

Jerzy BAJKOWSKI<sup>1</sup>

## MODELOWANIE, ANALIZA DYNAMICZNA I TERMICZNA PROTOTYPU SPRZĘGŁA MAGNETOREOLOGICZNEGO

**Streszczenie.** W prezentowanej pracy zostały przedstawione i zinterpretowane rezultaty badań prototypu sprzęgła magnetoreologicznego (MR). Wyznaczone charakterystyki urządzenia ilustrują zależności momentu obrotowego sprzęgła MR od: wartości natężenia pola magnetycznego wywoływanego przez prąd płynący w uzwojeniu cewki, prędkości obrotowej wirnika urządzenia oraz temperatury cieczy MR, ulegającej nagrzewaniu w trakcie pracy. Badania zostały przeprowadzone na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym. Przeprowadzono szczegółową analizę otrzymanych rezultatów badań.

**Słowa kluczowe:** sprzęgło magnetoreologiczne, prototyp, temperatura, prędkość, charakterystyka

## MODELING, DYNAMIC AND THERMAL ANALYSIS OF THE PROTOTYPE MAGNETORHEOLOGICAL CLUTCH

**Summary.** This paper presents the complex results concerning the prototype clutch with magnetorheological (MR) fluid. The obtained characteristics depicts the dependencies between the clutch's torque and: the intensity of the magnetic field induced by the coil current, as well as the rotational speed of the rotor, and the temperature of the fluid during exploitation. The research was conducted on the dedicated laboratory stand. The detailed analysis of the results is provided in the article.

**Keywords:** magnetorheological clutch, prototype, temperature, rotational speed, characteristics

### 1. WPROWADZENIE

We współczesnych rozwiązaniach technicznych maszyn i urządzeń coraz częściej mamy do czynienia z urządzeniami, które będąc, wydawać by się mogło, perfekcyjnie już dopracowane od strony mechanicznej, otrzymują nowe możliwości eksploatacyjne, a niekiedy zyskują zupełnie nowe przeznaczenie z chwilą ich uzupełnienia dodatkowymi zespołami sterującymi. Przykładami takich konstrukcji mogą być wszelkiego rodzaju urządzenia, których podstawą działania są ciecze sterowalne. Okazuje się bowiem, że nawet tak doskonale już dopracowane konstrukcje, jak np. amortyzatory z zaworami elektro-

---

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

magnetycznymi, sprzęgła hydrokinetyczne czy tarciove, hamulce cierne lub proszkowe, mogą zyskać zupełnie nowe możliwości zastosowań praktycznych przez zmianę czynnika stanowiącego bazę wykorzystywanego zjawiska dla jego pracy lub przez ulepszenie parametrów sterowania.

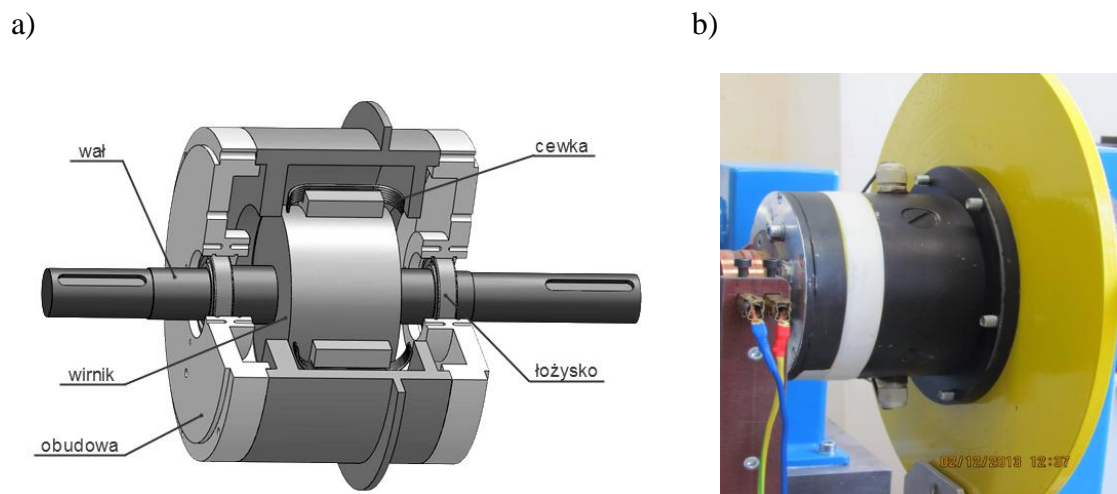
Prezentowane opracowanie jest związane z konstrukcjami, których rozwiązania w wersji stosowanej powszechnie w technice dobrze spełniają wyznaczone im zadania eksploatacyjne. Przez wykonanie często niewielkich zmian w rozwiązaniach konstrukcyjnych oraz zastosowanie innych materiałów bazowych możliwe jest nadanie takim urządzeniom zupełnie nowych możliwości, związanych ze skróceniem czasu reakcji na zadawane obciążenia, i takich cech eksploatacyjnych, które nie są możliwe do osiągnięcia bez wykorzystania ściśle dopasowanych parametrów sterowania i parametrów materiałowych. Do takich zmian, które w istotny sposób przyczyniły się do podniesienia poziomu technicznego urządzeń mechanicznych, należy zaliczyć stosowane obecnie w wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych ciecze elektoreologiczne i magnetoreologiczne kwalifikujące się do grupy materiałów „smart”. Znalazły one powszechne użycie i aktualnie są wykorzystywane w wielu urządzeniach technicznych, w zastosowaniach medycznych i innych. Szczególną rolę w grupie cieczy sterowalnych ze względu na stosunkową łatwość zmiany właściwości lepkościowych, małą wrażliwość na zanieczyszczenia, a szczególnie ze względu na krótki czas reakcji na wymuszenie odgrywają ciecze magnetoreologiczne.

