

**Paweł Kowol**  
 Politechnika Śląska, Gliwice

## POLOWA ANALIZA WPLYWU WLAŚCIWOŚCI CIECZY MAGNETOREOLOGICZNEJ I KSZTAŁTU TARCZ NA PARAMETRY SPRZĘGŁA MAGNETOREOLOGICZNEGO

### FIELD ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF MAGNETORHEOLOGICAL FLUID PROPERTIES AND DISC SHAPE ON THE MAGNETORHEOLOGICAL CLUTCH PARAMETERS

**Abstract:** In the paper the properties of magnetorheological (MR) fluids are described. The main parameters of magnetorheological fluids according to applications are characterized. Moreover, the basic characteristics of commercially available fluids, as: magnetization curves, yield share stress versus magnetic field intensity are shown. The multidisc magnetorheological clutch with permanent magnet in magnetic core is presented and the principles of operations are described. Furthermore the proposed modification of clutch discs' shape, which enables an increase of discs' surface is presented. This modification is made in order to boost clutching torque – the torque transmitted by the clutch. In the next part of the paper magnetic field models for two types of construction and two types of magnetorheological fluid are presented. There are also shown the results of field calculations as magnetic field distributions in the clutch. The clutching torque calculation procedures are described and the results of calculations for different types of clutch construction and magnetorheological fluids are presented. The results of the calculations show that the change of fluids' types causes a distinct change of clutch parameters, however the change of discs' shape causes does not cause a significant change of clutch parameters.

#### 1. Wprowadzenie

Wśród nowoczesnych materiałów magnetycznych, jakie znalazły zastosowanie w przetwornikach elektromechanicznych, ciecz magnetoreologiczna (ciecz MR) jest materiałem, który charakteryzuje się tym, że przetworzenie energii z elektrycznej na mechaniczną dokonuje się dzięki zmianie parametrów mechanicznych (lepkości) cieczy pod wpływem pola magnetycznego.

#### 2. Ciecz magnetoreologiczna

Zmiana lepkości cieczy MR pod wpływem pola magnetycznego wynika z budowy cieczy. Jest ona zawieszoną drobinek ferromagnetyka – będących pojedynczymi domenami magnetycznymi – w niemagnetycznej cieczy nośnej. Po umieszczeniu cieczy MR w zewnętrznym polu magnetycznym drobinki 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. Po zaniku zewnętrznego pola magnetycznego ciecz

przyjmuje swoją pierwotną postać – cząsteczki ulegają rozproszeniu.

Zmianę naprężeń w cieczy magnetycznej opisuje model Bingham'a [1]:

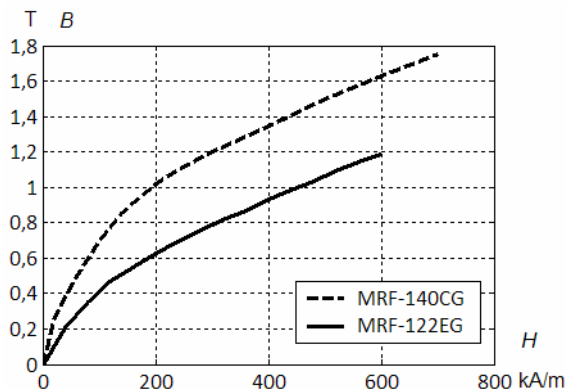
$$\tau = \tau_0(B) + \mu \frac{d\gamma}{dt} \quad (1)$$

gdzie:  $\tau$  - naprężenia styczne w cieczy,  $\tau_0(B)$  - graniczne naprężenia styczne zależne od indukcji  $B$  zewnętrznego pola magnetycznego,  $\mu$  - lepkość dynamiczna cieczy,  $\gamma$  - 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.

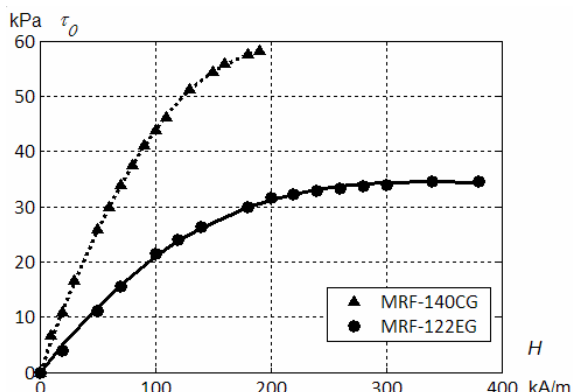
#### 3. Parametry cieczy magnetoreologicznych

Do podstawowych parametrów użytkowych cieczy magnetoreologicznych należą: gęstość  $\rho$ , charakterystyka magnesowania  $B(H)$ , charakterystyka granicznych naprężeń stycznych indukowanych przez pole magnetyczne  $\tau_0(B)$  lub  $\tau_0(H)$ , lepkość  $\mu$  bądź charakterystyka naprężeń stycznych w funkcji odkształceń postaciowych  $\pi(\gamma)$  (przy braku zewnętrznego pola magnetycznego), zakres temperatur pracy.



