

# Zmniejszenie pętli histerezy w hamulcu magnetoreologicznym poprzez odpowiedni dobór materiałów konstrukcyjnych magnetowodu

Piotr Gawłowicz, Paweł Bachman, Marcin Chciuk

Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Zielonogórski

**Streszczenie:** W artykule opisano niepożądane właściwości hamulców magnetoreologicznych związane ze zjawiskiem histerezy magnetycznej. Porównano charakterystyki hamulców wykonanych ze stali i blach transformatorowych oraz wykazano, że hamulce, których magnetowody wykonane są z blach mają mniejszą histerezę.

**Słowa kluczowe:** hamulce magnetoreologiczne, ciecz magnetoreologiczna, urządzenia dotykowe, histereza

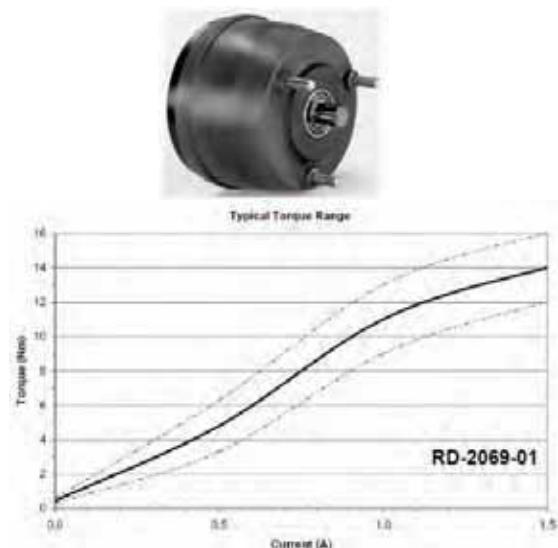
## 1. Wprowadzenie

Dostępne w sprzedaży lub opisywane w publikacjach naukowych hamulce magnetoreologiczne w większości wykonywane są ze stali miękkich. Choć stale miękkie mają słabe właściwości magnetyczne, wykonane z niej magnetowody hamulców magnetoreologicznych i tak posiadają pewną histerezę. Zagadnienia dotyczące podstaw magnetyzmu oraz możliwości zmniejszania zjawiska histerezy poprzez zastosowanie odpowiednich algorytmów sterowania opisane już były w artykule [1]. Wytwórcy komercyjnych hamulców niechętnie przyznają się do istnienia tego zjawiska.



**Rys. 1.** Widok i charakterystyka  $M=f(I)$  hamulca RD-2085-01  
**Fig. 1.** View and characteristic of brake RD-2085-01

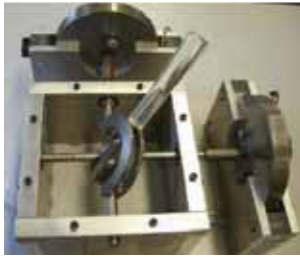
W broszurach reklamowych czołowego wytwórcy tych urządzeń, firmy Lord, nie ma wzmianki na ten temat. Przyczyną może być to, że jest to zjawisko niepożądane, a jego ujawnienie mogłoby źle wpłynąć na sprzedaż wyrobów. W przypadkach hamulców RD-2085-01 (rys. 1) oraz RD-2069-01 (rys. 2) na charakterystykach umieszczonych w folderach reklamowych umieszczono trzy krzywe, z których dolna i górna mogą odpowiadać pętli histerezy, a środkowa jest ich wypadkową. Analizując jednak wspomniane charakterystyki można wysnuć wniosek, że rzeczywista wartość momentu hamującego dla danego prądu może przyjąć dowolną wartość pomiędzy liniami przerywanymi i waha się w przedziale od 1 Nm dla hamulca RD-2085-01 do aż 4 Nm dla RD-2069-01. W obu przypadkach nie uwzględniono na wykresach krzywej pierwszego magnesowania.