Prezentowany artykuł dotyczy badań wybranych parametrów obrotowego sprzęgła, które dzięki nietypowym rozwiązaniom konstrukcyjnym i wykorzystaniu cieczy sterowanej charakteryzuje się nietypowymi możliwościami zwiększającymi jego możliwości w sterowaniu przenoszonym momentem. Rozwiązanie to zostało zgłoszone do opatentowania i w znacznym stopniu odróżnia je od podobnych prototypów urządzeń magnetoreologicznych, które były realizowane dotychczas.

## 2. PRZEDMIOT BADAŃ, CEL I ZAKRES PRACY

Przedmiotem badań w prezentowanej pracy jest prototyp sprzęgła magnetoreologicznego, w którym przez działania konstrukcyjne udało się uzyskać wielokrotnie zmniejszone wartości oddziaływania magnetyzmu szcztkowego z chwilą odłączenia zasilania cewki sprzęgła prądem. Zjawisko to ma istotny wpływ na warunki początkowe parametrów sterowania, a także w kolejnych cyklach pracy, co jest szczególnie dobrze widoczne podczas częstego załączania i wyłączania urządzenia. Należy podkreślić, iż ostateczna wersja sprzęgła, jaka została poddana szczegółowym badaniom, jest rezultatem wielu udoskonaleń konstrukcyjnych wprowadzonych we wstępnych wersjach urządzenia, które systemowo wdrożono do konstrukcji finalnej, budując i poddając je również wszechstronnym badaniom laboratoryjnym.

Zasadniczym celem prezentowanej pracy jest wyznaczenie głównych charakterystyk opracowanego prototypu sprzęgła magnetoreologicznego, którego schemat ogólny został zilustrowany na rys. 1a, natomiast jego finalną konstrukcję prezentuje model przedstawiony na rys. 1b. Celem artykułu było także zbadanie przebiegów momentu sprzęgającego w zależności od: wartości natężenia pola magnetycznego, prędkości, temperatury oraz czasu pracy. Zakres pracy ograniczono do informacji o modelu, który został wykorzystany podczas konstrukcji, oraz wyznaczenia najważniejszych charakterystyk eksploatacyjnych sprzęgła decydujących o jego parametrach eksploatacyjnych.