Rys. 1. Charakterystyki magnesowania dla cieczy magnetoreologicznych

Dostępne na rynku trzy typy cieczy magnetoreologicznych firmy Lord charakteryzują się różnymi parametrami użytkowymi [2]. Różnice te dotyczą przede wszystkim charakterystyk magnesowania  $B(H)$  (rys. 1), charakterystyk granicznych naprężeń stycznych w funkcji natężenia pola magnetycznego  $\tau_0(H)$  (rys. 2) oraz lepkości dynamicznej przy braku pola.



Rys. 2. Charakterystyki  $\tau_0(H)$  dla cieczy MRF-140CG oraz MRF-122EG

W katalogach producentów charakterystyki  $\tau_0(H)$  podawane są w formie wykresów. W procesie projektowo-obliczeniowym układów z cieczą MR dogodnie jest posługiwać się analitycznym opisem zależności między naprężeniem stycznym  $\tau_0$  a indukującym je natężeniem  $H$  pola magnetycznego. Dla odczytanych z katalogów producenta punktów charakterystyk cieczy dokonano aproksymacji charakterystyki  $\tau_0(H)$  funkcją:

$$\tau_0 = a_1 \cdot \left(1 - \frac{H}{a_3}\right) \cdot \arctg\left(\frac{H}{a_2}\right) \quad (2)$$

Współczynniki  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  dobrano na drodze minimalizacji błędu średniokwadratowego z

wykorzystaniem algorytmu Hooke'a-Jeevesa poszukiwania minimum funkcji wielu zmiennych.

Zestawienie charakterystyk naprężeń granicznych  $\tau_0(H)$  w cieczy podanych przez producenta (w postaci punktów) oraz uzyskanych w wyniku aproksymacji przedstawiono na rysunku 2.

#### 4. Przetworniki elektromechaniczne z cieczą magnetoreologiczną

Urządzeniami, w których zastosowanie znalazła ciecz MR są przede wszystkim hamulce i amortyzatory o steralnych charakterystykach momentu i siły.

W hamulcach obrotowych i tłumikach liniowych [1,3] cieczą MR wypełnia się przestrzeń między obudową a elementem ruchomym przetwornika. Elementem ruchomym w hamulcu jest wirnik, a w tłumiku tłok. Na elemencie ruchomym lub w obudowie przetwornika umieszczona jest uzwojenie wzbudzenia. Przepływający przez uzwojenie prąd wytwarza strumień magnetyczny, przenikający przez ciecz znajdującą się pomiędzy obudową, a elementem ruchomym. Zmiana momentu hamującego ruch wirnika wynika ze zmiany lepkości tej cieczy. Lepkość cieczy jest sterowana za pośrednictwem pola magnetycznego, wytworzonego przez prąd przepływający przez uzwojenie wzbudzenia.

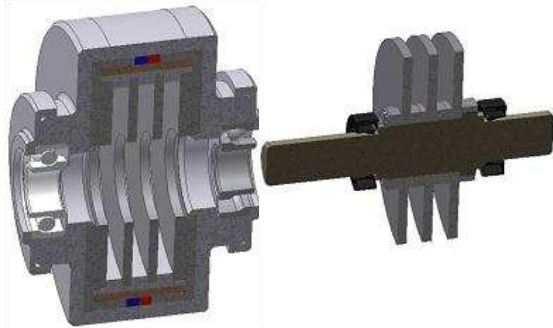
Sprzęgła magnetoreologiczne są urządzeniami, których budowa jest podobna do hamulców magnetoreologicznych [4]. Stąd też hamulce magnetoreologiczne, zasilane poprzez pierścienie ślizgowe bądź przez transformator obrotowy, są wykorzystywane jako sprzęgła magnetoreologiczne [5].

W sprzęgłach magnetoreologicznych moment sprzęgający  $T_s$  (moment, po przekroczeniu którego następuje wyprężenie, tzn. rozpoczyna się ruch wirnika względem obudowy) zależy od naprężenia granicznego  $\tau_0(B)$ . Naprężenie jest funkcją indukcji magnetycznej  $B$  w obszarze roboczym z cieczą, a ta zależy od prądu  $I$  w uzwojeniu. Zatem przez zmianę prądu wzbudzenia  $I$  reguluje się moment sprzęgający  $T_s$ .