**Rys. 2.** Widok i charakterystyka  $M=f(I)$  hamulca RD-2069-01  
**Fig. 2.** View and characteristic of brake RD-2069-01

Wśród licznych publikacji dotyczących budowy i badania hamulców magnetoreologicznych na wyróżnienie zasługuje jedna [2], w której autor dogłębnie zajął się badaniem zjawiska histerezy w hamulcu magnetoreologicznym. Podobnie, jak autorzy niniejszej publikacji napotkał on problem niepowtarzalności momentu hamującego dla tych samych prądów płynących przez cewkę hamulca.

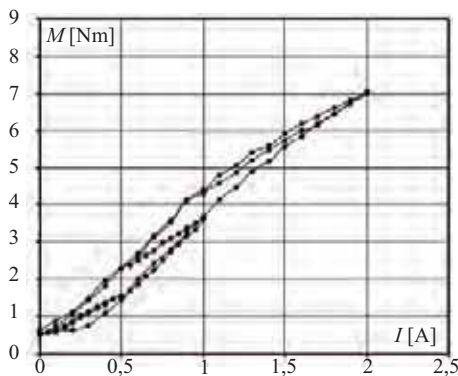
Zastosował on bowiem zaprojektowane przez siebie hamulce w dżojstiku dotykowym o dwóch stopniach swobody (rys. 3).



**Rys. 3.** Półaktywny dżojstik dotykowy o dwóch stopniach swobody [2]

**Fig. 3.** Semi-active 2 DOF haptic joystick

Podczas badań, w celu zaobserwowania, jak zmienia się pętla histerezy hamulca autor wykonał następujące zmiany wartości prądu:  $0 \rightarrow 0,5 \rightarrow 0$  A,  $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$  A,  $0 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 2$  A. Efektem była charakterystyka przedstawiona na rys. 4. Widać na niej, że na skutek występowania histerezy, moment dla tej samej wartości natężenia prądu może wahać się nawet w granicach 1 Nm (tak jest np. dla  $I = 1$  A).



**Rys. 4.** Charakterystyka  $M=f(I)$  dla hamulca magnetoreologicznego [2]

**Fig. 4.** Magnetorheological brake's characteristic  $M=f(I)$

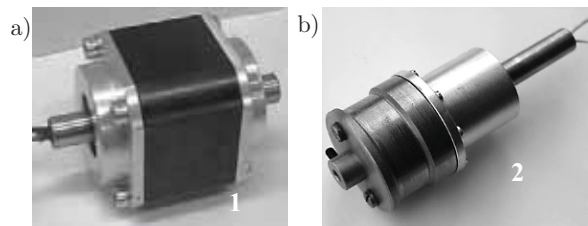
W celu zmniejszenia histerezy występującej w hamulcach magnetoreologicznych, w ramach niniejszego artykułu postanowiono przebadac, jak na to zjawisko wpłynie wykonanie magnetowodu z innego materiału niż stal miękka. Postanowiono do tego celu wykorzystać, wykonany z blach transformatorowych, gotowy zestaw stator-wirnik z silnika elektrycznego.

## 2. Metodyka badań i porównanie pętli histerezy hamulców z magnetowodami wykonanymi ze stali litej i z blachy transformatorowej

W badaniach, do porównania wykorzystano trzy hamulce magnetoreologiczne. Dwa zbudowane były ze stali miękkiej, o słabych parametrach magnetycznych. Pierwszy z nich posiadał obrotową oś, na której zamocowany był stalowy wirnik, na którym nawinięta była cewka. Obwód magnetyczny zamykał się poprzez obudowę hamulca wy-

konaną również ze stali. Dwie pokrywy zamykające hamulec wykonane były z aluminium. W pokrywach umieszczone były łożyska oraz uszczelnienia, zapobiegające wyciekowi cieczy magnetoreologicznej. Hamulec ten został oznaczony nr 1 i pokazany jest na rys. 5a.