Rys. 1. Model 3D konstrukcji prototypowego sprzęgła magnetoreologicznego z oznaczeniem najważniejszych elementów (a) oraz zdjęcie badanego sprzęgła (b)

Fig. 1. 3D model of the magnetorheological clutch with its basic assemblies (a) and photo of the prototype device (b)

### 3. MODEL URZĄDZENIA, STANOWISKO I METODYKA BADAWCZA

Podczas projektowania i konstrukcji sprzęgła przyjęto założenie, że w obliczeniach dotyczących modelowania cieczy MR zostanie wykorzystany lepkoplastyczny model cieczy Bingham, a do modelowania sprzęgła zostanie zastosowany model Bouc-Wena [3], [6], [7]. Obliczenia projektowe wykonano, dostosowując standardową procedurę obliczeń [1], [4], [5] do wymiarów geometrycznych i założonych parametrów pracy urządzenia. Otrzymane rezultaty badań szczegółowo omówiono w następnym rozdziale. Wszystkie badania ostatecznej konstrukcji sprzęgła zostały wykonane na zaadaptowanym i przystosowanym do badań tego typu urządzeń stanowisku laboratoryjnym, które szczegółowo opisano w [2].

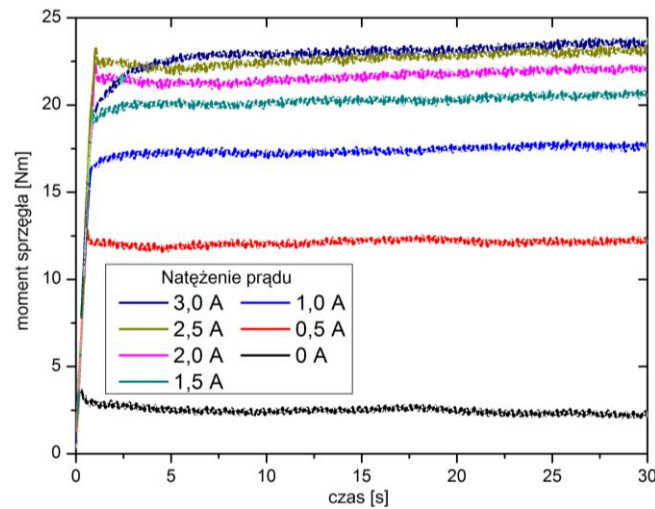
W przyjętej metodyce badawczej założono, że realizacja zadań badawczych skonstruowanego i wykonanego urządzenia MR zostanie przeprowadzona w taki sposób, który pozwoli na wyznaczenie momentów sił przenoszonych przez sprzęgło w zależności od wartości natężenia prądu płynącego w solenoidzie i wytwarzającego pole magnetyczne oddziałujące na ciecz MR zależnie od prędkości obrotowej elementów wirujących urządzeń oraz od temperatury.

## 4. WYNIKI BADAŃ

### 4.1. Wartość momentu przenieszonego przez sprzęgło przy różnych wartościach prądu

Prezentowane przykładowe wyniki badań sprzęgła dotyczą konstrukcji sprzęgła z cieczą magnetoreologiczną z dwiema cewkami wytwarzającymi pole magnetyczne. Na rys. 2 zilustrowano przebiegi zmian wartości przenieszonego momentu obrotowego otrzymane przy

różnych wartościach prądu zasilającego zwojnicę. Rezultaty można potraktować jako uzyskane w badaniach quasi-statycznych. Zostały one zarejestrowane dla bardzo małych wartości prędkości obrotowej wirnika, wynoszącej 3 obr/min.

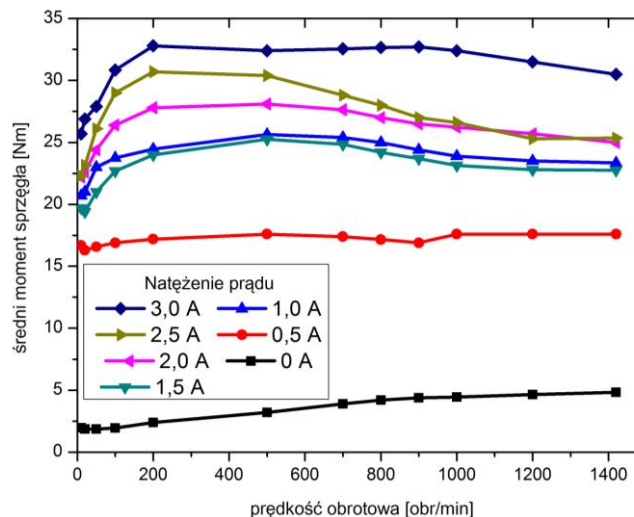


Rys. 2. Moment obrotowy przenoszony przez sprzęgło dla różnych prądów zasilających; 2 cewki zasilane, prędkość 3 obr/min

Fig. 2. Torque transmitted by the clutch, for different coils' currents; 2 coils active, 3 r.p.m.

