

Cezary Jędrzycka, Wojciech Szelaąg, Adam Myszkowski, Mariusz Barański,
Politechnika Poznańska

ANALIZA I BADANIE MAGNETOREOLOGICZNEGO SPRZĘGŁA ROZRUCHOWO-PRZECIĄŻENIOWEGO

ANALYSIS AND TESTING OF THE MAGNETORHEOLOGICAL STARTING- OVERLOAD CLUTCH

Streszczenie: W artykule przedstawiono budowę i zasadę działania sprzęgła rozruchowo-przeciążeniowego o nastawianym momencie obrotowym sprzęgającym. W sprzęgle, jako medium robocze zastosowano ciecz magnetoreologiczną (ang. *magnetorheological fluid*, MRF). Nastawę momentu sprzęgającego realizuje się poprzez zmianę pola magnetycznego w obszarze z cieczą MR. Jako źródło pola magnetycznego wykorzystano magnesy trwałe wykonane ze spieku neodymu żelaza i boru. Do analizy, wyznaczenia paramentów funkcjonalnych oraz projektowania sprzęgła wykorzystano polowy algorytm i program komputerowy do symulacji niustalonych sprzężonych zjawisk elektromagnetycznych, ferrohydrodynamicznych i cieplnych. W rozważaniach uwzględniono także dynamikę elementów ruchomych układu napędowego składającego się z silnika napędowego, sprzęgła i obciążenia. Zbudowane sprzęgło magnetoreologiczne wykorzystano do poprawy synchronizacji magnetoelektrycznego silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim (ang. *Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*, LSPMSM) napędzającego wentylator przemysłowy. Przedstawiono wybrane rezultaty badań symulacyjnych i eksperymentalnych potwierdzające przydatność opracowanego sprzęgła do poprawy synchronizacji silnika obciążonego wentylatorem charakteryzującym się dużym momentem bezwładności.

Abstract: In the paper the design and the principle of operation of the overload-starting clutch have been presented. In proposed clutch the magnetorheological fluid (MRF) has been used as a working medium. The change of the clutching torque is achieved by change of the magnetic flux density excited by permanent magnets in the area of MRF. The field model, algorithm of solving coupled equations and developed software for analysis of coupled transient electromagnetic, ferrohydrodynamic and thermal phenomena have been presented. The equations of mechanical equilibrium of the movable elements have been taken into account. The prototype of designed clutch has been used to improve synchronization of the line start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM) driving the industrial fan. The selected results of the experiments have been presented. Obtained results show that elaborated clutch successfully improves synchronization of tested motor for high inertia fan load.

Słowa kluczowe: *ciecz magnetoreologiczna, zjawiska sprzężone, synchronizacja magnetoelektrycznego silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim, LSPMSM*

Keywords: *magnetorheological fluids, coupled phenomena, synchronization of the line start permanent magnet synchronous motors, LSPMSM*

1. Wstęp

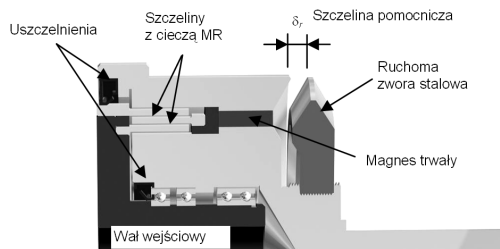
Lepkość cieczy magnetoreologicznych zmienia się pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego [3,8]. Efekt ten z powodzeniem wykorzystuje się do budowy przetworników elektromechanicznych, w których jako medium przenoszące siły bądź momenty obrotowe wykorzystuje się cieczy MR [3,4,6,7,8]. Opracowane nastawialne sprzęgło magnetoreologiczne o wzbudzeniu pasywnym umożliwia ograniczanie przenoszonego momentu dynamicznego pomiędzy elementami układu napędowego. Z tego względu może być wykorzystywane jako element ograniczający narażenia związane z dynamicznymi zmianami momen-

tu elektromagnetycznego napędowego lub obciążenia. Udarowe przetężenia oraz duża dynamika zmian momentu elektromagnetycznego występują zazwyczaj podczas tzw. rozruchu bezpośredniego silników elektrycznych. Jeśli źródłem zaburzenia momentu jest silnik, to elementem chronionym przez sprzęgło jest odbiornik. Natomiast przy dynamicznych zmianach obciążenia elementem chronionym jest silnik napędowy, a sprzęgło realizuje funkcję przeciw przeciążeniową.

