

Projekt i realizacja sprzęgła magnetoreologicznego ze wzbudzeniem hybrydowym

Paweł Kowol, Zbigniew Pilch

Sprzęgło, będące elementem układu napędowego, służące do łączenia wałów i przekazywania momentu obrotowego, składa się z członu czynnego – napędzającego – i członu biernego – napędzanego oraz z łącznika [1]. Łącznik rozumiany jest jako część (kilka części) lub jako czynnik, który określa sposób przekazania momentu oraz charakteryzuje sprzęgło.

W sprzęgłach sterowanych elektromagnetycznie łącznik zmienia swoje parametry pod wpływem pola magnetycznego wytworzonego przez cewkę zasilaną prądem. Jednym z rodzajów sprzęgieł elektromagnetycznych są sprzęgła, w których łącznikiem (czynnikiem sprzęgającym) jest ciecz magnetoreologiczna.

Ciecz magnetoreologiczna

Ciecz magnetoreologiczna (ciecz MR) zmienia swoją lepkość pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Zmiana lepkości cieczy MR pod wpływem pola magnetycznego wynika z jej budowy – ciecz jest zawiesiną drobinek ferromagnetyku, będących pojedynczymi domenami magnetycznymi, w niemagnetycznej cieczy nośnej. Po umieszczeniu cieczy MR w zewnętrznym polu magnetycznym drobiniki ulegają orientacji i koncentracji wzdłuż linii sił pola magnetycznego, tworząc skupiska cząsteczek w postaci łańcuchów równoległych do linii sił pola magnetycznego. Im większa indukcja B pola magnetycznego, tym większe naprężenie łańcuchów utworzonych z cząsteczek ferromagnetycznych i tym samym większa lepkość cieczy.

Zmianę naprężeń w cieczy magnetycznej opisuje model Bingham:

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

gdzie:

- τ – naprężenia styczne w cieczy;
- $\tau_0(B)$ – graniczne naprężenia styczne zależne od indukcji B zewnętrznego pola magnetycznego;
- μ – lepkość dynamiczna cieczy;
- γ – odkształcenie postaciowe cieczy przy ścinaniu.

Jeśli naprężenia styczne w cieczy nie przekroczą naprężeń granicznych $\tau_0(B)$, to ciecz nie płynie i zachowuje się jak ciało sprężyste.

Po zaniku zewnętrznego pola magnetycznego ciecz przyjmuje swoją pierwotną postać – cząsteczki ulegają rozproszeniu.

DESIGN AND REALIZATION OF THE MAGNETORHEOLOGICAL CLUTCH WITH HYBRID EXCITATION

Abstract: In the paper the properties of magnetorheological (MR) fluids and the principles of operations of magnetorheological clutch are described. The magnetorheological clutch with hybrid excitation is presented. Two types of design calculations – magnetic calculations and mechanical calculations – are described. The magnetic design calculations allow to determine geometric parameters of magnetic circuit: number of discs, their thickness and dimensions of the permanent magnet. Using the magnetic field distributions obtained from magnetic field calculations and catalog parameters of the magnetorheological fluid the clutching torque versus coil current $T_s(I)$ characteristic is determined. The mechanical calculations allow to verify correctness of the clutch construction – mainly geometric parameters of the shaft and discs. The prototype of the magnetorheological clutch, which is a final effect of the design calculations and constructional works, was researched on the dedicated test bench. The researches of the prototype of the magnetorheological clutch were related to measurements of static and dynamic states of the clutch work.

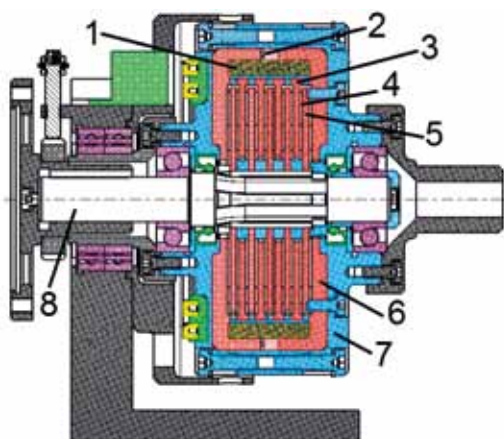
Sprzęgło z cieczą magnetoreologiczną

W sprzęgle magnetoreologicznym ciecz MR znajduje się w zamkniętej przestrzeni pomiędzy członem czynnym i biernym. Na jednym z członów sprzęgła bądź w jego nieruchomej obudowie umieszczone jest uzwojenie wzbudzenia, które – zasilane prądem – wytwarza strumień magnetyczny. Obwód magnetyczny sprzęgła jest tak ukształtowany, że strumień magnetyczny przenika przez ciecz MR.