#### 5. Sprzęgło magnetoreologiczne z magnesem trwałym

Rozpatrywane sprzęgło magnetoreologiczne przedstawiono na rysunku 3. Po lewej stronie pokazano korpus złożony m.in. z zespołu tarcz,

magnesu trwałego, uzwojenia i zespołu łożyskowego. Po prawej stronie jest widoczny wirnik. Można w nim wyróżnić wał, uszczelnienia i tarcze wirnika.



Rys. 3. Główny element sprzęgła magnetoreologicznego [6] (przed złożeniem): a) korpus, b) wirnik

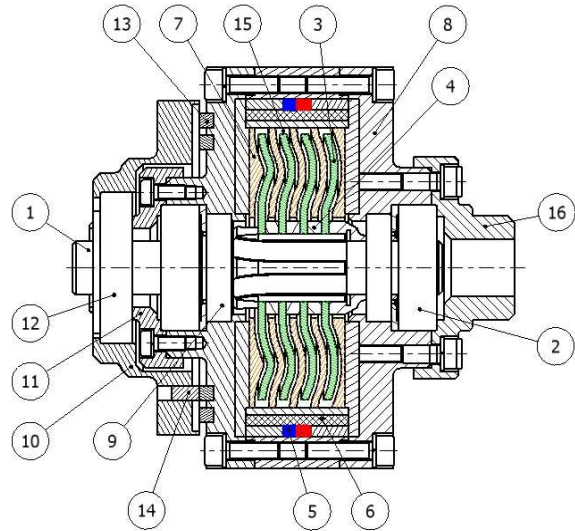
Zasada działania sprzęgła oparta jest na wykorzystaniu zmiany lepkości cieczy MR wypełniającej przestrzeń pomiędzy tarczami wału i tarczami obudowy pod wpływem pola magnetycznego. W sprzęgle znajdują się dwa źródła pola magnetycznego: magnes trwały i uzwojenie sterujące zasilane prądem  $I$ . Magnes 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  $I$  odwzbuja układ i zmniejsza przez to wartość momentu  $T_S(I)$  lub po zmianie kierunku przepływu prądu dowzbuja układ zwiększając w ten sposób moment sprzęgający  $T_S(I_+)$ .

### 5.1. Zmiana kształtu tarcz sprzęgła

Wartość momentu sprzęgającego wytwarzanego przez sprzęgło magnetoreologiczne zależy od wytworzonych w cieczy naprężeń granicznych  $\tau_0(H)$  oraz pola powierzchni czynnej tarcz wirnika, tj. powierzchni styczności wirnika z cieczą magnetoreologiczną.

Przedstawiona na rysunku 3. konstrukcja wielotarczowego sprzęgła magnetoreologicznego ma tarcze płaskie. W celu zwiększenia powierzchni czynnej tarcz zaproponowano zmianę kształtu tarcz wirnika z płaskich na pofalowane. Przedstawiony na rysunku 4. kształt tarcz pofalowanych umożliwia zachowanie stałej grubości zarówno

szczeliny z cieczą magnetoreologiczną, jak i tarcz.