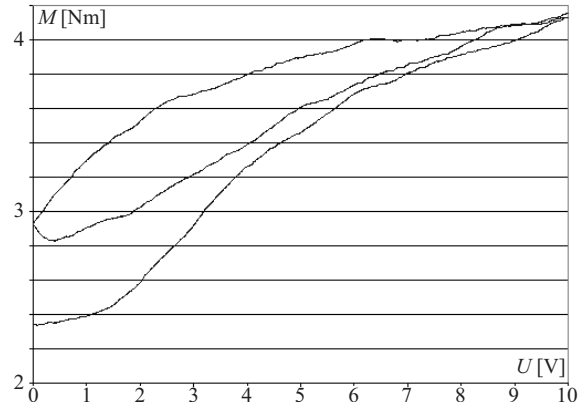
W drugim hamulcu, pokazanym na rys. 5b, zastosowano rozwiązanie z nieruchomym wirnikiem oraz obrotowym korpusem, który został wykonany z paramagnetycznego stopu aluminium. Cewka wytwarzająca pole magnetyczne znajduje się w statorze, a obwód magnetyczny podobnie jak w poprzednim przypadku zamyka się poprzez stalowy korpus. Zastosowanie takiej konstrukcji powoduje, że przewody zasilające nie są skręcane podczas pracy urządzenia. W badaniach hamulec ten został oznaczony nr 2.



**Rys. 5.** Hamulce obrotowe z magnetowodem wykonanym ze stali

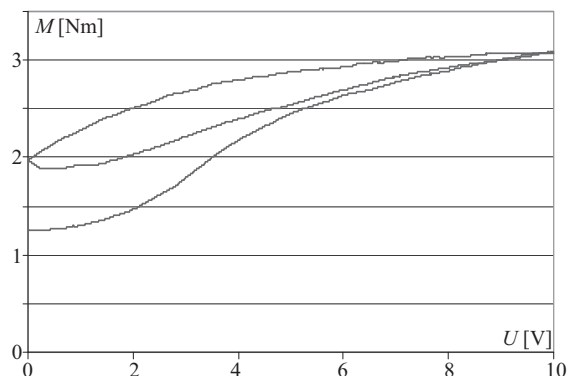
**Fig. 5.** Magnetorheological brakes with steely magnetic circuit

Charakterystyki z uwzględnieniem histerezy momentu hamującego  $M$  w funkcji napięcia cewki  $U$  obu hamulców pokazane są na rys. 6 i rys. 7.



**Rys. 6.** Charakterystyka  $M=f(U)$  hamulca nr 1

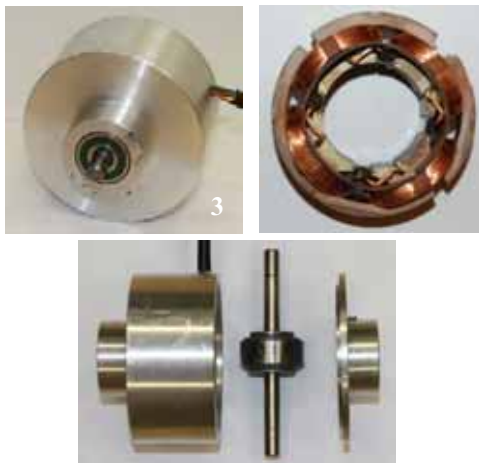
**Fig. 6.** Brake's No. 1 characteristic  $M=f(U)$



**Rys. 7.** Charakterystyka  $M=f(U)$  hamulca nr 2

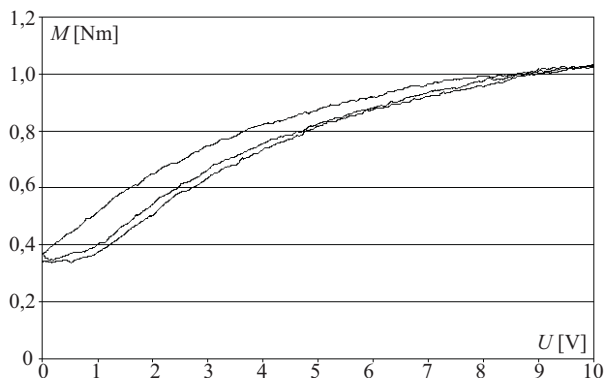
**Fig. 7.** Brake's No. 2 characteristic  $M=f(U)$