W opracowanym sprzęgle magnetoreologicznym momenty dynamiczne mniejsze od nastawionego momentu obrotowego sprzęgającego są przenoszone przez sprzęgło bez poślizgu. Natomiast jeśli moment obrotowy napę-

dowy lub moment oporowy przekroczy moment nastawiony, to wały wejściowy i wyjściowy zaczynają obracać się z różną prędkością. Przenoszony wówczas przez sprzęgło moment obrotowy jest równy momentowi nastawionemu.

Budowę oraz widok rozpatrywanego przetwornika zaprezentowano na rys. 1. W sprzęgłe wykorzystano zaproponowany w pracy [5]

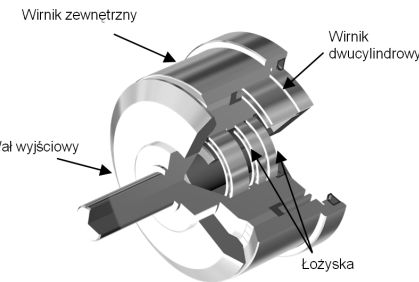


Rys. 1. Przekrój oraz widok 3D rozpatrywanego sprzęgła rozruchowo przeciężeniowego

2. Polowy model zjawisk sprzężonych

W rozpatrywanym sprzęgłe, pole magnetyczne w szczelinach z cieczą magnetoreologiczną zależy od położenia zwory stalowej (rys. 1). Wzrost natężenia tego pola prowadzi do znacznego wzrostu lepkości cieczy, zwiększenia siły tarcia między elementami ruchomymi, a więc i zwiększenia momentu sprzęgającego wirniki sprzęgła. Zmiana momentu napędowego i oporowego wpływa na prędkość podzespołów ruchomych, a więc i na rozkład prędkości w cieczy. Od pola prędkości oraz pola magnetycznego zależą lepkość, naprężenia i tarcie wewnętrzne w cieczy. Tarcie to jest źródłem strat mocy i prowadzi do zmiany temperatury cieczy. Straty mocy powstają również w łożyskach, uszczelnieniach, a przy zmianach pola magnetycznego także w obwodzie magnetycznym sprzęgła [6,7]. Nagrzewanie się podzespołów sprzęgła prowadzi do zmian właściwości elektrycznych, magnetycznych oraz reologicznych zastosowanych w sprzęgłe materiałów. Zmiany te wpływają na zachowanie się sprzęgła zarówno w dynamicznych jak i ustalonych stanach pracy układu. Z powyższych względów w opracowanym modelu matematycznym sprzęgła równania opisujące nieustalone sprzężone zjawiska elektromagnetyczne, hydrodynamiczne i cieplne rozpatruje się łącznie z równaniem dynamiki układu. Złożone powiązania zjawisk elektromagnetycznych, hydrodynamicznych oraz mechanicznych komplikują analizę pracy prezentowanego pasywnego sprzęgła magne-

tycznego. Zastosowany do analizy sprzęgła polowy model nieustalonych zjawisk sprzężonych w przetwornikach z cieczą MR został szczegółowo zaprezentowany przez autorów między innymi w pracach [4,6,7]. Do sformułowania modelu dyskretnego zjawisk wykorzystano metodę elementów skończonych [7]. Uzyskany w wyniku dyskretyzacji przestrzeni i czasu model obejmuje równania opisujące pole magnetyczne:



torologicznego. Zastosowany do analizy sprzęgła polowy model nieustalonych zjawisk sprzężonych w przetwornikach z cieczą MR został szczegółowo zaprezentowany przez autorów między innymi w pracach [4,6,7]. Do sformułowania modelu dyskretnego zjawisk wykorzystano metodę elementów skończonych [7]. Uzyskany w wyniku dyskretyzacji przestrzeni i czasu model obejmuje równania opisujące pole magnetyczne:

$$\mathbf{S}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\Theta})_n \boldsymbol{\varphi}_n = \boldsymbol{\theta}_n, \quad (1)$$

pole prędkości cieczy

$$[\mathbf{F}_n(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\Theta}) + (\Delta t)^{-1} \mathbf{M}] \boldsymbol{\varphi}_n = (\Delta t)^{-1} \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_{n-1} + \mathbf{B}_n, \quad (2)$$

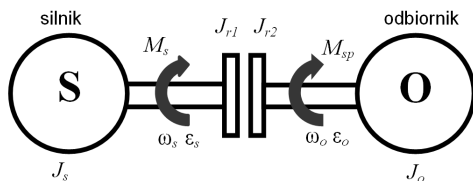
oraz pole temperatury

$$[\mathbf{K}_n(\boldsymbol{\Theta}) + (\Delta t)^{-1} \mathbf{G}] \boldsymbol{\Theta}_n = (\Delta t)^{-1} \mathbf{G} \boldsymbol{\Theta}_{n-1} + \mathbf{P}, \quad (3)$$

gdzie: n – numer chwili czasowej, Δt – długość kroku czasowego, \mathbf{S} , \mathbf{F} , \mathbf{K} – macierze sztywności układu odpowiednio dla pola magnetycznego, pola prędkości cieczy oraz pola temperatury; $\boldsymbol{\varphi}$, $\boldsymbol{\phi}$, $\boldsymbol{\Theta}$ – wektory

potencjałów węzłowych $\boldsymbol{\varphi}$, $\boldsymbol{\phi}$ i $\boldsymbol{\Theta}$; $\boldsymbol{\theta}$ – wektor opisujący źródła pola magnetycznego, \mathbf{M} – macierz o elementach zależnych od momentu bezwładności elementarnych pierścieni uformowanych przez siatkę dyskretyzującą, \mathbf{B} – macierz warunków brzegowych dla pola prędkości cieczy; \mathbf{G} – macierz o elementach zależnych od pojemności cieplnej, \mathbf{P} – macierz wymuszeń o elementach zależnych od gęstości strat mocy.

W rozważaniach uwzględniono równania dynamiki elementów ruchomych. Strukturę analizowanego układu napędowego pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat rozważanego układu napędowego

Przyspieszenie kątowe ε_s wirnika silnika dla układu z sprzęgłem rozruchowo-przeciążeniowym usytuowanym między wałami silnika i urządzenia napędzanego można opisać zależnością

$$\varepsilon_s = \frac{M_s(\omega_s) - M_{sp}(\omega_s - \omega_o)}{J_s + J_{r1}}, \quad (4)$$

a przyspieszenie kątowe ε_o wału obciążenia równaniem

$$\varepsilon_o = \frac{M_{sp}(\omega_s - \omega_o) - M_o(\omega_o)}{J_{r2} + J_o}, \quad (5)$$

gdzie: $M_s(\omega_s)$ – moment napędowy na wale silnika, $M_{sp}(\omega_s - \omega_o)$ – zależny od różnicy prędkości obrotowych wałów moment poślizgu na sprzęgle, $M_o(\omega_o)$ – moment oporowy na wale urządzenia napędzanego, $M_o(\omega_n)$ – moment oporowy urządzenia napędzanego przy znamionowej prędkości kątowej ω_n wału, J_s – moment bezwładności podzespołów wirujących w silniku, J_{r1} – moment bezwładności elementów wirujących na wejściu sprzęgła, J_{r2} – moment bezwładności elementów wirujących na wyjściu sprzęgła, J_o – moment bezwładności układu napędzanego.