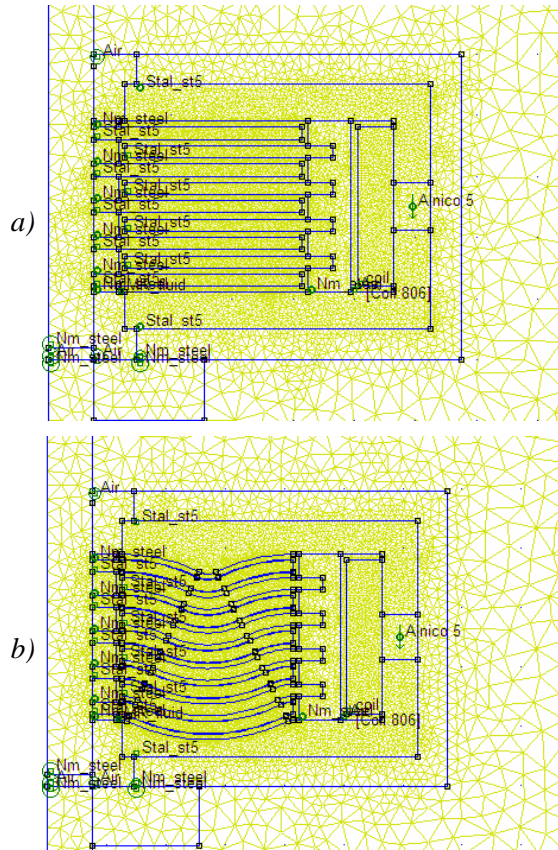


Rys. 4. Konstrukcja sprzęgła [7]: 1 – wał wejściowy, 2 – łożyska osadzenia wału wejściowego, 3 – tarcze profilowane wału wejściowego, 4 – pierścienie dystansowe tarcz wału, 5 – magnes trwały, 6 – cewka sprzęgła, 7 – tarcze części zdawczej, 8 – elementy osadzenia łożysk wału, 9 – uszczelnienia, 10 – osadzenie obudowy 11 – łożysko osadzenia obudowy 12 – łożysko osadzenia obudowy 13 – pierścienie ślizgowe, 14 – szczotki, 15 – przestrzeń wypełniona cieczą magnetoreologiczną, 16 – element zdawczy sprzęgła

### 6. Model polowy magnetyczny sprzęgła

Dla analizowanych konstrukcji sprzęgła magnetoreologicznego opracowano polowe modele symulacyjne w programie FEMM. Ze względu na symetrię rozpatrywanych układów posłużono się modelami osiowosymetrycznymi (rys. 5). W rozważaniach uwzględniono nieliniowe charakterystyki magnesowania obwodu magnetycznego sprzęgła oraz cieczy magnetoreologicznych (rys. 1).

Za pomocą programu FEMM i zaprezentowanych modeli polowych wyznaczono rozkłady pola magnetycznego w sprzęgle. Rozkład pola magnetycznego przy zerowym prądzie w uzwojeniu sterującym przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 4. Polowy 2D osiowy symetryczny model sprzęgła magnetoreologicznego dla: a) tarcz prostych, b) tarcz pofalowanych

## 7. Obliczenia momentu sprzęgającego

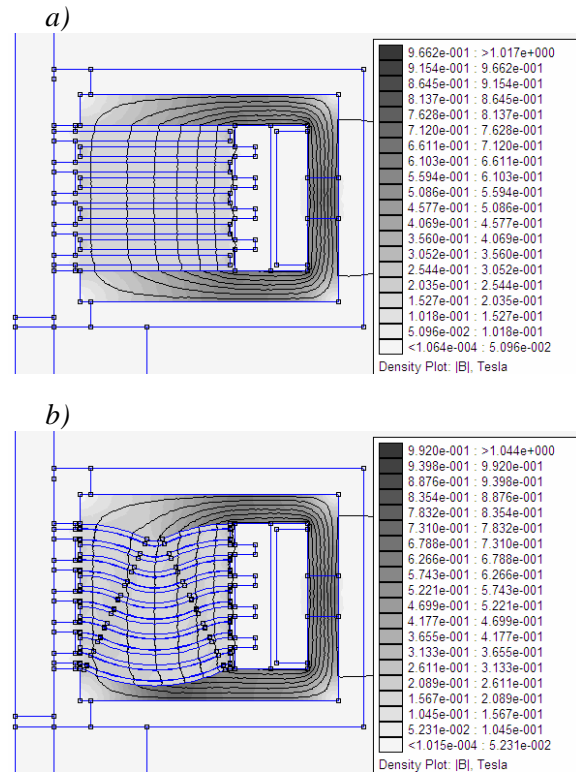
Na podstawie wyznaczonych rozkładów pola magnetycznego w sprzęgle obliczono wartości momentu sprzęgającego [8]. Na podstawie wyznaczonych relacji  $\tau_0(H)$  i uzyskanych rozkładów natężenia pola magnetycznego w cieczy magnetoreologicznej (składowej normalnej natężenia pola magnetycznego  $H_n$ ) przy granicy styczności cieczy z tarczami wirnika (w modelu osiowym symetrycznym przy krawędziach tarcz wirnika), obliczono wartości momentu sprzęgającego dla tarcz płaskich:

$$T_S = \int_{R_1}^{R_2} \tau_0(H_n(r)) 2\pi r^2 dr, \quad (3)$$

gdzie:  $R_1$  – wewnętrzny promień tarczy wirnika,  $R_2$  – zewnętrzny promień tarczy wirnika, a także dla tarcz pofalowanych:

$$T_S = \sum_K \int_{-\alpha_{\max}}^{\alpha_{\max}} \tau_0(H_n(\alpha)) 2\pi (R + r \sin \alpha)^2 d\alpha, \quad (4)$$

