

Cezary JEŃDRYCZKA*
Wiesław ŁYSKAWIŃSKI*
Wojciech SZELĄG*
Rafał WOJCIECHOWSKI*

BADANIE I ANALIZA MAGNETOREOLOGICZNEGO SPRZĘGŁA O STRUKTURZE TARCZOWEJ

W artykule przedstawiono budowę oraz zasadę działania sprzęgła elektromagnetycznego z cieczą magnetoreologiczną (MR). Zaprezentowano wykonany prototyp przetwornika. Omówiono problematykę symulacji zjawisk sprzężonych w układach przenoszenia momentu obrotowego. Zaprezentowano wyniki obliczeń symulacyjnych oraz rezultaty badań eksperymentalnych rozpatrywanego sprzęgła. Badania przeprowadzono na opracowanym przez autorów skomputeryzowanym stanowisku pomiarowym.

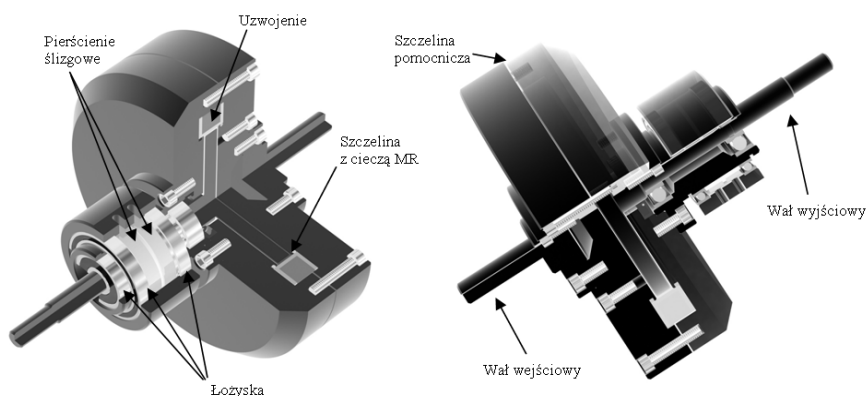
1. WPROWADZENIE

We współczesnych rozwiązaniach napędowych, coraz częściej pojawia się konieczność dynamicznego i precyzyjnego sterowania mocą. Sytuacja taka ma miejsce m.in. w maszynach roboczych, pojazdach mechanicznych, lotnictwie, technice wojskowej, liniach produkcyjnych, różnego rodzaju układach wykonawczych automatyki i robotyki. Jednym ze sposobów realizacji tego typu zadań jest wykorzystanie do kontrolowanego przekazywania mocy przetworników z cieczami sterowanymi polem magnetycznym [1, 3, 5, 8, 9, 12]. Przykładem takiego jest analizowane elektromagnetyczne sprzęgło z cieczą MR o strukturze tarczowej. Jego konstrukcję pokazano na rys. 1. Do zaprojektowania sprzęgła wykorzystano opracowany na Politechnice Poznańskiej program komputery [4].

Zasada działania sprzęgła oparta jest na zmianie właściwości reologicznych cieczy magnetoreologicznej pod wpływem zmian pola magnetycznego [10]. Ciecz ta znajduje się w szczelinie pomiędzy wirującymi elementami sprzęgła. Przy braku pola ciecz MR charakteryzuje się pomijalnie małą lepkością. W takiej sytuacji moment przekazywany pomiędzy wałem wejściowym, a wyjściowym przetwornika równy jest sumie momentów tarcia powstających w uszczelnieniach, łożyskach, zestyku ślizgowym oraz szczytkowego momentu tarcia lepkiego wirnika o ciecz. W chwili zasilenia uzwojenia wzbudzającego zwiększa się pole