W celu uniknięcia pracy sprzęgła z poślizgiem przy zadanym momencie obciążenia $M_o(\omega_n)$ nastawiany moment sprzęgający M_{sp} musi spełni warunek $M_{sp} \geq M_o(\omega_n)$.

Przy sztywnym połączeniu wału silnika i urządzenia napędzanego równanie dynamiki przyjmuje postać

$$\varepsilon_s = \frac{M_s(\omega_s) - M_o(\omega_s)}{J_o + J_{r1} + J_{r2} + J_o}, \quad (6)$$

Uzyskane z równań (4)-(6) w wyniku dyskretyzacji czasu równania różnicowe rozwiązuje się łącznie z równaniami (1)-(3). Do rozwiązania otrzymanego w ten sposób układu nieliniowych równań algebraicznych wykorzystuje się algorytm Newtona-Raphsona i metodę relaksacji blokowej [7].

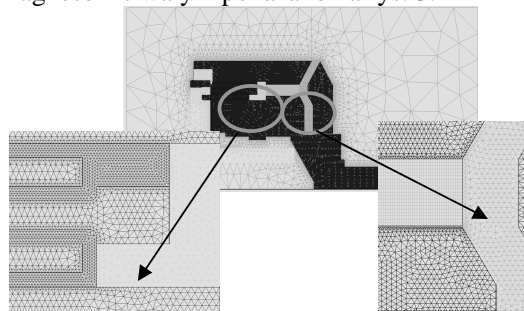
Do opisu właściwości reologicznych cieczy MR wykorzystano model cieczy nienewtonowskiej zaproponowany przez Bingham [3,8]. W opracowanym algorytmie analizy zjawisk na podstawie uzyskanego rozkładu prędkości ścinania cieczy wyznaczone są naprężenia styczne oraz moment sprzęgający M_{sp} . Do numerycznego wyznaczenia wartości tego momentu wykorzystano podejście całkowe zaproponowane w [6]. Moment sprzęgający ma dwie składowe: statyczną zależną od wartości i rozkładu pola magnetycznego oraz dynamiczną wynikającą z aktualnego rozkładu pola prędkości cieczy

$$M_{sp} = M_{sp_stat}(B) + M_{sp_dyn}(\omega_s - \omega_o), \quad (7)$$

Na podstawie przedstawionego algorytmu polowej analizy niestabilnych zjawisk sprzężonych opracowano autorski program komputerowy *MR_SYM_uni* do symulacji stanów pracy i wyznaczania parametrów funkcjonalnych sprzęgła magnetoreologicznego [6]. Program ten wykorzystano do zaprojektowania oraz przeprowadzenia badań symulacyjnych prezentowanego sprzęgła.

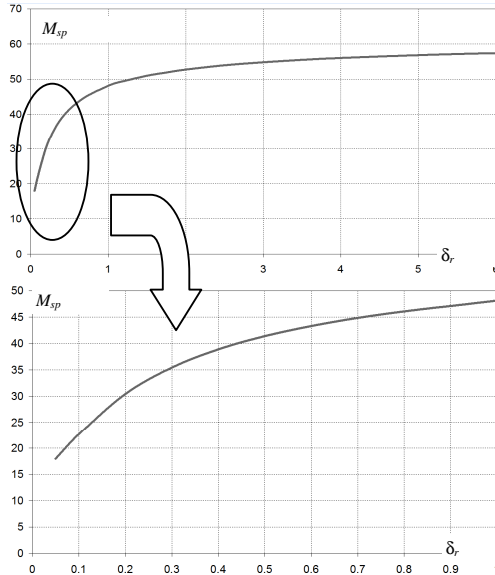
3. Badania symulacyjne

W celu potwierdzenia możliwości sterowania momentem obrotowym przenoszonym przez opracowane sprzęgło oraz zbadania jego przydatności do poprawy synchronizacji magneto-elektrycznych silników synchronicznych przystosowanych do rozruchu bezpośredniego przeprowadzono szereg badań symulacyjnych przy wykorzystaniu programu *MR_SYM_uni*. Rozpatrywano zarówno ustalone, jak i niestabilne stany pracy układu. Analizowany obszar zdyskretyzowano za pomocą ok. 97 000 elementów trójkątnych oraz 2000 elementów czworokątnych. Wykorzystaną do obliczeń siatkę dyskretyzującą oraz powiększony jej fragment obejmujący obszar z cieczą MR oraz magnesem trwałym pokazano na rys. 3.