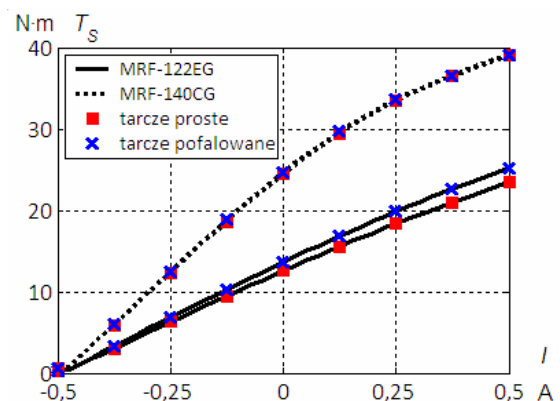
gdzie:  $K$  - ilość łuków widocznych na przekroju tarcz wirnika,  $\alpha_{\max}$  - rozpiętość łuku



Rys. 5. Rozkład pola magnetycznego w sprzęgle magnetoreologicznym przy zerowym prądzie w uzwojeniu sterującym: a) dla tarcz prostych, b) dla tarcz pofalowanych

( $\alpha_{\max} = \pi/6,98$ ),  $R$  - odległość od osi wału do środka okręgu, którego fragment stanowi łuk,  $r$  - promień łuku.

Obliczeń dokonano dla szeregu wartości prądu w uzwojeniu z zakresu  $I = -0,5 \div 0,5$  A. Wartościom maksymalnym prądu odpowiadają gęstości prądu w cewce sprzęgła  $j = 4$  A/m<sup>2</sup>. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Moment sprzęgający  $T_S$  sprzęgła w funkcji prądu  $I$  dla dwóch typów cieczy MR i dwóch rodzajów tarcz sprzęgła

## 8. Wnioski

Z wyników obliczeń momentu sprzęgającego w funkcji prądu cewki  $T_S(I)$  wynika, że zastosowanie w sprzęgle magnetoreologicznym cieczy MRF-140CG o lepszych właściwościach magnetycznych i większych uzyskiwanych wartościach granicznych naprężeń stycznych  $\tau_0$  powoduje, zgodnie z oczekiwaniami, wytworzenie momentu sprzęgającego  $T_S$  o większych wartościach. Inną cechą sprzęgła z omawianą cieczą magnetoreologiczną jest nieliniowość charakterystyki  $T_S(I)$ .

Po zastosowaniu w sprzęgle cieczy MRF-122EG uzyskano mniejsze wartości generowanego momentu sprzęgającego niż w przypadku cieczy MRF-140CG. Natomiast charakterystyka  $T_S(I)$  jest niemalże liniowa.

Zmiana kształtu tarcz sprzęgła (z tarcz płaskich na pofalowane) powoduje wzrost wartości momentu sprzęgającego  $T_S$ .

Warto zauważyć, że zmiana momentu  $T_S$  spowodowana zmianą kształtu tarcz zależy od rodzaju cieczy magnetoreologicznej znajdującej się w sprzęgle. Dla cieczy MRF-122EG zmiana momentu sprzęgającego  $T_S$  dochodzi do ok. 8%, natomiast dla cieczy MRF-140CG wynosi ok. 1%.

## Literatura

- [1] Ławniczak A., Milecki A.: *Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice*. Politechnika Poznańska, Poznań 1999
- [2] Materiały informacyjne firmy *LORD Corporation*: [www.lord.com](http://www.lord.com)

[3] 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

[4] Shen Yuliang; Yang Shaopu; Pan Cunzhi: *Experimental research of magnetorheological fluid clutch*, IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 2005, s. 104-107

[5] 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

[6] Kowol P.: *Dobór cieczy magnetoreologicznej przeznaczonej do pracy w sprzęgle magnetoreologicznym na podstawie obliczeń z wykorzystaniem modelu polowego*. XIII Sympozjum PPEE, Wisła 2009, s. 238-241

[7] Kowol P., Pilch Z.: *Wielotarczowe sprzęgło magnetoreologiczne*. Zgłoszenie patentowe nr P 387720, 2009

[8] Kowol P.: *Zastosowanie modelu polowego w procesie projektowania magnetoreologicznego hamulca obrotowo-liniowego*. Przegląd Elektrotechniczny, 12'2004, s. 22-24

## Autor

dr inż. Paweł Kowol, Katedra Mechatroniki, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice, tel. 32 237 2766, e-mail: [pawel.kowol@polsl.pl](mailto:pawel.kowol@polsl.pl)

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy nr N N510 355337*

## Recenzent

*Prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg*