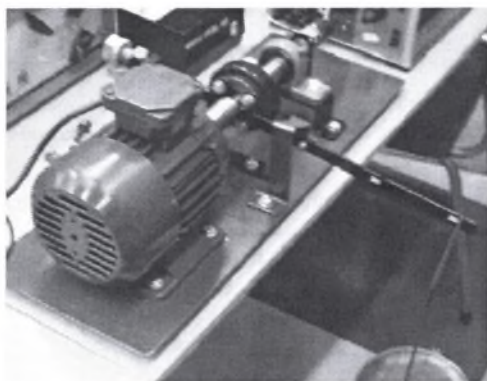
- prądu cewki hamulca (obwód elektryczny),
- momentu hamującego i prędkości obrotowej wału (układ mechaniczny).



Rys.13. Konstrukcja stanowiska do badania hamulca magnetoreologicznego: 1 – silnik indukcyjny, 2 – waga, 3 – hamulec magnetoreologiczny, 4 – zespół łożyskowy, 5 – prądnica tachometryczna

Fig. 13. Construction of measurement equipment of the magnetorheological brake: 1 – induction motor, 2 – scales, 3 - magnetorheological brake, 4 – bearing, 5 – rate generator

Stanowisko do badania hamulca magnetoreologicznego składa się z silnika indukcyjnego, hamulca magnetoreologicznego, wagi i zespołu łożyskowego (rys. 13,14). Elementy ruchome wszystkich wymienionych części są ze sobą połączone i stanowią wspólny wał. Silnik indukcyjny zasilany z falownika stanowi źródło momentu obrotowego, charakteryzujące się możliwością regulacji prędkości obrotowej. Zasilanie hamulca magnetoreologicznego z regulowanego źródła napięcia stałego daje możliwość sterowania momentem hamującym wytwarzanym przez hamulec. Ułożyskowanie wału za pomocą dodatkowego zespołu łożyskowego umożliwia zamocowanie wagi na obudowie hamulca – dzięki dodatkowemu ułożyskowaniu obudowa hamulca nie musi być przymocowana do podstawy stanowiska. Waga składa się z ramienia pomiarowego, na którym umieszcza się szalkę z odważnikami, oraz z przeciwwagi równoważącej ciężar szalki i ramienia pomiarowego. Wagę wykorzystuje się wyłącznie do pomiaru momentu statycznego (przy stałej prędkości obrotowej). Pomiar prędkości obrotowej odbywa się za pomocą prądnicy tachometrycznej, połączonej z wałem układu poprzez sprzęgło elastyczne.



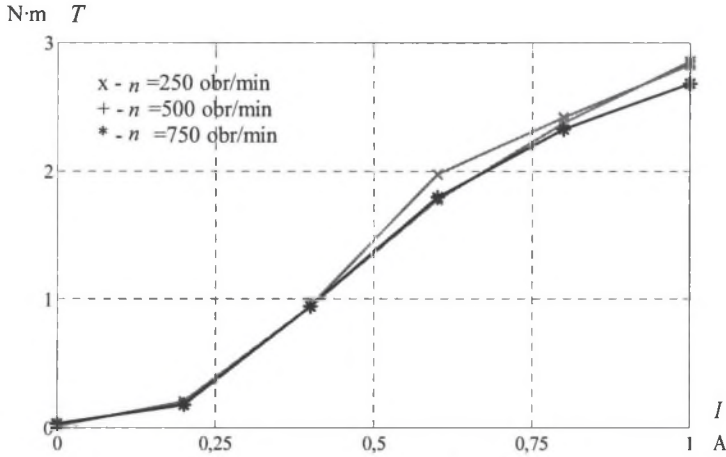
Rys. 14. Stanowisko do badania hamulca magnetoreologicznego  
Fig. 14. Measurement equipment of the magnetorheological brake

#### 4.4. Hamulec magnetoreologiczny- wyniki pomiarów

Na przedstawionym stanowisku pomiarowym dokonano pomiarów momentu hamującego  $M$  wytwarzanego przez hamulec. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 15, 16. Pomiarów dokonano dla dwóch przypadków:

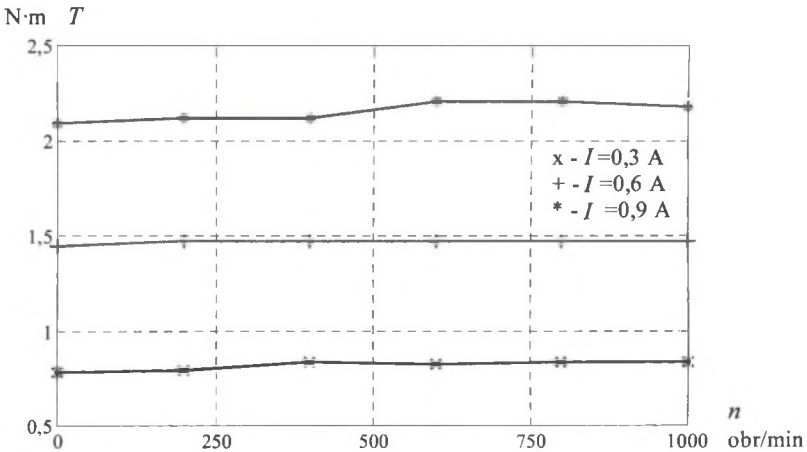
- pomiar momentu hamującego  $M(I)$  w funkcji prądu zasilającego hamulec, przy stałej prędkości obrotowej  $n = \text{const.}$  (rys. 15),
- pomiar momentu hamującego  $M(n)$  w funkcji prędkości obrotowej, przy stałej wartości prądu zasilającego hamulec  $I = \text{const.}$  (rys. 16).

Na kształt charakterystyki momentu hamującego  $M(I)$  w funkcji prądu zasilającego hamulec mają wpływ nieliniowości charakterystyki magnesowania obwodu magnetycznego hamulca oraz nieliniowości charakterystyki granicznych naprężeń stycznych w cieczy  $\tau_0(B)$ . Zakres regulacji momentu hamującego obejmuje praktycznie pełen zakres momentu wytwarzanego przez hamulec (rys. 15). Moment hamujący jest w niewielkim stopniu zależny od prędkości obrotowej, co stanowi dużą zaletę hamulca magnetoreologicznego (rys. 16).



Rys. 15. Moment hamującego  $M(I)$  w funkcji prądu zasilającego hamulec, przy stałej prędkości obrotowej  $n = \text{const}$

Fig. 15. Braking torque  $M(I)$  curves versus current of brake's coil, by the constant rotor speed  $n = \text{const}$



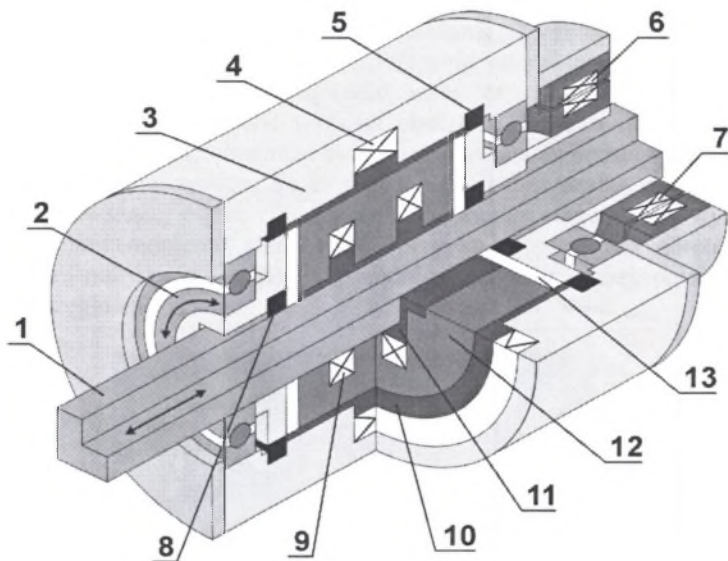
Rys. 16. Moment hamujący  $M(n)$  w funkcji prędkości obrotowej, przy stałej wartości prądu zasilającego hamulec  $I = \text{const}$