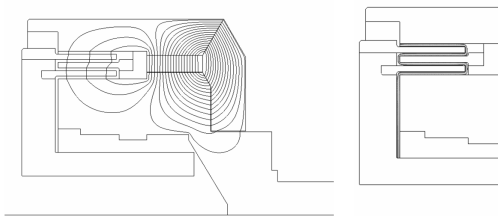
Rys. 3. Siatka dyskretyzująca

W pierwszym etapie badań rozpatrywano stany pracy ustalone. Wyznaczono m.in. charakterystyki regulacyjne $M_{sp}(\delta_r)$ dla $n = \text{const}$ (rys. 4) oraz badano wpływ zmiany długości szczeliny δ_r na rozkład pola prędkości cieczy i rozkład linii sił pola magnetycznego w sprzęgle (rys. 5-7). Z rysunków 5 do 7 wynika, że położenie zwory, poprzez zmianę reluktancji obwodu zwierającego strumień magnesu, wpływa na wartość strumienia głównego w obszarze szczelin z cieczą MR.

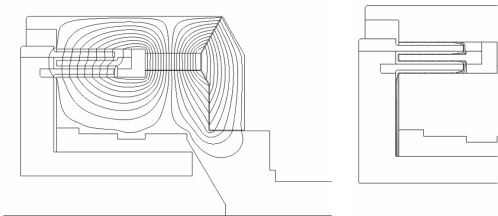


Rys. 4. Charakterystyka regulacyjna momentu sprzęgającego $M_{sp}=f(\delta_r)$

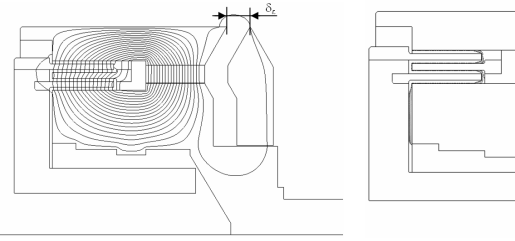
W badaniach założono stałą temperaturę cieczy oraz elementów rdzenia.



Rys. 5. Linie sił pola magnetycznego (po lewej) oraz w powiększeniu rozkład pola prędkości cieczy dla δ_r równej 0,05mm



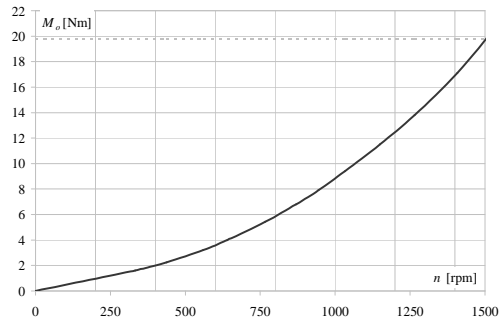
Rys. 6. Linie sił pola magnetycznego (po lewej) oraz w powiększeniu rozkład pola prędkości cieczy dla δ_r równej 0,15mm



Rys. 7. Linie sił pola magnetycznego (po lewej) oraz w powiększeniu rozkład pola prędkości cieczy dla δ_r równej 10 mm

W kolejnym etapie badań rozpatrywano stany pracy nieustalone. Analizowano m.in. zjawiska cieplne w sprzęgle podczas rozruchu układu napędowego. Przyjęto, że układ ten składa się z silnika LSPMSM, sprzęgła i kanałowego wentylatora przemysłowego. Przy projektowaniu sprzęgła dążono do minimalizacji momentu bezwładności podzespołu współpracującego z silnikiem napędowym. Wyznaczone za pomocą opracowanych procedur momenty bezwładności wirnika dwucylindrowego oraz wirnika zewnętrznego (rys. 1) wynosiły odpowiednio $J_{r1} = 0,00218 \cdot \text{kgm}^2$ i $J_{r2} = 0,0194 \cdot \text{kgm}^2$.