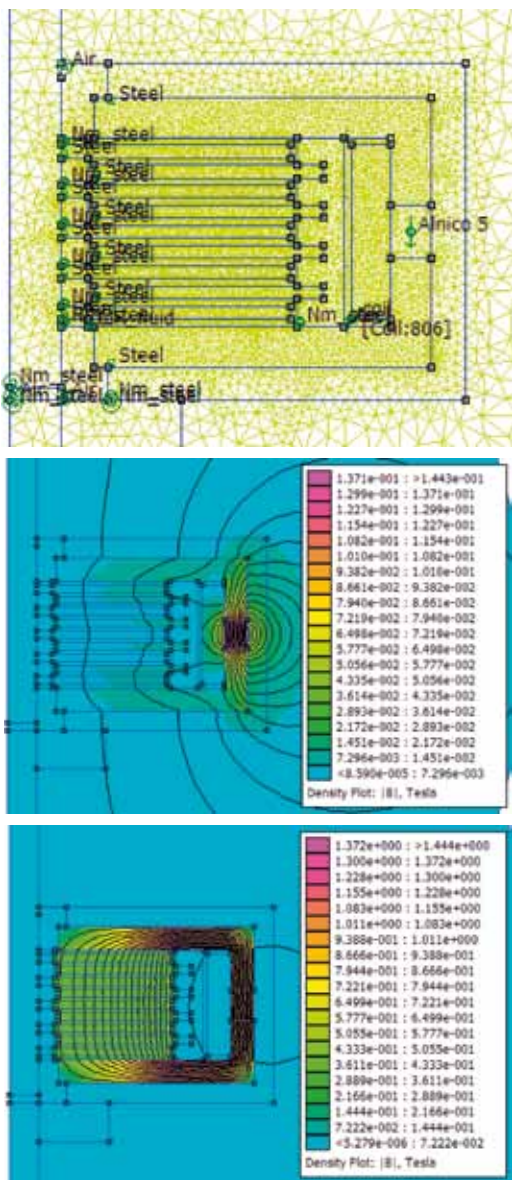
Moment sprzęgający T_s (moment, po przekroczeniu którego rozpoczyna się wysprężenie, tzn. następuje względny ruch członu czynnego i biernego) zależy od naprężenia granicznego $\tau_0(B)$. Naprężenie to jest funkcją indukcji magnetycznej B w obszarze roboczym z cieczą, a ta zależy od prądu I w uzwojeniu. Zatem wartość momentu sprzęgającego T_s jest sterowana prądem wzbudzenia I .

Sprzęgło magnetoreologiczne ze wzbudzeniem hybrydowym

Projektowane sprzęgło magnetoreologiczne (rys. 1) jest sprzęgłem wielotarczowym. W sprzęgle znajdują się dwa źródła pola magnetycznego: magnes trwały i uzwojenie sterujące,



Rys. 1. Projektowane sprzęgło magnetoreologiczne w przekroju osiowym: 1 – uzwojenie wzbudzenia (sterujące); 2 – magnes trwały; 3 – tarcza członu biernego; 4 – ciecz MR; 5 – tarcza członu czynnego; 6 – jarzmo obwodu magnetycznego sprzęgła; 7 – obudowa sprzęgła; 8 – wałek sprzęgła



Rys. 2. Symulacyjny model magnetyczny połowy sprzęgła oraz rozkłady pola magnetycznego

zasilane prądem I . Magnes trwały jest źródłem stałego pola magnetycznego, zapewniającego wytworzenie momentu sprzęgającego $T_S(I=0)$. Zasilone ze źródła prądu uzwojenie sterujące wytwarza pole magnetyczne, które przy prądzie I – odzwzduca układ i zmniejsza przez to wartość momentu $T_S(I_-)$ lub po zmianie kierunku przepływu prądu dowzbudza układ, zwiększając w ten sposób moment sprzęgający $T_S(I_+)$.

Obliczenia projektowe

Na etapie projektowania sprzęgła magnetoreologicznego wykonano obliczenia magnetyczne i obliczenia stereomechaniczne oraz wstępne obliczenia przepływowe.

Obliczenia magnetyczne

Obliczenia magnetyczne zostały zrealizowane w celu wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego w sprzęgle oraz w celu określenia na jego podstawie charakterystyki momentu sprzęgającego $T_S(I)$. Obliczenia zostały zrealizowane w dwóch etapach.

Etap 1 – obliczenia wstępne, których celem było wyznaczenie właściwej liczby tarcz, ich kształtu i wymiarów.

Przyjęto ograniczenia dla tych obliczeń polegające na tym, że tarcze zewnętrzne i wewnętrzne oraz ciecz, która znajduje się wewnątrz sprzęgła, powinny mieścić się w walcu o średnicy 75 mm i wysokości 30 mm.