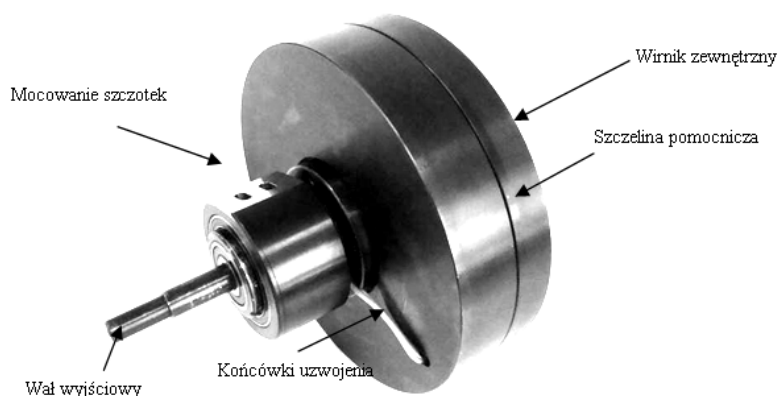
* Politechnika Poznańska.

magnetyczne w szczelinie z cieczą MR, co powoduje drastyczny wzrost lepkości cieczy. Temu zjawisku towarzyszy wzrost tarcia lepkiego pomiędzy elementami ruchomymi sprzęgła. Powstały w ten sposób moment sprzęgający można płynnie regulować za pomocą prądu wzbudzenia. Dobierając odpowiednio prąd można doprowadzić do pracy części ruchomych sprzęgła z poślizgiem i regulować w ten sposób prędkość obrotową układu napędzanego. Sprzęgło może być również przeznaczone do przyłączania i odłączania układu napędzanego od silnika napędowego. Wówczas stanem układu steruje się przez załączenie lub odłączenie napięcia zasilającego uzwojenie wzbudzenia.



Rys. 1. Konstrukcja rozważanego sprzęgła z cieczą MR o strukturze tarczowej

Podstawowe elementy konstrukcyjne oraz widok zbudowanego w Zakładzie Mechatroniki i Maszyn Elektrycznych prototypu sprzęgła modelowego pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Podstawowe elementy konstrukcyjne oraz widok sprzęgła elektromagnetycznego tarczowego z cieczą MR

2. MODELOWANIE ZJAWISK SPRZEŻONYCH

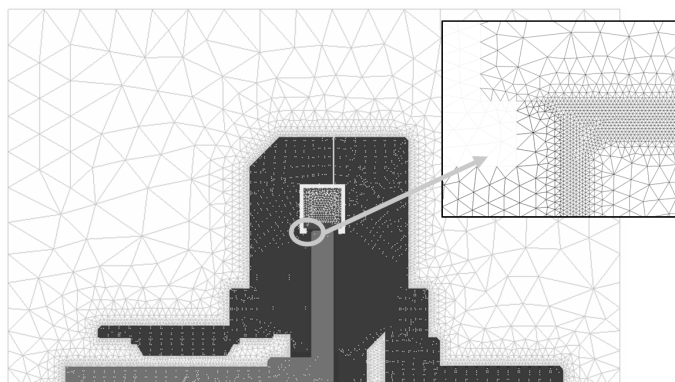
Zjawiska występujące w układach przenoszenia sił i momentów obrotowych, w których jako medium robocze wykorzystuje się ciecz magnetoreologiczną mają charakter polowy i są wzajemnie sprzężone [3, 4, 12]. Pole magnetyczne wzniesane poprzez układ wzbudzenia wpływa na lepkość cieczy MR. Od lepkości oraz od rozkładu pola prędkości płynu magnetycznego w szczelinie roboczej urządzenia zależą naprężenia mechaniczne, a więc i siły działające na element ruchomy przetwornika. Rozkład pola prędkości cieczy jest powiązany z polem ciśnienia i przez warunki brzegowe zależy od prędkości elementu ruchomego. Ta zaś z kolei wynika z równania dynamiki przetwornika. Podczas pracy przetworników z cieczą MR wydzielają się w nich straty mocy. Są one spowodowane tarciem wewnętrznym w cieczy, tarciem w uszczelnieniach i łożyskach. Powstają one również w uzwojeniach przetwornika, a w stanach elektromagnetycznie niestabilnych także w obwodzie magnetycznym. Straty są źródłem ciepła i powodują wzrost temperatury podzespołów przetwornika. Zjawiska cieplne na skutek wpływu temperatury na parametry reologiczne cieczy [11], właściwości magnetyczne rdzenia i magnesów oraz na konduktywność i przewodność cieplną materiałów wpływają zarówno na zachowanie się przetwornika w stanach pracy ustalonych, jak również na przebieg stanów elektromagnetycznie, hydrodynamicznie, cieplnie i mechanicznie niestabilnych. Omówione złożone powiązania zjawisk komplikują bardzo opisujący je model matematyczny oraz algorytm jego rozwiązania. Analizę zjawisk sprzężonych utrudnia dodatkowo różna ich zmienność w czasie.

