

Jerzy BAJKOWSKI<sup>1</sup>

## STANOWISKO BADAWCZO-DYDAKTYCZNE DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW PRZEKŁADNI ZE SPRZĘGŁEM I HAMULCEM MAGNETOREOLOGICZNYM

**Streszczenie.** W pracy zaprezentowano materiał niezbędny do przeprowadzenia jednego z ćwiczeń *laboratorium modelowania i badania maszyn*, będącego jednym z elementów nauczania przedmiotu *podstawy konstrukcji maszyn*. Do wykonania ćwiczenia wykorzystuje się stanowisko laboratoryjne powstałe w związku z wykonywanym projektem badawczym. Studenci zapoznają się z cieczami sterowanymi polem magnetycznym, poznają budowę i zasadę pracy tłumików, sprzęgieł i hamulców magnetoreologicznych oraz właściwości wyróżniające te urządzenia. Korzystając ze stanowiska badawczego, samodzielnie wykonują odpowiednie pomiary wartości przenoszonego momentu sił, przy różnych wartościach natężenia pola magnetycznego. W końcowym sprawozdaniu, oprócz prezentacji otrzymanych rezultatów, studenci przeprowadzają ich indywidualną analizę.

**Słowa kluczowe:** tłumik obrotowy, sprzęgło, hamulec, ciecz magnetoreologiczna

## THE EXPERIMENTAL DIDACTIC STAND FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE GEAR WITH MAGNETORHEOLOGICAL CLUTCH AND BRAKE

**Summary.** In this paper the laboratory stand, designed to be used as a part of the Laboratory of Machine Design and Research which is part of the subject Fundamentals of Machine Design, is presented. Originally the laboratory stand was designed as an element of one of the research projects, and the adopted for didactic purposes. The students have the chance to get familiar with unique type of fluids controlled by the magnetic field and their application in the special purpose devices. The laboratory stand allows to conduct individual measurements of the torque, for different coil currents which generate the magnetic field. In the final report students provide the results with the individual analysis of the system parameters.

**Keywords:** rotary damper, clutch, brake, magnetorheological fluid

---

<sup>1</sup> Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, e-mail: jba@simr.pw.edu.pl.

## 1. GENEZA, PRZEDMIOT I CEL BADAŃ

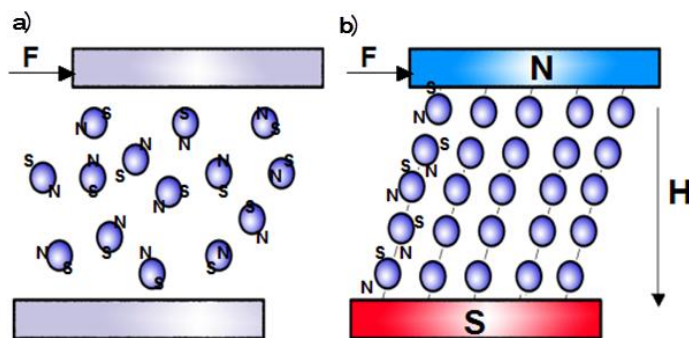
W ramach jednego z projektów badawczych, jaki realizowano w Instytucie Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej, zaistniała konieczność skonstruowania obrotowych tłumików, sprzęgieł i hamulców magnetoreologicznych, które charakteryzują się różniącymi je od konstrukcji standardowych właściwościami i parametrami. Zbudowane stanowisko badawcze zostało włączone jako jedno z ćwiczeń dydaktycznych do realizacji zajęć *laboratorium modelowania i badania maszyn*, w ramach kompleksowej realizacji bloku przedmiotowego *podstawy konstrukcji maszyn*, prowadzonego dla studentów studiów magisterskich.

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości, jakimi charakteryzują się ciecze magnetoreologiczne (MR), budowy, zasady działania obrotowych sprzęgieł i hamulców MR, a także warunków pracy oraz metod wyznaczania parametrów układu napędowego ze wspomnianym sprzęgłem. W ramach realizacji ćwiczenia studenci w bezpośredni sposób przekonują się o tym, że podstawowe wymagania, jakimi powinny charakteryzować się sprzęgła, kształtujące zazwyczaj warunki pracy układu napędowego, oraz sterowanie nimi, zarówno wartością prędkości obrotowej, jak i przenoszonego momentu, w łatwy sposób mogą być zrealizowane za pomocą konstrukcji wykorzystujących ciecze sterowalne. W sprzęgłach magnetoreologicznych, zaliczanych do grupy sprzęgieł sterowanych elektromagnetycznie, rolę łącznika podatnego części biernej i czynnej spełnia ciecz o specjalnych właściwościach. Ciecz ta zmienia swoje parametry lepkościowe pod wpływem pola magnetycznego, umożliwiając sterownie sprzęgłem.