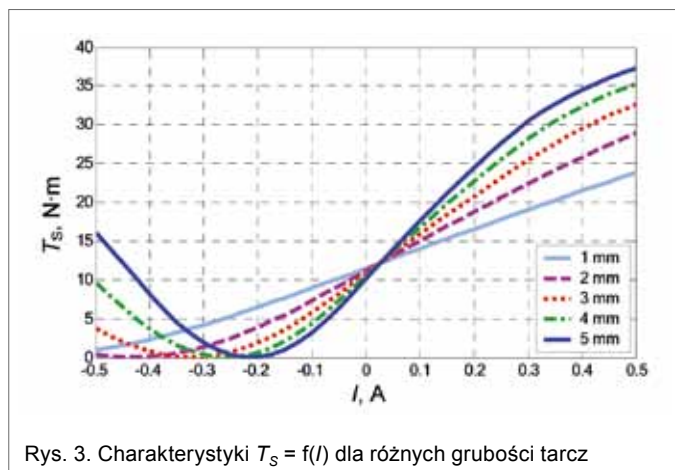
W programie FEMM wykonano model połowy sprzęgła magnetoreologicznego, który uwzględnia charakterystyki magnetyzowania stali i cieczy magnetoreologicznej. Ze względu na symetrię osiową sprzęgła – zarówno geometryczną, jak i magnetyczną – jego model połowy jest modelem osiowosymetrycznym.

W programie Matlab stworzono skrypt, w którym dzięki użyciu języka LUA dokonywano zmian geometrii modelu w programie FEMM.

Wykorzystując model połowy sprzęgła, dokonano obliczeń rozkładu pola magnetycznego w sprzęgle. Na rys. 2 przedstawiono model połowy obwodu magnetycznego sprzęgła oraz wyniki obliczeń w postaci rozkładów pola magnetycznego dla $I_+ = 0,5$ A i $I_- = -0,5$ A.

Wykorzystując wyznaczone rozkłady pola magnetycznego w sprzęgle, obliczono moment sprzęgający T_S . Na podstawie relacji $\tau_0(H)$ [2] i uzyskanych rozkładów natężenia pola magnetycznego w cieczy magnetoreologicznej (składowej normalnej natężenia pola magnetycznego H_n) przy granicy styczności cieczy z tarczami wirnika (w modelu osiowosymetrycznym przy

reklama

Rys. 3. Charakterystyki $T_s = f(I)$ dla różnych grubości tarcz

krawędziach tarcz wirnika), obliczono wartości momentu sprężającego. Na podstawie uzyskanych wyników wybrano ostatecznie wariant, w którym liczba tarcz osadzonych na wale wynosi 5 sztuk, a ich grubość 2 mm. Dla tego wariantu charakterystyka $T_s(I)$ dla różnych grubości tarcz przedstawiono na rys. 3.

Etap 2 – obliczenia, których celem było wyznaczenie ostatecznych wymiarów elementów stanowiących obwód magnetyczny.

Drugi etap obliczeń magnetycznych został przeprowadzony po obliczeniach wytrzymałościowych przeprowadzonych dla kluczowych elementów sprzęgła, odpowiedzialnych za przeniesienie momentu. Obliczenia te wykazały konieczność niewielkich korekt wymiarów przyjętych dla obliczeń magnetycznych.

Końcowy model geometryczny przedstawiono na rys. 4. Dla tego modelu opracowano model polowy i przeprowadzono ponownie obliczenia.

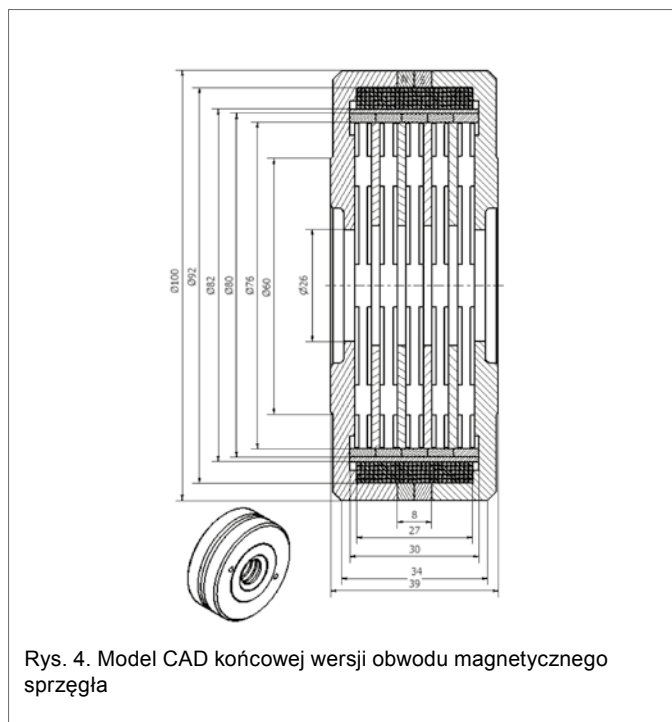
Wyniki obliczeń momentu sprężającego T_s dla końcowej wersji geometrii obwodu magnetycznego sprzęgła przedstawiono na rys. 5.