Fig. 16. Braking torque  $M(n)$  curves versus rotor speed, by the constant current of brake's coil  $I = \text{const}$

## 5. KONCEPCJA ELEKTROMECHANICZNEGO PRZETWORNIKA MAGNETOREOLOGICZNEGO O DWÓCH STOPNIACH SWOBODY

W związku z prowadzonymi badaniami dotyczącymi napędów o dwóch stopniach swobody [8,9] oraz na podstawie prezentowanych wyników badań przetworników elektromagnetycznych z cieczami magnetoreologicznymi powstała koncepcja magnetoreologicznego hamulca obrotowo-liniowego – przetwornika elektromechanicznego o dwóch stopniach swobody.

Istotą konstrukcji magnetoreologicznego hamulca obrotowo-liniowego (rys. 17) jest zintegrowanie w jednym urządzeniu dwóch przetworników elektromechanicznych: magnetoreologicznego hamulca obrotowego i magnetoreologicznego hamulca liniowego.



Rys. 17. Magnetoreologiczny hamulec obrotowo-liniowy: 1 – wał, 2 – łożysko obrotowe, 3 – korpus (rdzeń ferromagnetyczny) hamulca obrotowego, 4 – cewka hamulca obrotowego, 5 – uszczelnienie hamulca obrotowego, 6 – uzwojenie pierwotne transformatora obrotowego zasilającego cewki hamulca liniowego, 7 – uzwojenie wtórne transformatora obrotowego zasilającego cewki hamulca liniowego, 8 – uszczelnienie hamulca liniowego, 9 – cewka hamulca liniowego, 10,11 – ciecz magnetoreologiczna, 12 – korpus (rdzeń ferromagnetyczny) hamulca liniowego, 13 – prowadnice wału

Fig. 17. Magnetorheological rotary-linear brake: 1 - shaft, 2 - bearing, 3 - housing of the rotary brake (ferromagnetic core), 4 - rotary brake's coil, 5 - seal of the rotary brake, 6 - primary windings of the rotary transformer supplying coils of the linear brake, 7 - secondary of the rotary transformer supplying coils of the linear brake, 8 - seal of the linear brake, 9 - linear brake's coil, 10,11 - magnetorheological fluid, 12 - housing of the linear brake (ferromagnetic core), 13 - shaft's ways

Pierwszy zintegrowany przetwornik elektromechaniczny - magnetoreologiczny hamulec obrotowy - jest typową konstrukcją hamulca obrotowego z cieczą magnetoreologiczną o wirniku walcowym i z cewką umieszczoną w obudowie. Wirnik hamulca obrotowego stanowi obudowa (korpus) hamulca liniowego. Dzięki zastosowaniu wału w kształcie prostopadłościanu (o przekroju kwadratowym) moment obrotowy, działający na wał, jest przekazywany na obudowę hamulca liniowego.

Drugi zintegrowany magnetoreologiczny przetwornik elektromechaniczny - magnetoreologiczny hamulec liniowy - jest konstrukcją odmienną od spotykanych w literaturze oraz od dostępnych na rynku semiaktywnych magnetoreologicznych tłumików liniowych [6,10,11]. Jego budowa nawiązuje do konstrukcji hamulca obrotowego i stanowi rozwinięcie tej konstrukcji. W hamulcu liniowym źródłem pola magnetycznego jest prąd, przepływający przez dwie cewki umieszczone nad dwoma przeciwległymi bokami wału. Przestrzenie pomiędzy dwoma pozostałymi bokami wału i korpusem hamulca stanowią kanały wyrównujące różnice

ciśnienia cieczy pomiędzy krańcami hamulca, które to różnice ciśnień powstają na skutek poruszania się tłoka. Cewki hamulca liniowego są zasilane poprzez transformator obrotowy, którego uzwojenie pierwotne jest przymocowane do korpusu hamulca obrotowego, natomiast uzwojenie wtórne – zasilające cewki hamulca liniowego – jest przymocowane do korpusu hamulca liniowego.