W praktyce do projektowania i analizy przetworników z cieczą MR, ze względu na trudności związane z rozwiązaniem równań polowego modelu zjawisk zazwyczaj wykorzystuje się modele obwodowe, lub modele polowo-obwodowe [2, 6, 8, 13]. W modelach obwodowych zjawiska polowe rozpatruje się w sposób uproszczony, tj. sprowadza się zagadnienie polowe trójwymiarowe do schematu zastępczego. Dokładność tych metod zależy w dużym stopniu od przyjętych założeń upraszczających i zdaniem autorów jest niewystarczająca dla potrzeb projektowania i prowadzenia badań przetworników z cieczą MR. Z tego względu do modelowania badanego sprzęgła zastosowano przedstawiony w pracach [3, 4, 12] kompleksowy polowy model zjawisk sprzężonych oraz opracowane na jego podstawie oprogramowanie *MR_SYM_uni*. Wykorzystany model obejmuje równania: niestabilnego pola elektromagnetycznego, z uwzględnieniem wymuszeń napięciowych, niestabilnego pola prędkości cieczy MR, niestacjonarnego pola temperatury oraz dynamiki elementów ruchomych rozpatrywanych przetworników. W opracowanym na podstawie kompleksowego modelu zjawisk oprogramowaniu umożliwiono import siatek dyskretyzujących tworzonych w profesjonalnym oprogramowaniu GID [7]. Dzięki temu program *MR_SYM_uni* umożliwia

projektowanie oraz analizę szerokiej gamy przetworników z cieczą MR do przenoszenia momentów obrotowych.

3. BADANIA SYMULACYJNE SPRZĘGŁA TARCZOWEGO

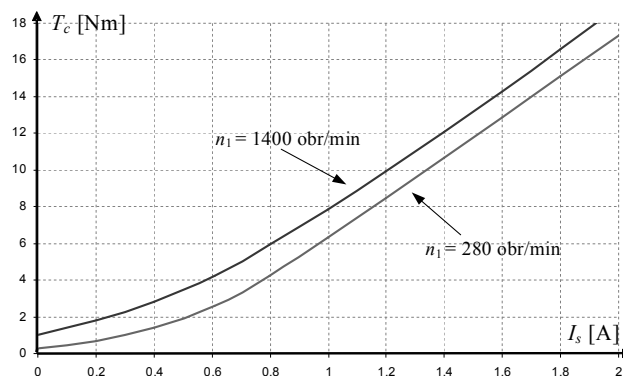
Celem badań symulacyjnych było określenie charakterystyk regulacyjnych sprzęgła oraz analiza stanów dynamicznych towarzyszących procesom załączania i odłączania obciążenia. Przeprowadzono je za pomocą programu *MR_SYM_uni*. W rozważaniach uwzględniono nieliniowe własności materiałów ferromagnetycznych, nieliniowe właściwości reologiczne cieczy MR oraz prądy wirowe indukowane w masywnych elementach przewodzących.