Na etapie zakupów materiałów i części składowych sprzęgła pojawiła się trudność w zakupie magnesu wykonanego ze stopu Alnico o wymiarach wynikających z obliczeń projektowych. Postanowiono zatem zastąpić magnes z Alnico łatwo dostępnymi na rynku magnesami neodymowymi (NdFeB). Pierścień z Alnico zastąpiono więc wieńcem z 72 pastylkowych magnesów NdFeB (rys. 6). Ze względu na różnicę parametrów materiałów Alnico i NdFeB wieńiec ten musi się charakteryzować kilkukrotnie mniejszą wysokością od obliczonej wcześniej wysokości magnesu z Alnico. Zatem zastosowano dodatkowy pierścień stalowy o wysokości wynikającej z różnicy wysokości magnesu pierścieniowego i wieńca z magnesów.

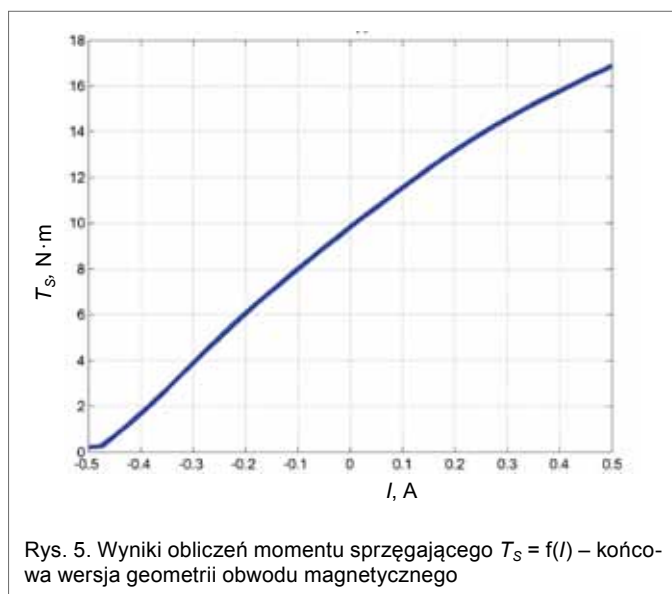
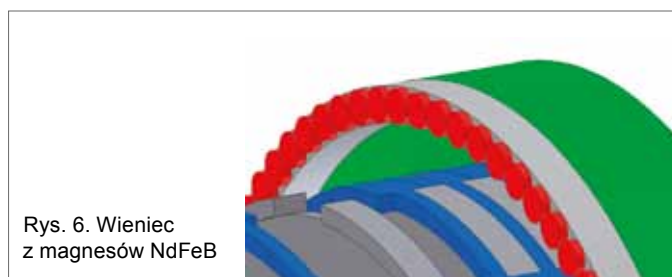
Dla opisanej modyfikacji obwodu magnetycznego sprzęgła przeprowadzono ponownie obliczenia rozkładu pola magnetycznego i momentu sprężającego T_s (rys. 7).

Obliczenia stereomechaniczne

Obliczenia wytrzymałościowe są etapem procesu projektowego koniecznym do weryfikacji stanu naprężeń i odkształceń kluczowych elementów sprzęgła. Wyniki obliczeń dają odpowiedź o wytrzymałości materiału pod wpływem działania obciążenia. Obliczenia zrealizowano z wykorzystaniem dostępnych narzędzi wspierających projektowanie elementów konstrukcyjnych, zaimplementowanych w programie Autodesk Inventor 2010.



Rys. 4. Model CAD końcowej wersji obwodu magnetycznego sprzęgła

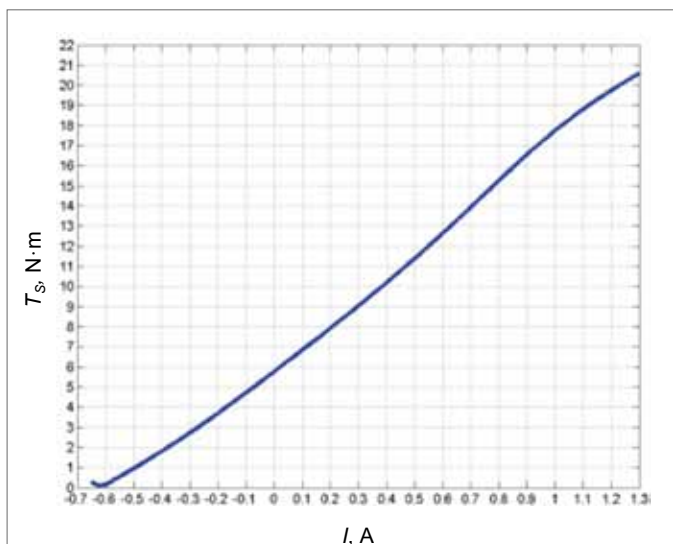
Rys. 5. Wyniki obliczeń momentu sprężającego $T_s = f(I)$ – końcowa wersja geometrii obwodu magnetycznego