Przyjęto, że wentylator jest napędzany trójfazowym czterobiegunowym silnikiem LSPMSM o mocy znamionowej P_N 3,8 kW [1,2]. Charakterystykę mechaniczną wentylatora pokazano na rys. 8. W obliczeniach symulacyjnych przyjęto moment bezwładności wirnika wentylatora $J_w = 0,222 \text{ kgm}^2$.

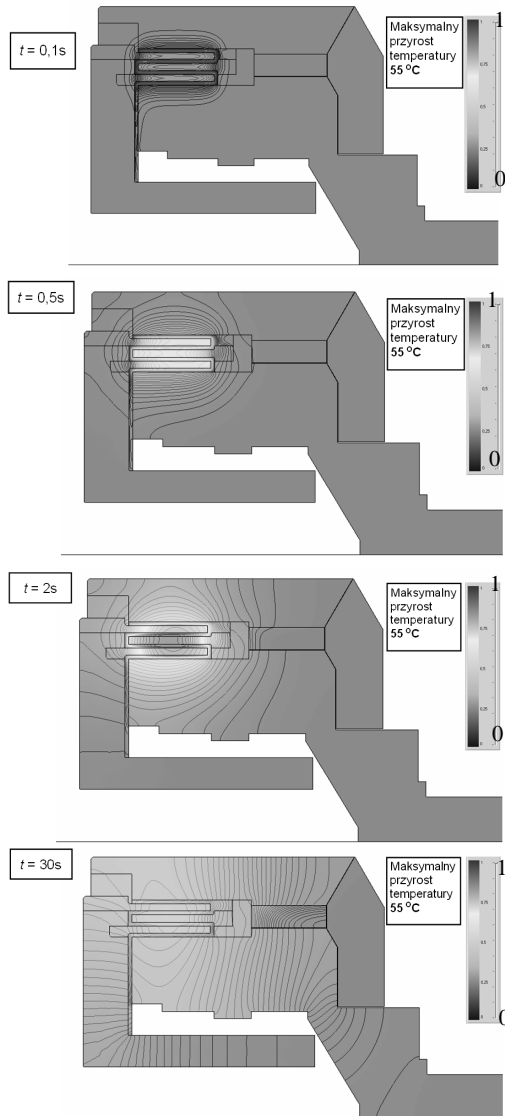


Rys. 8. Charakterystyka mechaniczna wentylatora przemysłowego

Kompleksowa polowa symulacja dynamiki całego rozpatrywanego układu napędowego wymagałaby zastosowania polowego modelu zjawisk sprzężonych również do analizy procesu rozruchu silnika [1]. W celu uproszczenia algorytmu analizy układu napędowego i skrócenia czasu obliczeń ujęcie polowe wykorzystano tylko do analizy zjawisk sprzężonych w sprzęgle. Silnik napędowy odwzorowano w

sposób uproszony. Założono, że znana jest jego charakterystyka mechaniczna.

Dla tak sformułowanego problemu analizowano m.in. wpływ rozruchu bezpośredniego na rozkład i przebieg temperatury w sprzęgle. Otrzymane rozkłady temperatury dla wybranych chwil zaprezentowano na rys. 9. W celu porównania rozkładów pola na wszystkich rysunkach zachowano tę samą względną skalę temperatury.