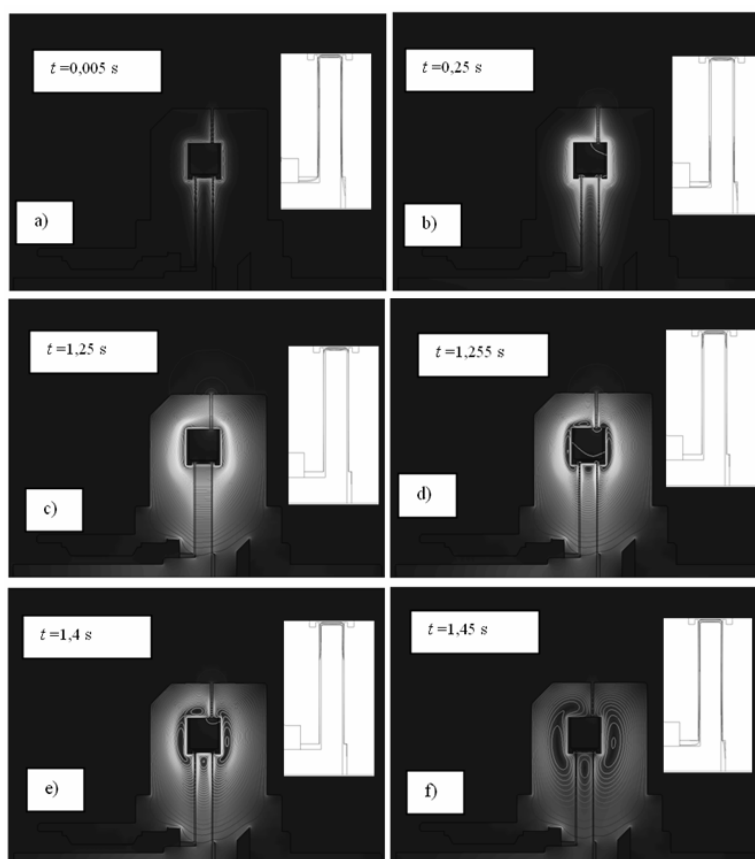
Rys. 3. Siatka dyskretyzująca o 79 690 elementach

Charakterystyki regulacyjne wyznaczono na podstawie analizy stanu pracy ustalonego pod względem mechanicznym, elektromagnetycznym i cieplnym. Rozpatrywany obszar zdyskretyzowano wykorzystując 79 690 elementów trójkątnych. Całą siatkę dyskretyzującą oraz jej powiększony fragment usytuowany w obszarze przyszczelinowym pokazano na rys. 3. Obliczenia przeprowadzono dla kilku zadanych wartości prądu wzbudzenia I_s . Na rysunku 4 pokazano uzyskane statyczne charakterystyki regulacyjne dla dwóch wybranych prędkości obrotowych układu napędowego przy pracy hamulcowej sprzęgła (tj. gdy prędkość układu obciążenia $n_2 = 0$ obr/min).

Rozkłady gęstości strumienia i linii sił pola magnetycznego oraz rozkłady pola prędkości cieczy MR dla wybranych chwil po skokowym załączeniu źródła zasilania przedstawiono na rys. 5a-c. Natomiast rozkłady pól uzyskane bezpośrednio po odłączeniu napięcia zasilania pokazano na rys. 5d-f. W symulacji przyjęto następujące parametry obwodu zasilającego: $U_z = 9\text{V}$, $R_u = 8,9\Omega$, $z = 540$. Obliczone dla stanu załączenia i odłączenia napięcia przebiegi prądu, momentu sprzęgającego oraz prędkości obrotowych zawarto w rozdziale prezentującym wyniki badań eksperymentalnych.