Magnetoreologiczny hamulec obrotowo-liniowy umożliwia zmianę zarówno momentu hamującego w ruchu obrotowym, jak i siły hamującej w ruchu liniowym. Z tego względu urządzenie to może być wykorzystywane, w zależności od potrzeb, jako klasyczny hamulec obrotowy albo hamulec liniowy, bądź jako hamulec obrotowo-liniowy do współpracy z urządzeniami wykonującymi złożony ruch rotacyjno – posuwisty. Hamulec jest urządzeniem przeznaczonym do obciążania i badania niekonwencjonalnych napędów o dwóch stopniach swobody. Może on również w przyszłości znaleźć zastosowanie jako „inteligentny moduł” złożonych układów napędowych i systemów mechatronicznych.

## LITERATURA

1. Chrzan M. J., Carlson J. D.: *MR Fluid Sponge Devices and Their Use in Vibration Control of Washing Machines*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2001.
2. Kowol P., Kwiatkowski D.: *Magnetoreologiczny tłumik liniowy jako element systemu mechatronicznego – stanowisko badawcze, wyniki pomiarów*. X Sympozjum PPEE'2003, Wiśła, 7-10 grudnia 2003r. Gliwice.2003,s.195-198.
3. Kowol P., Szczygieł M.: *Badanie właściwości dynamicznych układu hamulcowego z tłumikiem magnetoreologicznym*. X Seminarium Napęd i Sterowanie 2004, Gdańsk, 18-19 lutego 2004r. Gdańsk 2004, s.158-165.
4. Ławniczak A., Milecki A.: *Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice*. Politechnika Poznańska, Poznań 1999.
5. Milecki A.: *Modelowanie i symulacje właściwości dynamicznych tłumików z cieczą magnetoreologiczną*. VII ZKwE'2002, Poznań/Kiekrz 2002, Poznań 2002, s. 541-544.
6. Milecki A., Sędziak D.: *Modelowanie i sterowanie tłumików z cieczą magnetoreologiczną*. VIII ZKwE'2003, Poznań/Kiekrz 2003, Poznań 2003, s. 557-560.
7. Spencer B.F. Jr., Dyke S.J., Sain M.K, Carlson J.D.: *Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper*. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1996.
8. Szczygieł M.: *Multi-Degree Electromechanical Devices – New Promising Mechatronic Components* 4<sup>th</sup> International Workshop on Research and Education in Mechatronics 2003, Bochum 2003, s. 71-78.
9. Szczygieł M., Kowol P.: *Koncepcja uniwersalnego stanowiska do badania przetworników elektromechanicznych o dwóch stopniach swobody*. X Seminarium Napęd i Sterowanie 2004, Gdańsk 18-19 lutego 2004. Gdańsk 2004, s. 376-381.
10. Szelaż W.: *Przetworniki elektromechaniczne z cieczą magnetoreologiczną*. VII ZkwE'2002, Poznań/Kiekrz 2002, Poznań 2002, s. 1-4.
11. Materiały informacyjne firmy LORD Rheonetic™: [www.rheonetic.com](http://www.rheonetic.com).

Recenzent: Dr hab. inż. Wojciech Szelaż, prof. Pol. Poznańskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 14 maja 2004 r.

## Abstract

The magnetic fluid is a material which viscosity changes (increases) in the presence of an external magnetic field. This property is used in many devices but mainly in linear dampers (fig. 4) and rotary brakes (fig. 3). The phenomenon of change viscosity of magnetic fluid

(fig. 1,2) is described in this paper. Research problem of semi-active magnetorheological linear damper and magnetorheological rotary brake, and also measurement equipment for these devices (fig. 6,7,13,14) are presented. For the linear damper results of the measurement are shown: a braking force for different fixed current of damper's coil (fig. 9,11), and by current decay (fig. 11,12b), and of damper's coil current decay by fixed piston's position and for piston's motion (fig. 10,12a). For the rotary brake braking torque curves versus rotor speed by the constant current of brake's coil (fig. 15) and braking torque curves versus current of brake's coil for constant rotor speed (fig. 16) are presented. At the end of the article a conception of magnetorheological rotary-linear brake (devices with two degrees of mechanical freedom) is presented (fig. 17).