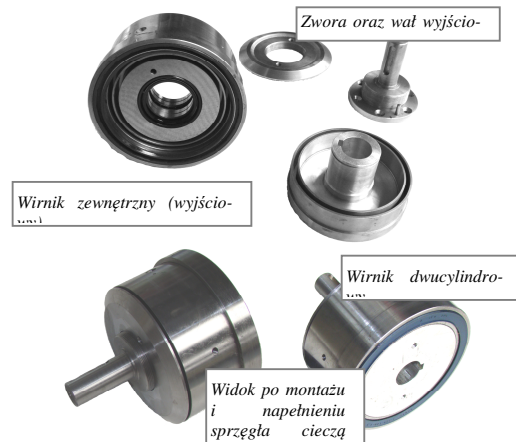


Rys. 9. Rozkład temperatury w sprzęgle dla wybranych chwil czasowych

4. Synchronizacja silnika LSPMSM – badania eksperymentalne

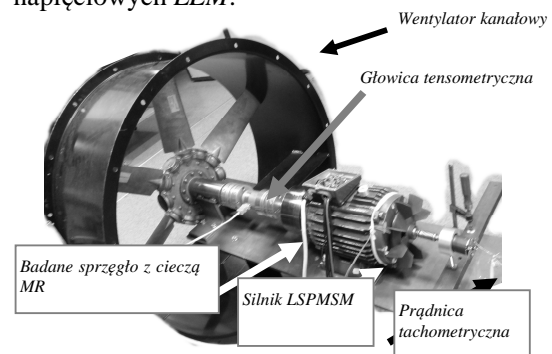
W celu weryfikacji przydatności zaproponowanego algorytmu i oprogramowania do analizy zjawisk sprzężonych opracowano kon-

strukcję oraz zbudowano prototyp magnetoreologicznego sprzęgła rozruchowo-przeciążeniowego. Podstawowe podzespoły oraz widok zmontowanego prototypu pokazano na rys. 10.



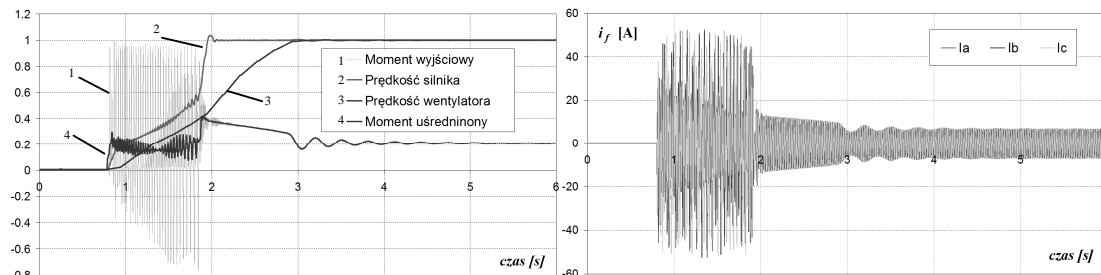
Rys. 10. Podstawowe podzespoły oraz widok zmontowanego prototypu sprzęgła

Badany układ napędowy pokazano na rys. 11. Do pomiaru i rejestracji wielkości elektrycznych i mechanicznych wykorzystano głowicę tensometryczną MT-100 firmy SensorAT oraz kartę pomiarową National Instruments wyposażoną w zestaw przetworników prądowych i napięciowych LEM.



Rys. 11. Badany układ napędowy

Podstawowym celem przeprowadzonych badań było zbadanie procesu synchronizacji silnika LSPMSM napędzającego obciążenie o dużym momencie bezwładności. Zarejestrowane przebiegi prędkości obrotowych silnika i wentylatora, momentu obrotowego na wale wyjściowym sprzęgła oraz przebiegi prądów fazowych podczas rozruchu pokazano na rys. 12. Przebiegi wielkości mechanicznych wykreślono w jednostkach względnych. Chwilowe wartości prędkości i momentu odniesiono odpowiednio do 1500 obr/min oraz 100Nm.



Rys. 12. Przebiegi prędkości obrotowych silnika i wentylatora, momentu wyjściowego $M_o(t)$ oraz prądów fazowych podczas rozruchu bezpośredniego rozpatrywanego układu napędowego

5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania symulacyjne stanów ustalonych i przejściowych potwierdzają możliwość regulacji momentu sprzęgającego poprzez zmianę położenia zwory. Z przeprowadzonych badań symulacyjnych stanów nieustalonych wynika, że układ został zaprojektowany poprawnie, tj. uzyskiwane podczas rozruchów przyrosty temperatury są znacznie niższe od dopuszczalnych dla cieczy MR i magnesów trwałych.