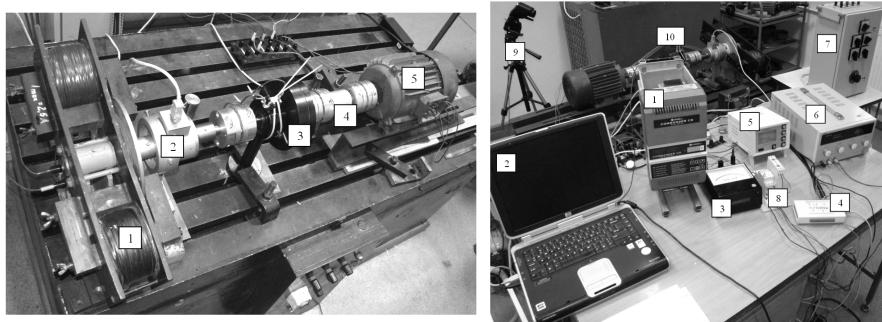
Rys. 4. Charakterystyki regulacyjne sprzęgła tarczowego dla $n_i = 1400$ oraz 280 obr/min



Rys. 5. Rozkłady gęstości strumienia magnetycznego i linii sił pola oraz pola prędkości cieczy MR dla wybranych chwil czasowych po skokowym załączeniu a),b),c) oraz odłączeniu d),e),f) napięcia zasilania

4. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Celem przeprowadzonych badań eksperymentalnych było wyznaczenie parametrów funkcjonalnych oraz zweryfikowanie przydatności opracowanego algorytmu i oprogramowania do analizy magnetoreologicznego sprzęgła o strukturze tarczowej. Pomiary wykonano za pomocą zestawu do pomiaru wielkości mechanicznych składającego się z głowicy tensometrycznej MT-50Nm oraz miernika wielkości mechanicznych MW2006-4. Badania przeprowadzono na specjalnie do tego celu zbudowanym skomputeryzowanym stanowisku pomiarowym pokazanym na rys. 6. Składa się ono z asynchronicznego silnika napędowego połączonego poprzez badane sprzęgło z hamulcem wiroprądowym.



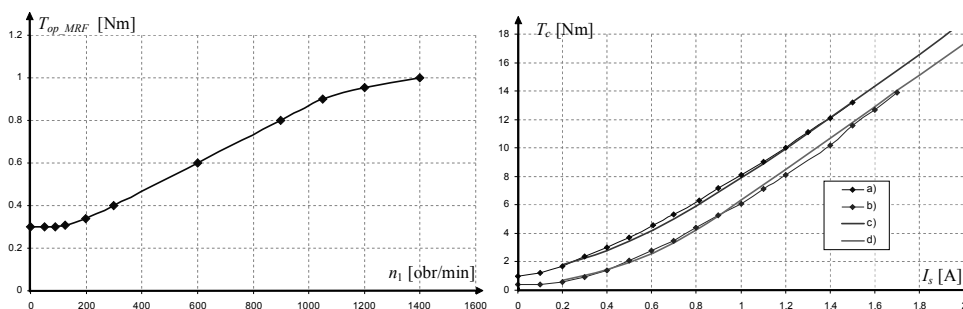
Rys. 6. Fragment stanowiska pomiarowego – po lewej – badany układ napędowy: 1) hamulec wiroprądowy, 2) głowica tensometryczna nr 1, 3) magnetoreologiczne sprzęgło tarczowe, 4) głowica tensometryczna nr 2, 5) silnik napędowy ; – po prawej – zasilanie oraz aparatura pomiarowa: 1) przemiennik częstotliwości, 2) komputer do akwizycji danych, 3) miernik prądu, 4) przetwornik analogowo-cyfrowy, 5) miernik wielkości mechanicznych, 6) zasilacz sprzęgła MR, 7) zasilacz hamowni, 8) układ czasowego załączania sprzęgła, 9) pirometr, 10) obiekt badany

Badania przeprowadzono dwuetapowo. Pierwszy dotyczył badania ustalonych stanów pracy przetwornika, a drugi analizy stanów przejściowych rozpatrywanego sprzęgła.