Rys. 6. Wieńiec z magnesów NdFeB

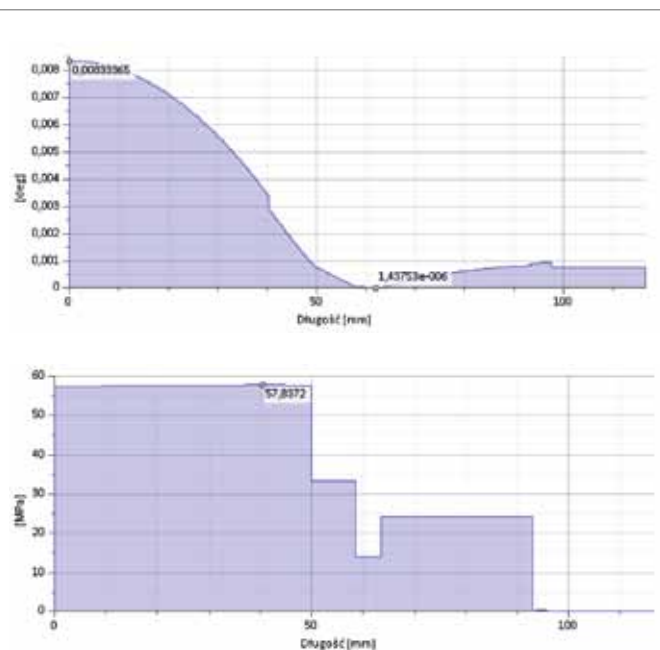
Etap 1: Obliczenia wału sprzęgła

Jako obciążenia wałka (rys. 8) przyjęto działający na wałek moment skręcający o wartości 22 Nm oraz siłę poprzeczną (wynikającą np. z niewyosiowania sprzęgła z dalszą częścią układu napędowego) o wartości 50 N.

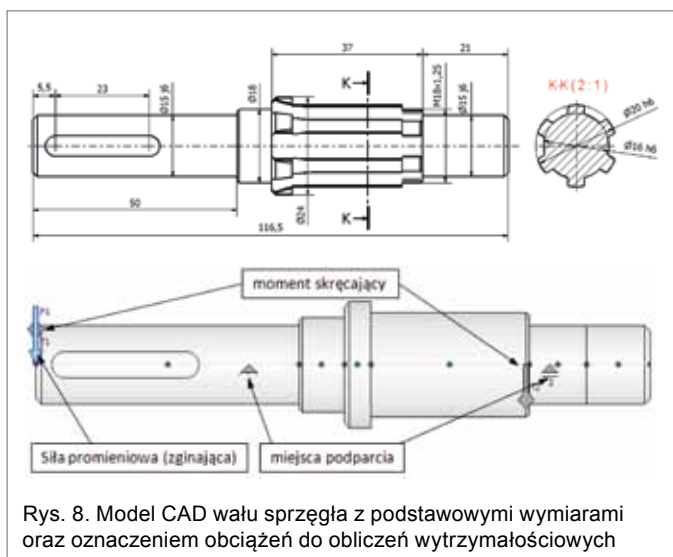
Generator wałów programu Inventor 2010 umożliwia wyznaczenie rozkładu wielkości odkształcenia i naprężeń na długości



Rys. 7. Charakterystyka $T_S = f(I)$ po zastosowaniu wieńca z magnesów NdFeB dla grubości magnesów 0,8 mm



Rys. 9. Wyniki obliczeń sprawdzających dla wału sprzęgła



Rys. 8. Model CAD wału sprzęgła z podstawowymi wymiarami oraz oznaczeniem obciążeń do obliczeń wytrzymałościowych

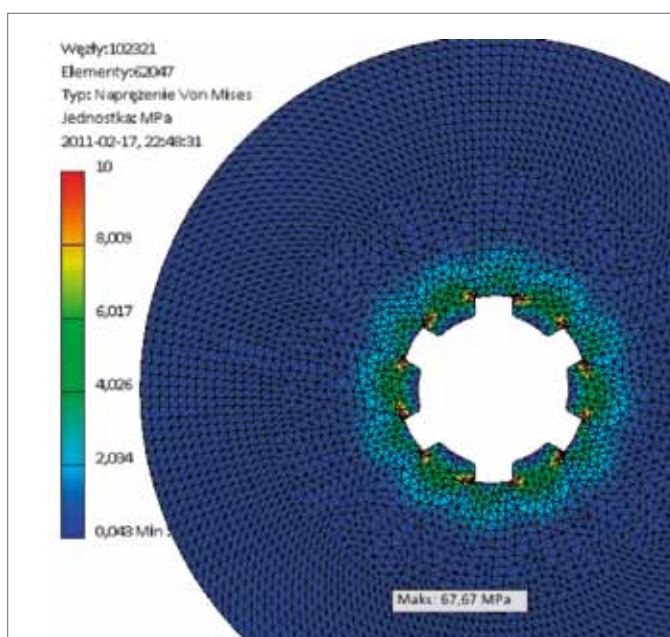
wału. Wielkości te dotyczą wykresów sił i momentów oraz naprężeń i odkształceń nimi wywołanych. Dodatkowo wyznaczone są wykresy wartości naprężeń zredukowanych oraz określany jest wykres średnicy idealnej. Wielkości te wyznaczane są w punktach rozłożonych równomiernie na długości wału. Liczbę tych punktów można ustalać w szerokim zakresie. Obliczenia zrealizowano przy podziale wału na 500 odcinków.