## 2. CIECZ MAGNETOREOLOGICZNA

Ciecze MR są zawiesiną podatnych magnetycznie cząstek żelaza, tworzących dipole magnetyczne, w niemagnetycznej cieczy nośnej, którą może być olej syntetyczny hydrokarbonowy, silikonowy, a nawet woda. Przy braku zewnętrznego pola magnetycznego, w tak zwanym stanie wyłączonym, momenty magnetyczne związane z każdą cząstką cieczy są zorientowane przypadkowo i wypadkowy wektor magnetyczny ma wartość zerową (rys. 1a). W tym stanie charakterystyka cieczy MR jest zbliżona do cieczy newtonowskiej (rys. 2).

W przypadku wystąpienia pola magnetycznego ciecz przechodzi w stan aktywny. Dipole magnetyczne, znajdujące się w obszarze działania pola, ustawiają się zgodnie z jego liniami sił (rys. 1b). Cząsteczki tworzą struktury przypominające łańcuchy. Rozerwanie takiej struktury wymaga użycia dodatkowych sił, co objawia się jako wzrost pozornej lepkości cieczy. Zmianie ulega naprężenie styczne i pojawia się pozorna granica plastyczności (rys. 2) [1]. Zanik pola magnetycznego powoduje powrót cieczy do stanu pierwotnego. Co ważne, zmiany stanu jest bardzo szybkie (rzędu kilkunastu milisekund) i całkowicie odwracalne. Im większe natężenie pola magnetycznego  $H$  (a tym samym indukcja  $B$ ), tym większe jest naprężenie łańcuchów utworzonych z cząsteczek ferromagnetycznych i tym samym większa jest lepkość cieczy. Jeśli naprężenia styczne w cieczy nie przekroczą naprężeń granicznych  $\tau_0(B)$ , to ciecz nie płynie i zachowuje się jak ciało sprężyste. W stanie aktywnym ciecz MR ma charakterystykę płynu nienewtonowskiego.



Rys. 1. Zachowanie się cieczy MR w stanie wyłączonym (a) oraz łańcuchy cząstek cieczy MR znajdującej się w polu magnetycznym (b)

Fig. 1. MR fluid in the off-state (a) and chains of particles in the on-state of the magnetic fluid (b)

Podsumowując, przedstawiona powyżej specyficzna budowa cieczy umożliwia kontrolowanie jej właściwości za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego, tak że charakterystyka naprężenia stycznego w funkcji prędkości ścinania może być liniowa (jak dla cieczy newtonowskiej) bądź nieliniowa, np. opisana modelem Bingham [1, 2]:

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

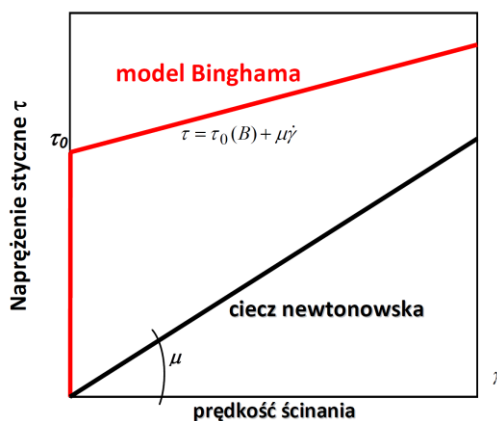
gdzie:

$\tau$  – naprężenie styczne w cieczy,

$\tau_0(B)$  – graniczna wartość naprężenia stycznego,

$\mu$  – lepkość dynamiczna cieczy,

$\gamma$  – odkształcenie postaciowe cieczy.

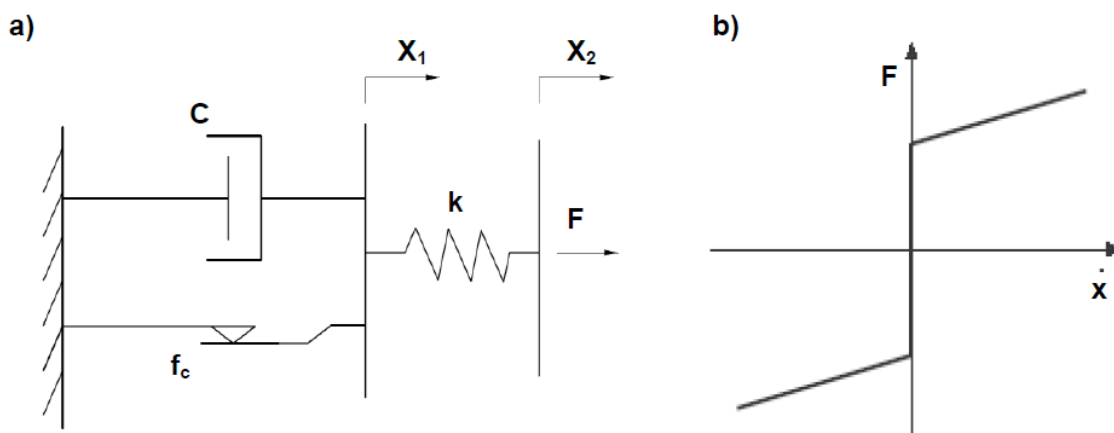


Rys. 2. Zależność naprężenia stycznego od prędkości ścinania przy braku pola magnetycznego (stan nieaktywny) lub w polu magnetycznym (stan aktywny)

Fig. 2. Yield stress over shear rate with no magnetic field and some magnetic field applied (on-state)

Na rys. 3a przedstawiono tzw. wiskoelastoplastyczny model mechaniczny ciała Bingham. Dla niewielkich wartości naprężeń model ten odwzorowuje właściwości ciała stałego, natomiast dla dużych naprężeń zachowuje się jak ciecz. Powstał on w wyniku połączenia trzech ciał doskonałych: połączonego równolegle ciała Newtona (tłumik wiskotyczny) z ciałem St. Venanta (suwak bez histerezy) oraz szeregowo połączonego z nimi ciała Hooke'a (sprężyna) [1]. W modelu tym zakłada się, że prąd zasilaający cewkę jest stały. Charakterystykę takiego ciała przedstawiono na rys. 3b. Jest ona rozdzielona na dwa obszary

przez wartość granicy plastyczności. Jeżeli wartość przyłożonej siły  $F$  nie przekracza wartości siły tarcia suchego w suwaku, wówczas rozciąganiu ulega jedynie sprężyna.



Rys. 3. Model Bingham cieczi MR (a) i jego przykładowa charakterystyka (b)  
Fig. 3. Bingham model of the MR fluid (a) and typical characteristic (b)

Dla niewielkich wartości naprężeń model ten zachowuje się jak ciało stałe (sprężyste). Opis matematyczny naprężeń stycznych tego modelu przedstawia wówczas zależność (2). Przy dostatecznie dużej wartości siły  $F$ , przekraczającej wartość siły tarcia statycznego, elementy połączone równolegle również ulegają odkształceniu. Prędkość odkształcania suwaka jest proporcjonalna do wartości przyłożonej siły. Pojawia się granica plastyczności  $\tau_{0B}$ , model zaczyna  *płynąć*, obowiązuje wówczas równanie (3).

Reologiczne równania stanu dla modelu Bingham można zapisać następująco:

$$\tau = G(B) \cdot \frac{\partial l}{\partial h} = G(B) \cdot \gamma \quad \text{dla } \tau < \tau_0 \quad (2)$$

$$\tau = \tau_{0B}(B) + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad \text{dla } \tau \geq \tau_0 \quad (3)$$

gdzie:

$G$  – moduł Kirchhoffa [Pa] (moduł sprężystości postaciowej),

$\gamma$  – gradient przesunięcia (miara odkształcenia postaciowego płynu),

$\partial h$  – wysokość prostopadłościennego wycinka cieczy ścinanej pod wpływem naprężenia stycznego,

$\partial l$  – przesunięcie górnej płaszczyzny wycinka cieczy ścinanej pod wpływem siły stycznej  $dF$ ,

$\dot{\gamma}$  – prędkość odkształcania [1/s],

$\tau$  – naprężenie styczne [Pa],

$\tau_{0B}$  – graniczne naprężenie styczne indukowane przez pole magnetyczne,

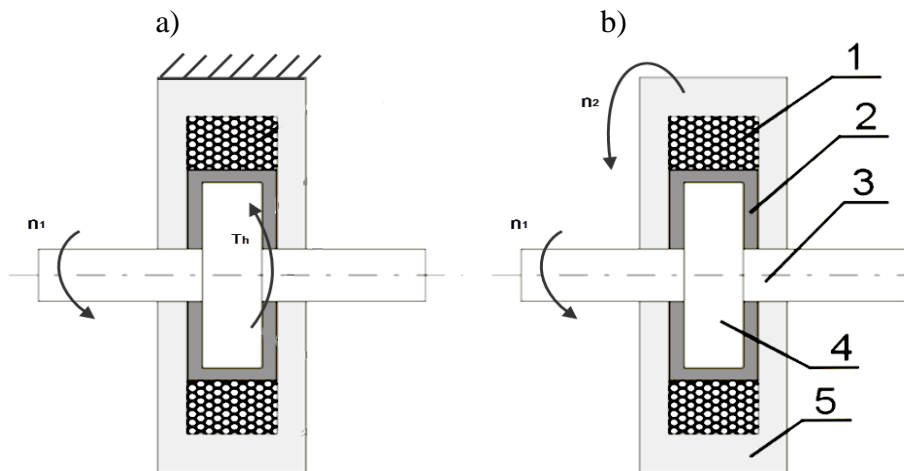
$B$  – indukcja magnetyczna [T],

$\mu_p$  – lepkość plastyczna pozorna [ $\text{Pa}\cdot\text{s} = \text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ].

### 3. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA SPRZĘGŁA MAGNETOREOLOGICZNEGO

Ciecz magnetoreologiczna znalazła zastosowania przede wszystkim w tłumikach drgań i hamulcach, ze względu na możliwość uzyskania dużych naprężeń stycznych w cieczy. Konstrukcje sprzęgieł i hamulców obrotowych pozwalają na wypełnienie cieczą przestrzeni

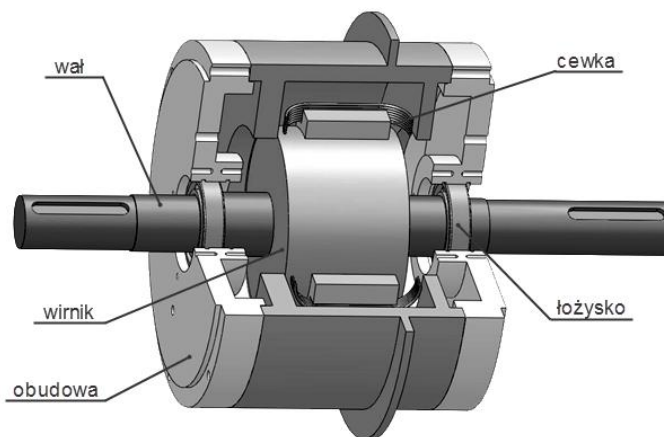
między obudową a wirnikiem. Sprzęgła MR są urządzeniami, których budowa jest podobna do hamulców MR. Hamulce MR, zasilane przez pierścienie ślizgowe bądź przez transformator obrotowy, mogą być wykorzystywane jako sprzęgła magnetoreologiczne (rys. 4) [2, 3].



Rys. 4. Hamulec obrotowy z cieczą MR (a) oraz sprzęgło z cieczą MR (b): 1 – cewka, 2 – ciecz MR, 3 – wał, 4 – wirnik, 5 – obudowa [2]

Fig. 4. Brake with MR fluid (a) and clutch with MR fluid (b): 1 – coil, 2 – MR fluid, 3 – shaft, 4 – rotor, 5 – housing [2]

W rozpatrywanym hamulcu/sprzęgle źródłem pola magnetycznego jest uzwojenie cewki (rys. 5). Strumień magnetyczny przenika przez warstwę cieczy znajdującą się w wąskiej szczelinie utworzonej pomiędzy obudową a twornikiem nieruchomo związanym z obudową. Pole magnetyczne powoduje zmianę lepkości cieczy znajdującej się w szczelinie, zwiększając w ten sposób moment hamujący/sprzęgający  $T(I)$ . Wartość momentu zależy od naprężenia granicznego  $\tau_0(B)$ , będącego z kolei funkcją indukcji magnetycznej  $B$ . Ta z kolei zależy od prądu  $I$  w uzwojeniu. Zatem wartość momentu jest sterowana prądem wzbudzenia  $I$ .



Rys. 5. Wizualizacja 3D konstrukcji hamulca lub sprzęgła magnetoreologicznego  
Fig. 5. 3D model of the magnetorheological brake or clutch assembly

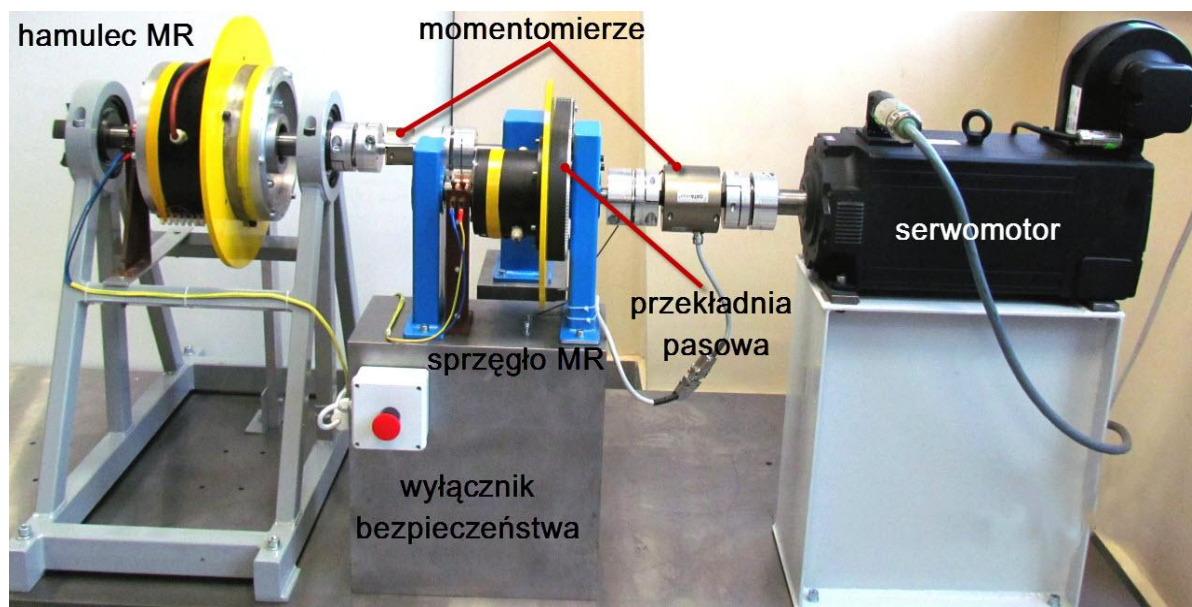
Zasadnicza różnica pomiędzy hamulcem a sprzęgłem użytym w ćwiczeniu związana jest ze zwrotem wytwarzanego momentu. Konstrukcja urządzeń jest bardzo zbliżona. W przypadku hamulca z cieczą MR obudowa urządzenia jest nieruchomo zamocowana w podporze (rys. 4a). Obracający się wirnik jest hamowany przez ciecz MR, zatem zwrot momentu jest przeciwny w stosunku do momentu rozwijanego przez silnik.

W przypadku sprzęgła z cieczą MR obudowa urządzenia może się swobodnie obracać (rys. 4b) i przekazywać moment na kolejne elementy za pomocą przekładni pasowej. Wytworzony moment obrotowy, który wprawia w ruch obudowę sprzęgła, ma taki sam zwrot momentu, jak moment rozwijany przez silnik napędowy; oba wirniki wirują w tym samym kierunku. W przypadku wystąpienia stanu przeciążenia, czyli w przypadku gdy wartość maksymalnego momentu obrotowego zostanie przekroczona, sprzęgło przestaje przenosić moment obrotowy, pełniąc wtedy funkcję sprzęgła przeciążeniowego.

Sprzęgła magnetoreologiczne odznaczają się wieloma pożądanymi właściwościami. Najważniejsze z nich to stosunkowo prosta budowa i zminimalizowana liczba części mechanicznych ulegających zużyciu w stosunku do klasycznej przekładni z tarczą cierną, a także przekładni hydrokinetycznej. Charakteryzuje je także: duża niezawodność działania, dobre tłumienie drgań i skrętnych obciążeń uderzeniowych (jeżeli zajdzie taka potrzeba poślizg może wynieść nawet 100%), mała moc sterująca oraz możliwość pracy w układach automatyki w charakterze elementu wykonawczego. Zasadniczą wadą sprzęgieł magneto-reologicznych jest nagrzewanie się czynnika roboczego, prowadzące do pogorszenia charakterystyki lepkościowej, przez co maleje sprawność układu. Sprzęgła przeznaczone do przenoszenia dużych wartości momentu obrotowego charakteryzują się także dużymi wymiarami.

#### 4. STANOWISKO BADAWCZE

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 6. Składa się ono z silnika elektrycznego, badanego sprzęgła MR, współpracującego z przekładnią z paskiem zębatym, hamulca MR i czujników pomiarowych.



Rys. 6. Układ do pomiaru charakterystyk mechanicznych sprzęgła z cieczą MR  
Fig. 6. System for measurement of the mechanical characteristics of the MR clutch

Niezależnie w trakcie badań, termopary pozwalają rejestrować przebieg nagrzewania urządzeń. Źródłem napędu jest serwomotor zasilany z przetwornicy częstotliwości (falownika napięcia), pozwalającej na sterowanie parametrami pracy napędu. Napęd przenoszony jest z wału napędowego na wał napędzany przez sprzęgło współpracujące z przekładnią z paskiem zębatym.

Obciążenie układu napędowego stanowi sterowany hamulec magnetoreologiczny, który jest odbiornikiem mocy pozwalającym na bezstopniową regulację obciążenia. Pomiar momentu przenieszonego przez sprzęgło (momentu sprzęgającego) oraz pomiar prędkości członu biernego sprzęgła są dokonywane przez momentomierze, które dodatkowo pozwalają rejestrować prędkości wałów. Sterowanie natężeniem prądu cewki sprzęgła oraz tłumika MR odbywa się za pomocą zasilaczy laboratoryjnych. Rejestracja parametrów pracy układu odbywa się za pomocą karty pomiarowej współpracującej z komputerem.

## 5. PRZEBIEG POMIARÓW

Przed przystąpieniem do pomiarów studenci zapoznają się z budową stanowiska. Należy pamiętać, że podczas badań wirujące wały mogą osiągać wysokie prędkości obrotowe, dlatego należy zachować szczególną ostrożność. W trakcie pracy z cieczą MR urządzenia ulegają rozgrzaniu, dlatego okresowo należy kontrolować temperaturę urządzeń, tak aby nie przekraczała wartości 60°C. Powyżej tej temperatury może dojść bowiem do zniszczenia cewki oraz uszczelnień.

Badania wykonuje się zgodnie z protokołem znajdującym się przy stanowisku, wykonując kolejne kroki instrukcji i wpisując rejestrowane wartości do odpowiednich tabel.

W trakcie badań należy zarejestrować:

- wartość średniego momentu hamującego  $T_h(I)$  dla hamulca MR, w zależności od wartości prądu zasilającego cewkę (0, 0,1, ... , 2,0 A), przy stałej prędkości obrotowej wału (50 obr/min),
- wartość średniego momentu sprzęgającego  $T_s(I)$  dla sprzęgła MR, w zależności od wartości prądu zasilającego cewkę, przy stałej prędkości obrotowej wału (5, 50, 300 obr/min),
- wartość prędkości wału napędowego ( $n_1$ ) oraz wału napędzanego ( $n_2$ ) przez sprzęgło z cieczą MR,
- przebiegi czasowe wszystkich rejestrowanych momentów ( $T_h$ ,  $T_s$ ), zwracając przy tym baczność uwagę na kształt charakterystyk w początkowej fazie rozruchu, w stanach przejściowych oraz w stanie ustalonym,
- okresowo wartość temperatury badanego sprzęgła oraz hamulca.

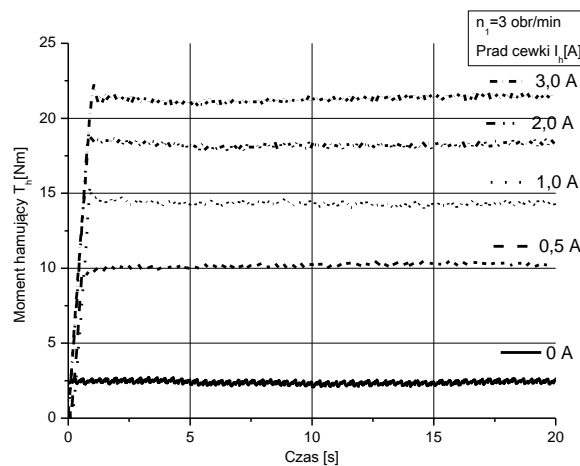
### 5.1. Uwagi dotyczące sprawozdania

W sprawozdaniu powinny znaleźć się własny, krótki opis przebiegu ćwiczenia oraz schemat stanowiska laboratoryjnego. W części opisującej wyniki badań należy zamieścić obrobione w dowolnym programie, czytelne wykresy otrzymane w trakcie badań, pamiętając o wyskalowaniu osi w odpowiednich jednostkach fizycznych oraz dołączeniu własnych przemyśleń odnośnie do otrzymanych charakterystyk. Sprawozdanie należy zakończyć wnioskami związanymi z tematyką przeprowadzonych badań. Do sprawozdania należy dołączyć protokół z badań podpisany przez prowadzącego.

## 5.2. Przykładowe wyniki badań

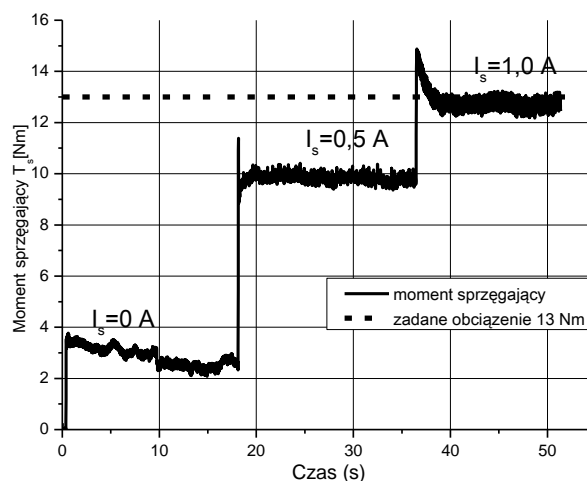
Pomiary charakterystyk hamulca polegają na rejestracji przebiegów momentu hamującego  $T_h$  dla różnych wartości natężenia prądu przepływającego w uzwojeniu cewki oraz różnych wartości prędkości obrotowych.

Podczas zwiększania natężenia prądu zasilającego hamulec MR wrasta także wartość momentu, co jest spowodowane zwiększaniem wartości pozornej granicy plastyczności aktywowanej cieczy MR. W początkowej fazie rozruchu wału obserwowane jest narastanie momentu do wartości ustalonej, spowodowane lepkością dynamiczną cieczy. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej od 0 do 3 obr/min moment wzrasta proporcjonalnie do prędkości. Po ustaleniu prędkości 3 obr/min moment osiąga wartość stałą w czasie, o niewielkiej fluktuacji (rys. 7).



Rys. 7. Moment hamujący dla różnych prądów zasilających cewkę urządzenia  
Fig. 7. Brake torque for different coil current

Pomiary stanów dynamicznych sprzęgła polegają na rejestracji przebiegów momentu sprzęgającego  $T_s$  dla załączenia i wyłączenia sprzęgła oraz na skokowych zmianach obciążenia sprzęgła zadawanych przez hamulec. Przebieg momentu przenieszonego przez sprzęgło (momentu sprzęgającego  $T_s$ ), z opisanymi zmianami dynamicznymi stanu pracy sprzęgła, przedstawiono na rys. 8.



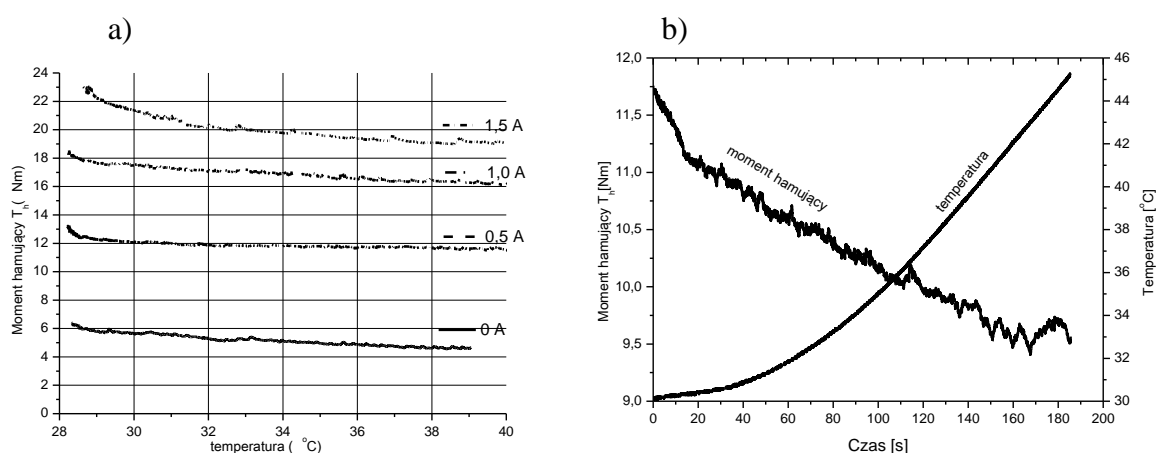
Rys. 8. Wykres momentu sprzęgającego przy różnych wartościach prądu zasilającego cewkę sprzęgła, dla obciążenia 13 Nm i prędkości obrotowej  $n_1=1000$  obr/min  
Fig. 8. Clutching torque for different coil current for the load of 13 Nm and speed  $n_1=1000$  r.p.m.



Dla niewielkich wartości natężenia prądu płynącego w cewce sprzęgła, ciecz magnetoreologiczna nie jest zdolna do przeniesienia wymaganych obciążeń (na rys. 8 jest to 13 Nm). Stopniowe zwiększanie prądu do 1,5 A powoduje zwiększenie wartości momentu sprzęgającego, aż osiągnie on wymaganą wartość 13 Nm. Analizując pomiary w stanach dynamicznych, należy zauważyć uderowe działanie momentu sił, występujące przy załączaniu i wyłączaniu sprzęgła, oraz obciążenia związane ze zmianą prędkości wirujących mas bezwładności.

Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej i rosnącym czasem pracy obserwowany jest znaczący wzrost temperatury urządzenia (rys. 7). Wpływ nagrzewania samej cewki zasilonej prądem na temperaturę obudowy jest niewielki w stosunku do wzrostu temperatury spowodowanego obracaniem się wału w cieczy o zwiększonej lepkości.

Ze wzrostem temperatury cieczy obniżeniu ulega pozorna granica plastyczności cieczy, a tym samym dochodzi do zauważalnego spadku wartości momentu hamującego lub przenieszonego momentu obrotowego (rys. 7).



Rys. 9. Spadek momentu obrotowego ze wzrostem temperatury przy różnych prądach cewki (a) oraz przebieg spadku momentu w czasie,  $I_h=0,5$  A,  $n_1=500$  obr/min (b)

Fig. 9. Decrease of the torque with the temperature for different coil current (a) and decrease of the moment in time for  $I_h=0,5$  A,  $n_1=500$  r.p.m. (b)

Wzrost wartości prędkości obrotowej powinien powodować wzrost momentu sił związany z lepkością dynamiczną cieczy. Dla niskich prędkości obrotowych, kiedy ciecz MR ulega niewielkiemu nagrzaniu, taka zależność jest słuszna. Dla wyższych prędkości wzrost temperatury jest znaczny i ma wyraźny, negatywny wpływ na wartość momentu (rys. 7a i b).

## Bibliografia

1. Kembłowski Z.: Reometria płynów nienewtonowskich. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
2. Kęsy Z.: Sprzęgła z cieczami elektro- i magnetoreologicznymi. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2007.
3. Szelaż W.: Przetworniki elektromagnetyczne z cieczą magnetoreologiczną. Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.