#### 4.2. Wpływ prędkości obrotowej na wartość momentu przenieszonego przez sprzęgło

Wyznaczone wartości momentu przenieszonego przez sprzęgło, otrzymane przy różnych wartościach prędkości obrotowej wirnika sprzęgła oraz prądu cewki, zostały zaprezentowane na rys. 3. Wykresy dotyczą przebiegów wartości średnich, które wyznaczono każdorazowo z dziesięciu kolejnych przeprowadzonych pomiarów.

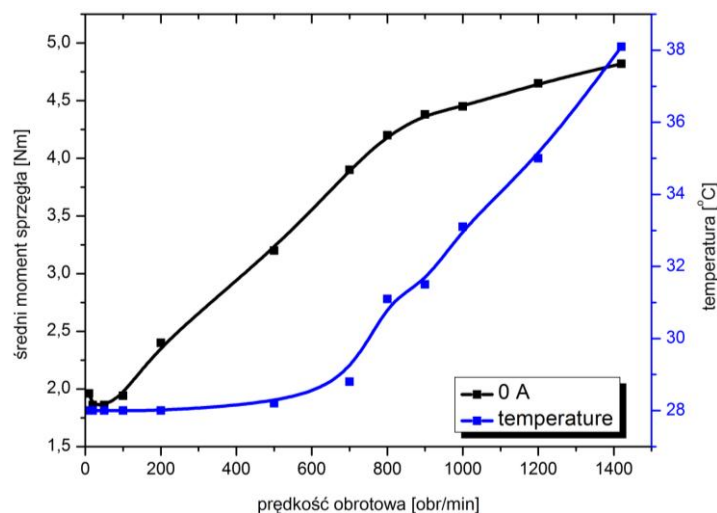


Rys. 3. Średni moment obrotowy przenoszony przez sprzęgło przy różnych wartościach prędkości obrotowej oraz różnych prądach cewki; włączone 2 cewki, obroty 3÷1400 obr/min

Fig. 3. Average torque transmitted by the clutch, for different coils' current and rotational speed; 2 coils active, rotation speed 3÷1400 r.p.m.

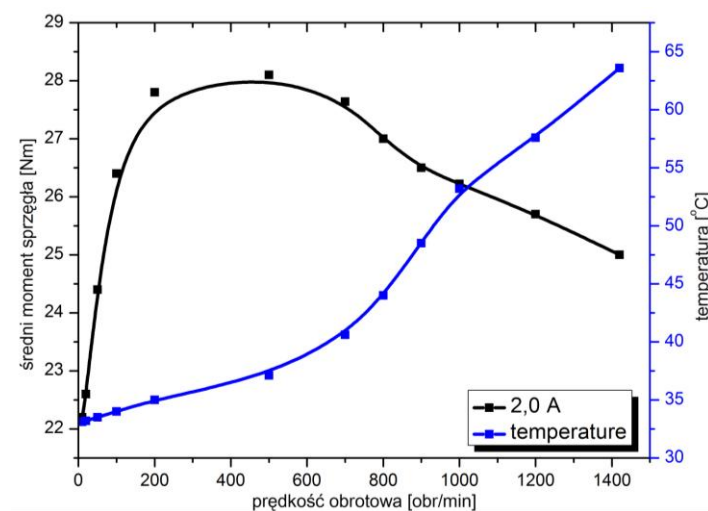
### 4.3. Wpływ prędkości obrotowej i temperatury na średni moment przenoszony przez sprzęgło

Na kolejnych rysunkach pokazano rezultaty badań sprzęgła ilustrujące zmianę uśrednionych wartości momentu sił w zależności od prędkości obrotowej oraz od temperatury. Zarówno krzywe odwzorowujące wartości zarejestrowanych momentów obrotowych, jak i te dotyczące temperatury reprezentują zmiany wartości średnich, a więc każdy dowolny punkt tych krzywych przedstawia wartość średnią z dziesięciu serii pomiarowych. Przykładową ilustrację tych wzajemnych zależności pokazano na rys. 4 przy braku prądu zasilającego oraz na rys. 5 dla cewki zasilonej prądem 2 A.