Na rys. 9 przedstawiono rozkłady wartości kąta ugięcia oraz poniżej naprężeń zredukowanych wzdłuż wału.

Przyjęto, że wał sprzęgła zostanie wykonany ze stali nierdzewnej 0H18N10T (1.4541). Dla tego gatunku stali minimalna granica plastyczności R_e określona jest na poziomie 216 MPa [3]. A zatem można założyć, że przyjęta geometria wału dla założonego materiału konstrukcyjnego będzie wystarczająca dla przeniesienia założonych obciążeń. Stal 0H18N10T przyjęto w zastępstwie trudno dostępnych stali niemagnetycznych gatunku G18H3 lub H12N11G6 [4].

Etap 2: Obliczenia tarcz sprzęgła

Dla tarcz sprzęgła przeprowadzono również analizę wytrzymałościową, wykorzystując do tego celu „Moduł analizy naprężeń” programu Inventor 2010.



Rys. 10. Rozkład naprężeń w tarczy sprzęgła

Na rys. 10 przedstawiono rozkład naprężeń w tarczach sprzęgła przy obciążeniu momentem $T_s = 22 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Wyznaczono ponadto wartości częstotliwości drgań własnych zespołu tarcz oraz odpowiadające im postacie drgań. Na rys. 11

- reklama

przedstawiono pierwszą i drugą postać drgań własnych dla częstotliwości odpowiednio: 1190 Hz i 2550 Hz.

W zakresie obliczeń stereomechanicznych dokonano ponadto obliczeń tarcz zewnętrznych oraz połączeń śrubowych, odpowiedzialnych za przeniesienie momentu.

Wstępne obliczenia przepływowe

W celu zbadania prędkości cieczy MR w przestrzeni roboczej sprzęgła w trakcie jego pracy stworzono model przepływowy 2D sprzęgła.

W modelu przyjęto gęstość cieczy magnetoreologicznej $\rho = 3,64 \text{ g/cm}^3$ i jej lepkość dynamiczną $\mu = 0,28 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ MRF-140CG przy braku oddziaływania zewnętrznego pola magnetycznego.

Wyniki obliczeń przepływowych pokazują, że przy mniejszych prędkościach obrotowych profil prędkości w szczelinie z cieczą MR jest liniowy. Przy prędkości $n = 500 \text{ obr/min}$ profil prędkości w obszarach zakończenia tarcz nie jest liniowy, aczkolwiek przepływ nie jest turbulentny – liczba Reynoldsa wynosi $Re = 365$ (graniczna $Re = 1900$ dla przepływu płaskiego).

Badania prototypu sprzęgła magnetoreologicznego

Po wykonaniu elementów sprzęgła dokonano montażu prototypu sprzęgła magnetoreologicznego ze wzbudzeniem hybrydowym (rys. 12). Następnie przeprowadzono badania sprzęgła w stanach statycznym i dynamicznym. Badania te wykonano na skonstruowanym stanowisku laboratoryjnym (rys. 12).

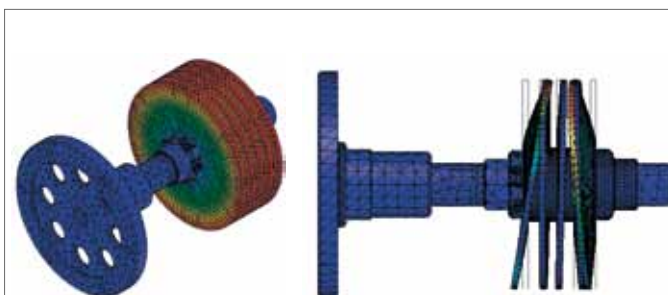
Stanowisko składa się ze źródła napędu (1), badanego sprzęgła (2), obciążenia (4) oraz elementu pomiarowego (3). Źródło napędu stanowi opcjonalnie motoreduktor napędzany przez silnik indukcyjny, który jest zasilany z falownika napięcia (źródło napędu o regulowanej wartości prędkości obrotowej), bądź obrotowy siłownik pneumatyczny zasilany poprzez elektronicznie sterowany zawór, który posiada możliwość zadawania ciśnienia wyjściowego (źródło napędu o regulowanej wartości momentu napędowego). Obciążenie układu napędowego stanowi hamulec elektromagnetyczny proszkowy. Pomiar momentu przenoszonego przez sprzęgło – momentu sprzęgającego T_s – oraz pomiar prędkości członu biernego sprzęgła jest dokonywany przez momentomierz, który jest umieszczony pomiędzy sprzęgłem a hamulcem.

Pomiarów momentu sprzęgającego w funkcji prądu cewki sprzęgła $T_s(I)$ dokonano dla sprzęgła ze wzbudzeniem hybrydowym oraz dla sprzęgła bez magnesu trwałego – sprzęgła wzbudzanego wyłącznie przez cewkę zasilaną prądem I . Zestawienie obu pomiarów przedstawia rys. 13.

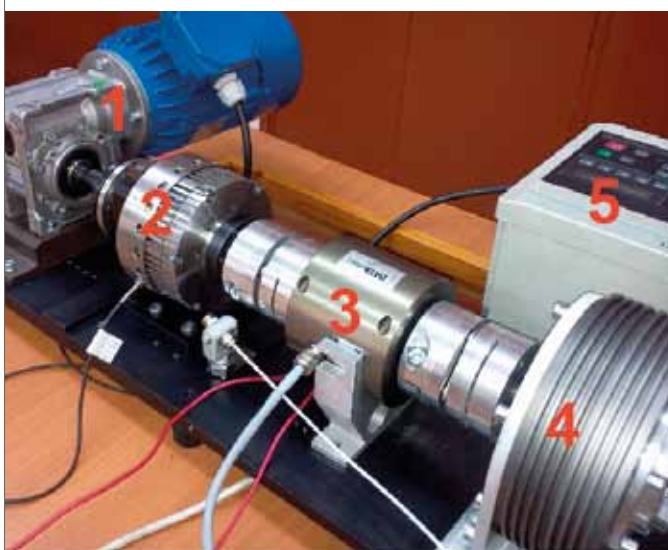
Pomiary stanów dynamicznych sprzęgła polegały na rejestracji przebiegów momentu sprzęgającego T_s dla załączenia i wyłączenia sprzęgła oraz na skokowych zmianach obciążenia sprzęgła. Przebieg momentu przenoszonego przez sprzęgło – momentu sprzęgającego T_s – z opisanymi zmianami dynamicznymi stanu pracy sprzęgła przedstawia rys. 14.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono proces projektowy sprzęgła magnetoreologicznego. Obliczenia projektowe, na które składają się obliczenia magnetyczne i mechaniczne pozwoliły na wybór właściwej konstrukcji sprzęgła oraz wyznaczenie charakterystyki $T_s(I)$ określającej parametry użytkowe sprzęgła.



Rys. 11. Postacie odpowiadające 1 i 2 częstotliwości drgań własnych tarcz sprzęgła



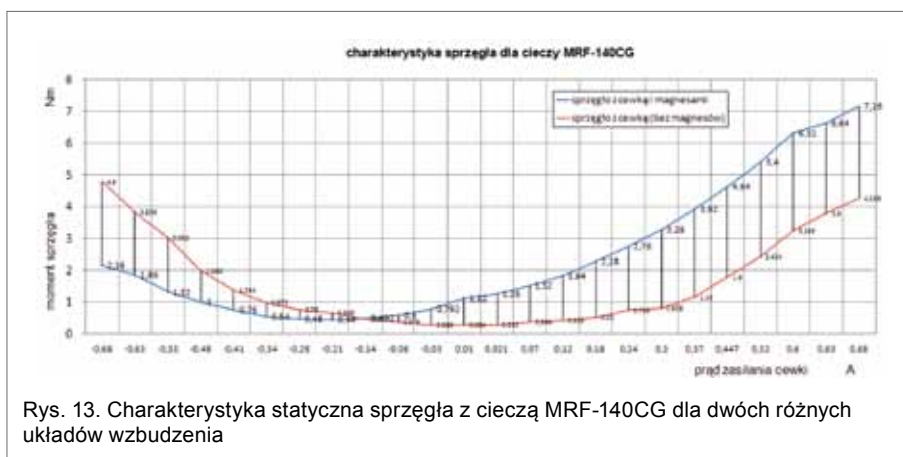
Rys. 12. Sprzęgło magnetoreologiczne oraz stanowisko laboratoryjne do badania sprzęgła magnetoreologicznego: 1 – silnik indukcyjny z motoreduktorem (źródło napędu); 2 – sprzęgło magnetoreologiczne; 3 – momentomierz; 4 – hamulec (obciążenie); 5 – falownik zasilający silnik indukcyjny

Charakterystyki momentu sprzęgającego $T_s(I)$ otrzymane na drodze pomiarów są zbliżone z odpowiadającymi im charakterystykami wyznaczonymi z obliczeń polowych: charakterystyki posiadają ten sam kształt, natomiast różnią się co do zakresu wartości T_s . Różnice te wynikają z rzeczywistych parametrów cieczy magnetoreologicznych gorszych od parametrów podawanych przez producenta, a które przyjęto w obliczeniach. Drugim powodem rozbieżności pomiędzy rzeczywistymi parametrami sprzęgła a wyznaczonymi z obliczeń są niedokładności wykonania elementów sprzęgła stanowiących obwód magne-

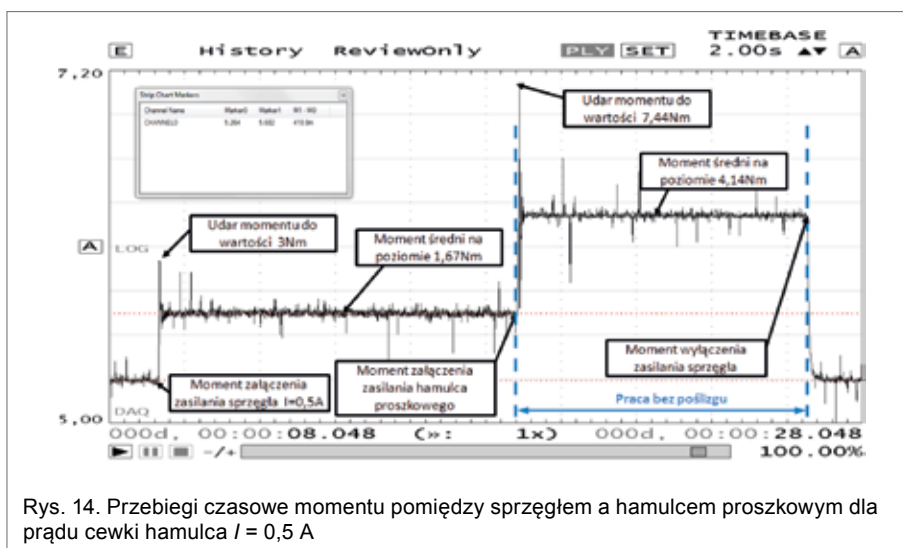
tyczny. Wszelkiego rodzaju szczeliny powietrzne, powstałe pomiędzy elementami, osłabiają wartość strumienia magnetycznego, co przekłada się na mniejsze wartości momentu sprzęgającego T_s .

Porównując charakterystyki $T_s(I)$ dla sprzęgła ze wzbudzeniem hybrydowym, jakie otrzymano z obliczeń oraz pomiarów, warto zauważyć, że minimum momentu sprzęgającego T_s odpowiada różnym wartościom prądu odbudzającego I_- . Różnica ta wynika z tego, że użyte w budowie sprzęgła magnesy posiadają gorsze parametry magnetyczne (B_r , H_c) niż te, które podaje producent magnesów.

Analizując pomiary w stanach dynamicznych, można zauważyć, że w chwili załączenia sprzęgła i hamulca występują udary momentu związane ze zmianą prędkości wirujących mas bezwładności. Wyłączenie zasilania sprzęgła, nie powodujące zmiany prędkości którejkolwiek z mas bezwładności, nie wywołuje udaru momentu. W tym stanie widoczny jest proces zanikania właściwości sprzęgających sprzęgła, wynikających z właściwości cieczy MR. Proces ten trwa około 150 ms. Porównując proces załączenia i wyłączenia zasilania sprzęgła, należy zauważyć, że uzyskanie przez sprzęgło właściwości sprzęgających jest szybsze niż utrata tych właściwości.



Rys. 13. Charakterystyka statyczna sprzęgła z cieczą MRF-140CG dla dwóch różnych układów wzbudzenia



Rys. 14. Przebiegi czasowe momentu pomiędzy sprzęgłem a hamulcem proszkowym dla prądu cewki hamulca $I = 0,5$ A

Literatura

- [1] DIETRICH M. I INNI: *Podstawy konstrukcji maszyn*. Tom 3. WNT, Warszawa 2006.
- [2] Materiały informacyjne firmy LORD Corporation: www.lord.com
- [3] DOBRZAŃSKI L. I INNI: *Leksykon materiałoznawstwa*. v.1.41, Wydawnictwo Verlag Dashofer, Warszawa 2010.
- [4] BAJOREK J., KOLASA J.: *Stale austenityczne w budowie maszyn elektrycznych – właściwości, badania*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wrocławska, 48/2000, s. 312–318.
- [5] SZELĄG W.: *Przetworniki elektromagnetyczne z cieczą magneto-reologiczną*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.
- [6] LI W.H., DU H.: *Design and Experimental Evaluation of a Magnetorheological Brake*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 21/2003, s. 508–515.
- [7] JĘDRYCZKA C.: *FE analysis of electromagnetic field coupled with fluid dynamics in a MR clutch*. COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2007, Vol. 26, No. 4, s. 1028–1036.
- [8] PILCH Z., KOWOL P., KIELAN P.: *Wielotarczowe sprzęgło magneto-reologiczne o płynnie regulowanej wartości przenoszonego momentu*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne BOBRME KOMEL, z. 90/2011, Katowice 2011, s. 169–174.
- [9] KOWOL P.: *Polowa analiza wpływu właściwości cieczy magneto-reologicznej i kształtu tarcz na parametry sprzęgła magneto-reologicznego*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne BOBRME KOMEL, z. 88/2010, Katowice 2010, s. 229–233.
- [10] KIELAN P., KOWOL P., PILCH Z.: *Conception of the electronic controlled magnetorheological clutch*. Przegląd Elektrotechniczny, 3/2011, s. 93–95.

dr inż. Paweł Kowol, dr inż. Zbigniew Pilch – Katedra Mechatroniki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska, Gliwice,
e-mail: pawel.kowol@polsl.pl, zbigniew.pilch@polsl.pl
Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2011 jako projekt badawczy nr N N510 355337

artykuł recenzowany

reklama