Trzeci z porównywanych hamulców zbudowany był z wykorzystaniem statora i wirnika z silnika elektrycznego. Obudowę hamulca wykonano z aluminium. W związku z tym, że ciecz magnetoreologiczna przewodzi prąd, po umieszczeniu statora w obudowie zalano go żywicą poliuretanową, uniemożliwiając zetknięcie się cieczy z cewkami hamulca. Widok i budowę wewnętrzną hamulca pokazano na rys. 8.



**Rys. 8.** Widok i budowa wewnętrzną hamulca wykonanego na bazie statora i wirnika silnika elektrycznego  
**Fig. 8.** View and internal structure brake made on the basis of electric motor's stator and rotor

W trakcie badań hamulec ten oznaczono nr 3, a jego charakterystyka pokazana jest na rys. 9.



**Rys. 9.** Charakterystyka  $M=f(U)$  hamulca nr 3  
**Fig. 9.** Brake's No. 3 characteristic  $M=f(U)$

W celu obliczenia, który z hamulców charakteryzuje się najmniejszą histerezą wprowadzono następujące oznaczenia (rys. 10):

- zakres pracy hamulca  $M_{pr}$ , który można opisać, jako różnicę momentu maksymalnego  $M_{max}$  i oporów własnych  $M_{op}$ , z pominięciem krzywej pierwszego namagnesowania rozpoczynającej się w punkcie  $M_{op}$

$$M_{pr} = M_{max} - M_{op} \quad (1)$$

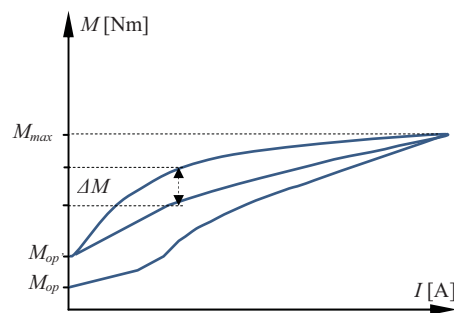
- wyznaczana z charakterystyki, maksymalna różnica momentów w pętli histerezy  $\Delta M$ , z pominięciem krzywej pierwszego namagnesowania.

W celu uniezależnienia obliczeń od parametrów hamulca ( $M_{max}$  i  $M_{op}$ ) różnica momentów w pętli histerezy  $M_h$  wyrażona jest, jako procentowy stosunek maksymalnej różnicy momentów  $\Delta M$  do zakresu pracy  $M_{pr}$

$$M_h = \frac{\Delta M}{M_{pr}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Zadano też procentową różnicę pomiędzy wartością momentu minimalnego dla hamulca namagnesowanego  $M_{op'}$  i hamulca nienamagnesowanego  $M_{op}$  oznaczoną, jako  $\Delta M_{op}$ , która obrazuje jak duża różnica momentu hamującego występuje pomiędzy pierwszym i kolejnymi uruchomieniami hamulca.

$$\Delta M_{op} = 100\% - \frac{M_{op'}}{M_{op}} \cdot 100\% \quad (3)$$



**Rys. 10.** Oznaczenia parametrów do obliczeń wielkości histerezy  
**Fig. 10.** Parameters to calculate the size of the hysteresis

Wyniki pomiarów i obliczeń zestawiono w tab. 1.