Etap 1: Pomiar charakterystyk regulacyjnych i zewnętrznych sprzęgła

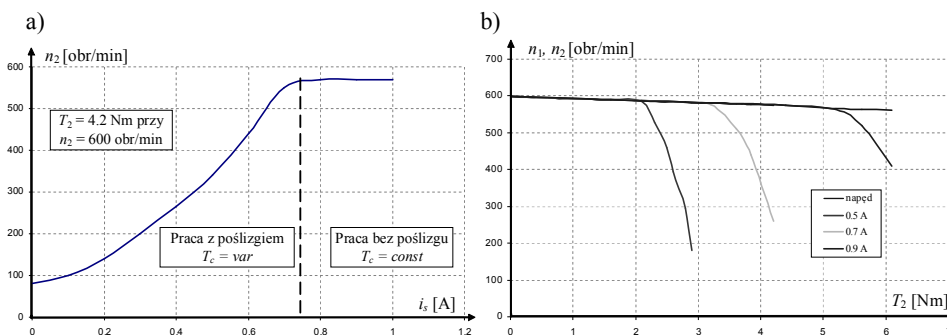
Do potrzeb weryfikacji opracowanego programu *MR_SYM_uni* dokonano pomiaru pasożytniczego momentu sprzęgającego T_{op_MRF} w funkcji prędkości obrotowej wału napędowego n_1 . Uzyskaną charakterystykę pokazano po prawej stronie rys. 7. Następnie zmierzono statyczne charakterystyki regulacyjne momentu sprzęgającego T_c w funkcji prądu sterującego I_s . Charakterystyki zmierzone i obliczone dla dwóch prędkości wirowania układu napędowego pokazano po lewej stronie rys. 7. Pomiarów dokonano przy zatrzymanym wale wyjściowym sprzęgła.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że rezultaty pomiarów w niewielkim stopniu różnią się od wyników obliczeń.



Rys. 7. Po lewej zależność momentu oporowego T_{op_MRF} od prędkości obrotowej silnika napędowego n_1 ; po prawej charakterystyki regulacyjne sprzęgła tarczowego dla: a) pomiar dla $n_1 = 1400$ obr/min, b) pomiar dla $n_1 = 280$ obr/min, c) symulacja dla $n_1 = 1400$ obr/min, d) symulacja dla $n_1 = 280$ obr/min

Charakterystykę regulacyjną prędkości określającą zależność prędkości n_2 od prądu wzbudzenia i_s przy stałej prędkości silnika napędowego n_1 i momentu obciążenia T_2 pokazano na rys. 8a.

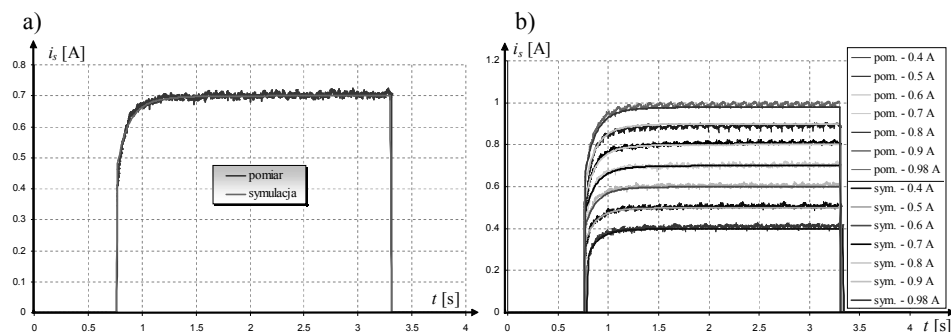


Rys. 8. Charakterystyka prędkości obrotowej na wyjściu sprzęgła w funkcji prądu wzbudzenia a) oraz charakterystyka mechaniczna silnika oraz charakterystyki zewnętrzne sprzęgła dla zadanych wartości prądu wzbudzenia b)

Natomiast na rys. 8b pokazano zmierzone charakterystyki zewnętrzne sprzęgła. Wynika z nich, że wraz ze wzrostem prądu wzbudzenia wzrasta moment obrotowy przenoszony przez sprzęgło. Po przekroczeniu nastawionej (prądem wzbudzenia) wartości momentu sprzęgającego prędkość na wyjściu układu maleje.

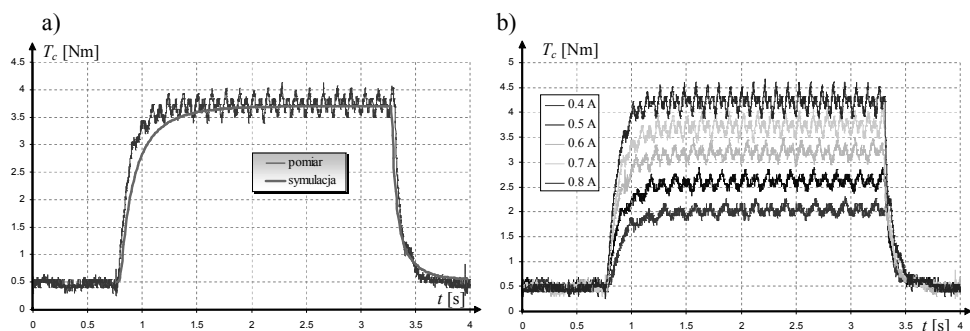
Etap 2: Badanie niestabilnych stanów pracy sprzęgła

Dokonano rejestracji przebiegów prądu i_s oraz momentu sprzęgającego T_c w trybie pracy hamulcowej sprzęgła (dla $n_2 = 0$). Badano stany przejściowe ze skokowym załączeniem i wyłączeniem napięcia zasilającego cewkę wzbudzenia sprzęgła. Zmierzona, metodą techniczną, rezystancja cewki wzbudzenia dla temperatury 21°C wynosiła $R_w = 8.7 \Omega$. Prędkość silnika napędowego n_1 była równa 300 obr/min. Zmierzona średnia wartość spadku napięcia na zestyku szczotka-pierścień wynosiła 1.24 V. Porównanie zarejestrowanych przebiegów prądu z wynikami symulacji pokazano na rys. 9.



Rys. 9. Przebieg prądu i_s po skokowym załączeniu i wyłączeniu napięcia zasilania – porównanie z wynikami symulacji dla napięcia zasilającego $U_z = 8.5 \text{ V}$ (a) oraz przebiegi prądu i_s po skokowym załączeniu i wyłączeniu napięcia zasilania – porównanie z wynikami symulacji dla wybranych wartości napięcia zasilającego (b)

Porównanie zarejestrowanego przebiegu momentu sprzęgającego z wynikami symulacji dla napięcia 8.5 V pokazano na rys. 10a.



Rys. 10. Przebieg momentu sprzęgającego T_c przy skokowym załączeniu i wyłączeniu napięcia zasilania – porównanie z wynikami symulacji dla napięcia zasilającego $U_z = 8.5 \text{ V}$ (a) oraz przebiegi momentu sprzęgającego T_c po skokowym załączeniu i wyłączeniu napięcia zasilania – dla wybranych wartości napięcia zasilającego (b)

Na rys. 10b pokazano zarejestrowane przebiegi momentów sprzęgających T_c dla wybranych wartości napięcia zasilającego U_z . Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że dla pracy hamulcowej uzyskane wyniki eksperymentalne w niewielkim stopniu różnią się od wyników symulacji. Największe rozbieżności można zaobserwować dla przebiegu momentu sprzęgającego. Zdaniem autorów wynikają one z niedokładnej identyfikacji parametrów modelu. Prawdopodobną przyczyną jest przyjęta w symulacjach mniejsza niż w rzeczywistości wartość rezystywności materiału rdzenia sprzęgła.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono konstrukcję oraz wyjaśniono zasadę działania sprzęgła z cieczą MR. Zaprezentowano opracowany i zbudowany prototyp sprzęgła tarczowego. Wykorzystując polowy model zjawisk oraz autorskie oprogramowanie *MR_SYM_uni* dokonano analizy ustalonych i przejściowych stanów pracy tego sprzęgła. Wyniki obliczeń porównano z rezultatami badań eksperymentalnych. Badania te wykonano na specjalnie do tego celu zaprojektowanym i zbudowanym przez autorów skomputeryzowanym stanowisku pomiarowym. Zwrócono uwagę na dużą zgodność uzyskanych wyników badań eksperymentalnych i symulacyjnych. Potwierdza ona przydatność zastosowanego modelu polowego oraz opracowanego programu *MR_SYM_uni* do analizy ustalonych i przejściowych stanów pracy, wyznaczania parametrów funkcjonalnych oraz projektowania układów z cieczą magnetoreologiczną.

Opracowanie efektywnych narzędzi do analizy i projektowania przetworników z cieczą MR, zdaniem autorów przyczyni się do wzrostu zainteresowania tego typu przetwornikami przez jednostki badawcze i przemysłowe.

LITERATURA

- [1] Bansbach, E.E., Torque Transfer Apparatus Using Magnetorheological Fluids, United States Patent Number (5779013), 1998.
- [2] Hu W., Cook E., Wereley N.M., Energy Absorber Using a Magnetorheological Bypass Valve Filled With Ferromagnetic Beads, IEEE Transactions on Magnetics, 2007, Vol. 43, No. 6, s. 2695-2697.
- [3] 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.
- [4] Jędryczka C., Polowa analiza stanów nieustalonych w magnetoreologicznych układach przenoszenia sił oraz momentów obrotowych, Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Poznań 2011, ss. 187.

- [5] Jolly M.R., Bender J.W., Carlson J.D., Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1999, Vol. 10, No. 1, s. 5-13.
- [6] Joško D., Zvonko H., Kostelac M., Modeling of Electromagnetic Circuit of a Magnetorheological Fluid Clutch, 18th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control Saint Petersburg, Russia, July 8-10, 2009.
- [7] <http://gid.cimne.upc.es/whats-gid>, (dostęp 14.01.2012).
- [8] Kęsy Z., *Sprzęgła z cieczami elektro- i magnetoreologicznymi*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, 2008, ss. 180.
- [9] Lampe D., Grundmann R., Transitional and solid state behaviour of a Magnetorheological clutch, in the 7th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 2000, ss. 4.
- [10] Odenbach S., *Handbook of Magnetic Materials Vol. 16, Chapter 3*, Edited by K.H.J. Buschow, Ph.D., ISBN: 978-0-444-51850-7, 2006, s. 127-208.
- [11] Szelaż W., Jędryczka C., Wojciechowski R., Nowak M., Analiza wpływu pola magnetycznego i temperatury na naprężenia styczne w cieczy magnetoreologicznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 6/2009, s. 93-97.
- [12] Szelaż W., *Przetworniki elektromagnetyczne z cieczą magnetoreologiczną*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2010, ss. 137.
- [13] Winter S.H., Bouzit M., Use of Magnetorheological Fluid in a Force Feedback Glove, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2007, Vol. 15, No. 1, s. 2-8.

INVESTIGATION AND ANALYSIS OF THE DISK SHAPE MAGNETORHEOLOGICAL CLUTCH

In the paper construction and the principle of operation of the disk shaped electromagnetic clutch with magnetorheological fluid have been introduced. The modeling of the coupled phenomena in transducers with MR fluids is briefly discussed. The selected simulations results of steady and transient state operation of considered clutch are presented. The construction of the prototype and computer aided test stand have been described. The selected results of measurements have been presented and compared to the results of simulation.