Rys. 4. Średni moment przenoszony przez sprzęgło w zależności od prędkości obrotowej i temperatury cieczy przy braku zasilania cewki urządzenia

Fig. 4. Average torque transmitted by the clutch for different rotational speed and temperature of the fluid, for coils' current 0 A

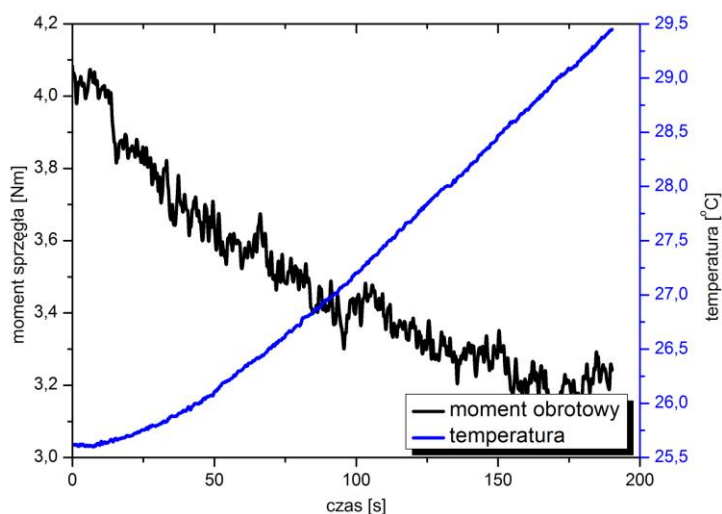


Rys. 5. Średni moment przenoszony przez sprzęgło w zależności od obrotów i temperatury cieczy przy prądzie zasilającym cewki 2,0 A

Fig. 5. Average torque transmitted by the clutch for different rotational speed and temperature of the fluid for coils' current 2,0 A

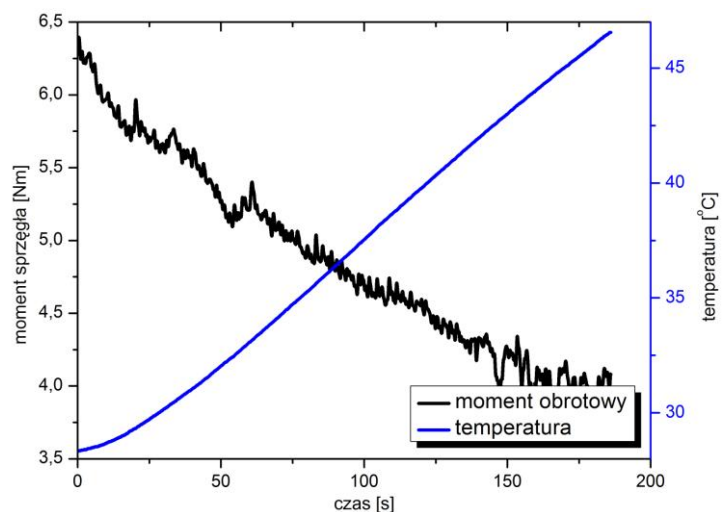
#### 4.4. Zmiana wartości momentu przenoszonego przez sprzęgło w zależności od temperatury i czasu pracy urządzenia

Przykłady rezultatów badań ilustrujące zmiany wartości momentu obrotowego przenoszonego przez sprzęgło, wyznaczone w funkcji czasu i temperatury, zostały przedstawione na rys. 6 i rys. 7. Zarejestrowane wielkości otrzymano przy stałej prędkości obrotowej wałka sprzęgłowego i zerowej wartości natężenia prądu. Kolejne przykłady, zamieszczone na rys. 8 i rys. 9, ilustrują zmiany wartości momentu obrotowego przenoszonego przez sprzęgło w funkcji czasu, wyznaczone również przy takich samych wartościach prędkości obrotowych wirnika, ale przy natężeniu prądu 1,5 A.



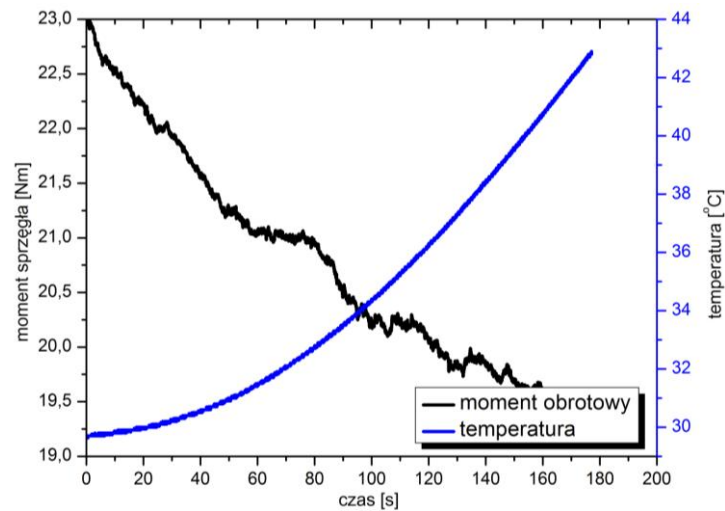
Rys. 6. Moment przenoszony przez sprzęgło w funkcji czasu i temperatury przy braku zasilania cewki prądem, zarejestrowany dla prędkości 500 obr/min

Fig. 6. Torque transmitted by the clutch over time and temperature, for 0 A coils' current, obtained for 500 r.p.m.



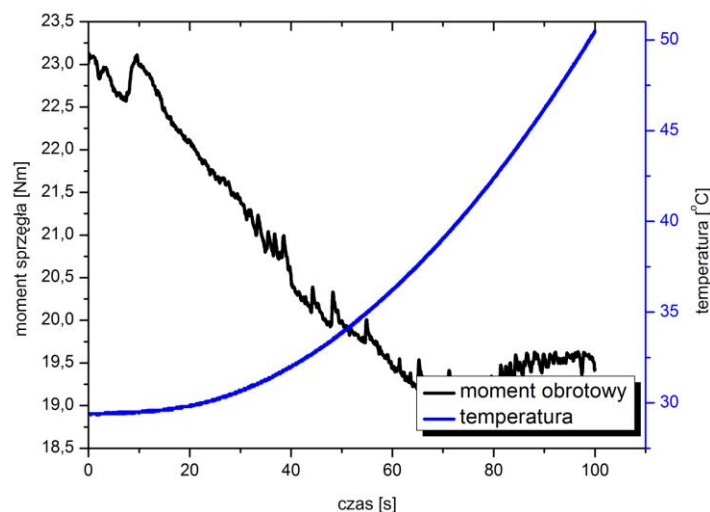
Rys. 7. Moment przenoszony przez sprzęgło w funkcji czasu i temperatury przy braku zasilania cewki prądem, zarejestrowany dla prędkości 1420 obr/min

Fig. 7. Torque transmitted by the clutch over time and temperature, for 0 A coils' current, obtained for 1420 r.p.m.



Rys. 8. Moment przenoszony przez sprzęgło w funkcji czasu i temperatury przy prądzie cewek 1,5 A, zarejestrowany dla prędkości 500 obr/min

Fig. 8. Torque transmitted by the clutch over time and temperature, for 1,5 A coils' current, obtained for 500 r.p.m.



Rys. 9. Moment przenoszony przez sprzęgło w funkcji czasu i temperatury przy prądzie cewek 1,5 A, zarejestrowany dla prędkości 1420 obr/min

Fig. 9. Torque transmitted by the clutch over time and temperature, for 1,5 A coils' current, obtained for 1420 r.p.m.

## 5. ANALIZA REZULTATÓW BADAŃ SPRZĘGŁA

### 5.1. Zmiany wartości momentu obrotowego przy różnym prądzie zasilającym cewki

Na podstawie przebiegu krzywych zilustrowanych na rys. 2 można stwierdzić, że wartość momentu sił oporu, jaki jest skutkiem istnienia zjawisk tarciovych w węzłach obrotowych sprzęgła oraz lepkości cieczy znajdującej się w stanie, gdy nie działa na nią pole magnetyczne, a więc gdy wartość natężenia prądu płynącego w solenoidzie jest zerowa,

wynosi około 2,5 Nm. Początkowa zarejestrowana nieco większa wartość tego momentu (około 3 Nm) jest wynikiem działania zjawiska tarcia statycznego. W trakcie ruchu wartość współczynnika tarcia kinematycznego zmniejsza się, stąd natychmiast po rozruchu maleje moment oporowy, stabilizując się na wspomnianym poziomie.