**Tab. 1.** Zestawienie parametrów badanych hamulców  
**Tab. 1.** Summary of investigated brake parameters

Oznaczenie	Hamulec 1	Hamulec 2	Hamulec 3
$M_{max}$ [Nm]	4,15	3,08	1,02
$M_{op'}$ [Nm]	2,93	2,0	0,36
$M_{op}$ [Nm]	2,35	1,25	0,33
$M_{pr}$ [Nm]	1,22	1,08	0,66
$\Delta M$ [Nm]	0,52	0,5	0,11
$M_h$	42,6%	27,77%	16,6%
$\Delta M_{op}$	48,1%	37,5%	8,4%

### 3. Podsumowanie

Porównując wartości momentu przypadającego na histerezę  $M_h$  i różnicy momentów oporu dla hamulca namagnesowanego i nienamagnesowanego  $\Delta M_{op}$  można zauważyć, że w obydwóch przypadkach są one najmniejsze dla hamulca nr 3. Mimo że hamulce 1 i 2 zbudowane były ze stali miękkiej, która charakteryzuje się słabymi właściwościami magnetycznymi, hamulec nr 3, zbudowany na bazie

statora i wirnika z blach transformatorowych wykazał się najmniejszą histerezą. Można zatem wyciągnąć wniosek, że zaletą takich konstrukcji jest mała histereza i minimalna różnica między momentem odpowiadającym magnesowaniu pierwotnemu i hamulca namagnesowanego. Konstrukcja taka ma jednak też swoje wady. Prezentowany w niniejszym artykule, wykonany na bazie statora hamulec, charakteryzował się większymi rozmiarami i mniejszym maksymalnym momentem hamującym, niż hamulce wykonane ze stali. Wykorzystując gotowe, dostępne w handlu statory silników nie ma też możliwości dokładnego zaprojektowania parametrów obwodu magnetycznego. Rząd wielkości momentu hamującego i gabaryty hamulców można jedynie dostosować do wielkości statorów dostępnych w handlu.

## Bibliografia

1. Milecki A., Bachman P., Chciuk M., *Badanie wpływu procesu rozmagnesowywania na pętlę histerezy obrotowego hamulca magnetoreologicznego*, „Pomiary, Automatyka, Robotyka” nr 2/2012, 499–503.
2. Liu B., *Development of 2-DOF haptic device working with magnetorheological fluids*, MEng thesis, Faculty of Engineering, University of Wollongong, 2006, [<http://ro.uow.edu.au/theses/136/>](8.11.2012).■

### **Reduction of hysteresis loop in the magnetorheological brakes by an appropriate choice of magnetic circuit materials of construction**

**Abstract:** In this article magnetorheological brakes undesirable properties associated with the phenomenon of magnetic hysteresis are described. Characteristics made from steel and transformer plates brakes are compared. On the end is shown that the brakes, which magnetic circuit from transformer plates is made less hysteresis have.

**Keywords:** magnetorheological brakes, magnetorheological fluid, haptic device, hysteresis

---

### **dr inż. Piotr Gawłowicz**

Starszy wykładowca w Instytucie Edukacji Techniczno-Informatycznej, Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Zielonogórski. Zainteresowania: robotyka, mechatronika, sztuczna inteligencja.



e-mail: [P.Gawlowicz@eti.uz.zgora.pl](mailto:P.Gawlowicz@eti.uz.zgora.pl)

### **mgr inż. Paweł Bachman**

Asystent w Instytucie Edukacji Techniczno-Informatycznej, Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Zielonogórski. Zainteresowania: mechatronika, sterowanie. Jest stypendystą w ramach Poddziałania 8.2.2 „Regionalne Strategie Innowacji”, Działania 8.2 „Transfer wiedzy”, Priorytetu VIII „Regionalne Kadry Gospodarki” Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Unii Europejskiej i z budżetu państwa.



e-mail: [P.Bachman@eti.uz.zgora.pl](mailto:P.Bachman@eti.uz.zgora.pl)

### **mgr Marcin Chciuk**

Asystent w Instytucie Edukacji Techniczno-Informatycznej, Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Zielonogórski. Zainteresowania: mechatronika, sterowanie.

e-mail: [M.Chciuk@eti.uz.zgora.pl](mailto:M.Chciuk@eti.uz.zgora.pl)