Analizując rezultaty przeprowadzonych badań eksperymentalnych można ponadto zauważyć, że proces synchronizacji silnika LSPMSM odbywa się bez przeszkód. Silnik uzyskuje prędkość synchroniczną już po 1 sekundzie, a wirnik wentylatora po czasie 2.1 sekundy. Dla porównania proces synchronizacji układu napędowego bez sprzęgła trwał około 5 sekund.

Z punktu widzenia dynamiki całego układu napędowego, zaproponowane sprzęgło ogranicza moment przenoszony z maszyny napędowej do wartości nastawionej na sprzęgło. Z tego względu nadwyżka momentu napędowego generowana przez wał silnika jest zużyta w całości na rozpędzenie wału silnika do prędkości synchronicznej, natomiast obciążenie jest rozpędzane momentem nominalnym sprzęgła. Energia wynikająca z różnicy prędkości obrotowych podczas rozruchu oraz momentu nominalnego zostaje zamieniona na ciepło wydzielane w sprzęgło. Dzięki zastosowaniu prezentowanego sprzęgła moment bezwładności układu napędzanego nie wpływa na czas rozruchu silnika LSPMSM, wpływa jedynie na czas rozpędzenia obciążenia i na ilość wydzielanego w cieczy ciepła.

6. Literatura

[1] Barański M., Szeląg W., Jędrzycka C., Mikołajewicz J., Łukaszewicz P.: *Analiza i badanie silni-*

ka synchronicznego o rozruchu bezpośrednim i magnesach w wirniku rozłożonych w kształcie litery U. Przegląd Elektrotechniczny, R. 89, Nr 2b/2013 s. 107-111.

[2] Idziak P., Barański M., Łyskawiński W., Kowalski K., *Ocena wybranych parametrów energetycznych modelowych silników prądu przemiennego małej mocy o różnych konstrukcjach wirnika*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 100, 2013, wyd. BOBRME Komel., s. 53-57.

[3] Ngatu, G.T.; Wereley, N.M., *Viscometric and Sedimentation Characterization of Bidisperse Magnetorheological Fluids*, Magnetics, IEEE Transactions on , vol.43, no.6, pp.2474,2476, June 2007

[4] Jędrzycka C., Sujka P., Szeląg W.: *The influence of magnetic hysteresis on magnetorheological fluid clutch operation*, COMPEL, Vol. 28 No. 3, 2009, pp. 711-721.

[5] Jędrzycka C., Szeląg W.: *Sposób regulacji momentu sprzęgającego w magnetoreologicznym sprzęgle wiskotycznym*, patent nr P-391466, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Uznanie patentu - Warszawa 09.01.2014 r.

[6] Jędrzycka C., Szeląg W., Wojciechowski R., *FE Analysis of Magnetorheological Brake with Hybrid Excitation*, SELM 2013, 15 – 18 May 2013, Zawiercie, Poland, online: <http://ieeexplore.ieee.org/>

[7] Szeląg W.: *Przetworniki elektromagnetyczne z cieczą magnetoreologiczną*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.

[8] Yadmellat, P.; Kermani, M.R., *Adaptive Modeling of a Magnetorheological Clutch*, Transactions on Mechatronics, IEEE/ASME, vol.19, no.5, pp.1716-1723, Oct. 2014 doi: 10.1109/TMECH.2013.2292594

Autorzy

dr inż. Cezary Jędrzycka, cezary.jedryczka@put.poznan.pl, prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg, wojciech.szelag@put.poznan.pl, dr inż. Mariusz Barański, mariusz.baranski@put.poznan.pl, dr inż. Adam Myszowski, adam.myszowski@put.poznan.pl
Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3A,