Wraz ze wzrostem natężenia prądu płynącego w solenoidach sprzęgła obserwujemy zwiększenie zdolności sprzęgła do przenoszenia większych wartości momentu obrotowego. Wzrost natężenia prądu do wartości 0,5 A powoduje w sprzęgle prawie czterokrotny wzrost wartości momentu oporowego w stosunku do zarejestrowanej wartości zerowej natężenia prądu w solenoidzie. Kolejny dwukrotny w stosunku do poprzedniego przypadku, wzrost natężenia prądu do wartości 1 A powoduje już tylko 50% wzrost wartości momentu oporu. Jego ustabilizowana wartość po rozruchu wynosi około 18 Nm. Zwiększenie natężenia prądu do 1,5 A powoduje wzrost wartości momentu obrotowego do około 21 Nm, natomiast wzrost wartości natężenia prądu do 2 A powoduje wzrost wartości momentu obrotowego do 22 Nm. Dalsze zwiększanie natężenia prądu płynącego w solenoidach nie wywołuje żadnych zauważalnych zmian wartości momentu obrotowego sprzęgła.

Analiza omówionych wykresów jednoznacznie wskazuje, że nasycenie magnetyczne cieczy następuje przy wartości pola magnetycznego, które jest wywołane natężeniem prądu 2 A.

## 5.2. Zmiany wartości przenoszonego momentu w funkcji prędkości obrotowej

Analizując przebiegi zmian uśrednionych wartości momentu obrotowego przenoszonego przez sprzęgło zarejestrowane przy różnych wartościach prędkości obrotowej i zmieniających się wartościach pola magnetycznego, wywołanego przez przepływający w solenoidach prąd, zauważa się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej rosnącą wartość przenoszonego momentu sił.

Z zamieszczonych na rys. 3 przebiegów można wywnioskować, że przy zerowej wartości natężenia prądu wraz ze wzrostem prędkości obrotowej obserwujemy rosnący moment obrotowy. Dzieje się to jednak w zakresie stosunkowo małych wartości tego momentu.

Analizując rezultaty badań dla przypadku, gdy w solenoidach sprzęgła płynie prąd o natężeniu 0,5 A, można zauważyć ustabilizowaną wartość momentu w całym zakresie zmienności prędkości obrotowej. Kierując się spostrzeżeniem z poprzedniego przypadku, w którym ze wzrostem prędkości obrotowej obserwowano wzrost wartości momentu obrotowego, należy przypuszczać, że stabilizacja tego momentu w tym przypadku jest wynikiem negatywnego oddziaływania temperatury na wzrost wartości momentu obrotowego. W tym przypadku temperatura w czasie pomiaru wzrosła o około 36°C. Taka różnica i końcowa wartość temperatury w trakcie trwania pomiaru mają już duże znaczenie dla przebiegu krzywych momentu obrotowego. Zostało to potwierdzone w trakcie analizy przebiegów krzywych, które otrzymano przy wyższych wartościach natężenia prądu.

W przedziale małych prędkości obrotowych przy znaczących wartościach obciążenia sprzęgła (natężenie prądu w solenoidach zmienne od 1 A do 3 A) zauważa się początkowy wzrost wartości momentu obrotowego, by przy większych wartościach prędkości obrotowych obserwować wyraźny spadek. Jest on powodowany znaczącym wzrostem temperatury. Należy zauważyć, iż czynnikiem decydującym w przypadku większych wartości natężenia prądu jest temperatura cieczy, która w wyniku nagrzania zmienia swoje parametry lepkościowe, co skutkuje pogorszeniem wartości uzyskiwanego momentu sprzęgającego.



### 5.3. Wpływ prędkości obrotowej i temperatury na moment przenoszony przez sprzęgło

Wyniki badań, jakie zostały zilustrowane na rys. 4 i rys. 5, prezentują zmiany wartości momentu obrotowego sprzęgła w zależności od prędkości obrotowej oraz temperatury cieczy roboczej. Analizując przebiegi zamieszczone na rys. 4, a więc przypadek, gdy w solenoidach badanego sprzęgła nie płynie prąd, zauważamy istotny wzrost wartości momentu obrotowego wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika oraz powolny wzrost temperatury cieczy MR. Bardzo charakterystyczny jest punkt przecięcia się tych krzywych. To wskazane miejsce oznacza, że od tego momentu na wyznaczane wartości momentu obrotowego dominujący wpływ będzie miała temperatura, której wzrost będzie powodował zmniejszanie jego wartości. W analizowanym przypadku, tzn. gdy wartość natężenia prądu w solenoidach jest zerowa, opisany punkt przecięcia krzywych występuje przy prędkości obrotowej tarczy sprzęgła wynoszącej około 1400 obr/min.

Analizując analogiczne krzywe zilustrowane na rys. 5, zauważamy przesuwanie się tego charakterystycznego punktu w stronę zmniejszających się wartości prędkości obrotowych. Wraz ze wzrostem wartości natężenia prądu płynącego w solenoidach sprzęgła wzrasta jego obciążenie. Ponieważ ciecz staje się gęstsza, przyspieszony staje się również wzrost temperatury powodujący zmniejszenie lepkości cieczy, co w konsekwencji powoduje zmniejszanie się wyznaczanych wartości momentu obrotowego. Przytoczone tu spostrzeżenia znajdują potwierdzenie również na poprzednio analizowanych wykresach ilustrujących wpływ temperatury na zmiany wartości omawianego momentu obrotowego sprzęgła.

### 5.4. Wartość momentu przenoszonego przez sprzęgło w funkcji czasu i temperatury

Wyniki zarejestrowanych wartości pomiarowych, które w postaci przykładowych wykresów zostały zamieszczone na rys. 6÷9, są z punktu widzenia ogólnej charakterystyki omawianego urządzenia MR bardzo interesujące. W przekrojowej formie, na tle wzrostu temperatury cieczy, odwzorowują one wpływ parametrów eksploatacyjnych sprzęgła na wartości przenoszonego momentu. Każdy z prezentowanych wykresów został sporządzony dla jednej, wybranej i stałej wartości prędkości obrotowej. W wybranym jednakowym przedziale czasowym zilustrowano proces narastania temperatury cieczy MR i zmiany momentu obrotowego wyznaczone przy stałej wybranej wartości obrotów. Szczegółowa analiza tych wykresów potwierdza spostrzeżenia dotyczące wyznaczania przedziałów, w których wpływ prędkości obrotowej dominuje nad wpływem temperatury na wartości momentu obrotowego. Z wykresów zamieszczonych na omawianych rysunkach możemy bezpośrednio odczytać, po jakim czasie pracy (dla wybranego punktu pracy, przy przyjęciu stałej prędkości obrotowej sprzęgła) wartość momentu przenoszonego przez sprzęgło zacznie się zmniejszać. Nastąpi to po przekroczeniu punktu przecięcia krzywych na analizowanych wykresach.

## 6. PODSUMOWANIE

Wyznaczone charakterystyki zaprojektowanego prototypu sprzęgła MR potwierdziły prawidłowość pracy urządzenia. Uzyskane podczas badań parametry pracy zostały uznane za w pełni satysfakcjonujące. Zaprezentowane w niniejszej pracy rezultaty badań są częścią obszernego opracowania, które wykonano jako projekt badawczy Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

**Bibliografia**

1. Bajkowski J.M.: Design, Analysis and Performance Evaluation of the Linear, Magnetorheological Damper. *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 6 no. 1, 2012, p. 5-12.
2. Bajkowski J.: Stanowisko badawczo dydaktyczne do wyznaczania parametrów przekładni ze sprzęgłem i hamulcem magnetoreologicznym. *Materiały Sympozjonu PKM*, 2013.
3. Bingham E.C.: *Fluidity and Plasticity*. McGraw-Hill Book Company, Nowy Jork 1922.
4. Kęsy Z.: *Sprzęgła z cieciami elektro- i magnetoreologicznymi*. Wydawnictwa Politechniki Radomskiej, Radom 2008.
5. Milecki A.: *Ciecze elektro- i magnetoreologiczne i ich zastosowania w technice*. Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.
6. Spencer B.F. jr, Dyke S.J., Sain M.K, Carlson J.D.: Phenomenological Model for a Magnetorheological Damper. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, no. 10, 1996, p. 230-238.
7. Yang G., Spencer B.F., Carlson J.D., Sain M.K.: Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*, no. 24, 2002, p. 309-323.