

Janusz IGIELSKI

INSTYTUT MIKROMECHANIKI I FOTONIKI POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
ul. Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa

Wpływ sposobu obciążenia na dokładność wyznaczania właściwości zespołów napędowych małej mocy

Dr inż. Janusz IGIELSKI

Zatrudniony w Zakładzie Konstrukcji Urządzeń Precyzyjnych na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej na stanowisku docenta. Zainteresowania naukowe: konstrukcja urządzeń mechatronicznych, w tym układów napędowych małej mocy, urządzenia automatyzacji produkcji oraz automatyczne systemy sprzedaży.



e-mail: j.igielski@mchtr.pw.edu.pl

Streszczenie

W artykule podjęto zagadnienie odwzorowania przebiegu obciążenia wnoszonego przez mechanizmy urządzeń mechatronicznych małej mocy. Wskazano na wpływ zachowań hamulców elektromaszynowych i elektromagnetycznych ciernych, stosowanych do tych zadań, na dokładność odwzorowania oczekiwanego przebiegu zmian wartości momentu obrotowego w trakcie badań doświadczalnych. Przedstawiono charakterystyczne ich zachowania. Sformułowano zakres czynności, które powinien podjąć eksperymentator dokonując wyboru zespołu obciążającego do stanowiska badawczego układów napędowych małej mocy pracujących w stanach nieustalonych.

Słowa kluczowe: układy napędowe małej mocy, zadawanie obciążenia, elektromaszynowe i elektromagnetyczne cierne zespoły hamujące.

Influence of the way of applying load on the accuracy of determining low-power drive unit properties

Abstract

The paper considers a problem of representing the course of load introduced by mechanisms of low-power mechatronic devices. There is shown the influence of the behaviour of electro-machine and electromagnetic friction brakes used for these purposes on the accuracy of representing the course of torque fluctuations expected during experimental studies. Specific features and behaviour of these brakes are presented. In the case of electromagnetic friction brakes, the course of fluctuations of the developed friction torque is influenced, besides variations of the value of the excitation current, by processes taking place within the magnetic circuit, especially within the powder film (wear products) located in its gap. Representation of load value quick variations enables usage of plate brakes. Correct selection of the friction unit material limits the wear of friction surfaces in this kind of brakes. In the case of applying electromagnetic units as a load, an influence of the rotational speed on the value of the developed torque has to be taken into consideration: for DC motors it is a linear dependency, and for eddy current and hysteresis brakes – a nonlinear dependency. Use of DC motors is connected with the developed torque minimal value, below which they cannot be used in experimental stations. On the other hand, in the case of using eddy current and hysteresis brakes, a significant value of the moment of inertia is introduced, putting an additional load on the tested drive unit. Furthermore, there is defined the scope of activities that should be undertaken while choosing a loading unit to be used in an experimental station for low-power drive systems operating in transient states.

Keywords: low-power drive systems, applying a load, electro-machine and electromagnetic friction braking units.

1. Wstęp

Wykorzystywane w urządzeniach mechatronicznych układy napędowe małej mocy charakteryzują się (w rozumieniu normy PN-E-01006:1987 [1]) działaniem zarówno quasistatycznym - przy niewielkich odchyleniach w stosunku do położenia odpowia-

dającego pracy statycznej - jak i kinematycznym - przy ustalonej prędkości. Najczęstszą jest jednakże praca w stanach nieustalonych. Dlatego podczas projektowania złożonych układów, nie posiadających jednoznacznych opisów matematycznych, pracujących w stanach nieustalonych, konieczne jest prowadzenie badań doświadczalnych. W ich trakcie wymagane jest odwzorowanie obciążenia wnoszonego przez napędzany mechanizm w rzeczywistym urządzeniu.

Doświadczenia zarówno autora [2] jak dostępne w literaturze informacje [3] wskazują na możliwość wystąpienia trudności w odwzorowaniu oczekiwanych dla takich mechanizmów przebiegów zmian wartości momentu obrotowego. Szczególnie istotna jest znajomość zachowań hamulców w stanach przejściowych (np. w trakcie skokowej zmiany wartości sygnału sterującego zespołem hamulca) jak i przy różnych i zmiennych wartościach prędkości obrotowej.

W dokumentach normalizacyjnych odnoszących się do sposobów obciążania (niestety tylko) silników elektrycznych znaleźć można stosunkowo niewiele informacji. Podstawowa norma - PN-EN 60034-1:2005 [4] - wskazuje jedynie sposoby obciążania w trakcie badań silników indukcyjnych i synchronicznych. Wedle tej normy sposób obciążania innych typów silników „powinien być przedmiotem [odpowiednich] uzgodnień”. Najwięcej wnosi norma PN-E-06836:1996 [5] dotycząca silników skokowych. Zaleca ona przy wyznaczaniu momentu statycznego synchronizującego obciążanie wałka badanego silnika ciężarkiem na sznurku - nawiniętym na kółko pasowe mocowane na tym wałku. Według tej normy w przypadku sprawdzania charakterystyk mechanicznych silnik należy obciążać „hamownicą imitującą tarcie suche”.

Wykorzystanie ciężarka, mimo że zapewnia dużą dokładność pomiarów, nie umożliwia odwzorowania zmian obciążeń w rzeczywistych urządzeniach: sposób ten nie pozwala na przeprowadzenie analiz zachowań układów napędowych w stanach nieustalonych. Z podobnych powodów nie może znaleźć zastosowania metoda wykorzystująca tarcie owiniętego na kółku ciężka sprzęgniętego z dynamometrem tensometrycznym zaproponowana w [6].

Niektóre normy [7, 8] zalecają obciążanie badanego zespołu napędowego silnikiem elektrycznym. Analiza zachowań różnego typu silników wskazuje, że najkorzystniejszym byłoby zastosowanie w takim przypadku silnika prądu stałego. Uzasadnia to przede wszystkim duża liniowość jego charakterystyk mechanicznych.

Od wykorzystywanych w urządzeniach mechatronicznych układów napędowych małej mocy wymaga się zwykle:

- stosunkowo niewielkiej wartości rozwijanego momentu obrotowego (poniżej 1 Nm),
- małego masowego momentu bezwładności (nie przekraczającego wartości 10^{-5} kgm²),
- niewielkiej prędkości obrotowej (najczęściej nie przekraczającej wartości kilkuset min⁻¹ na wałku wyjściowym napędzanego mechanizmu).

Chcąc umożliwić racjonalny wybór układu hamowania w stanowiskach badawczych postanowiono przeanalizować zachowania takich układów: zarówno elektromechanicznych, jak i elektromaszynowych. Dokonując ich wyboru miano na uwadze rodzaj zespołów hamowania wykorzystywanych przez producentów specjalizujących się w budowie wyżej wymienionych stanowisk [9, 10, 11, 12]

Zestawienie wybranych cech mechanizmów mogących znaleźć zastosowanie w tej roli przedstawiono w tab. 1. Dokonując wyboru brano pod uwagę wymienione wcześniej wartości. Informacje te nie są jednak wystarczające do racjonalnego wyboru typu zespołu hamowania w badaniach konkretnych układów napędo-

wych. Dlatego w publikacji autor przeprowadził analizę ich zachowań w przypadku wykorzystania w roli sterowanego obciążenia.

Tab. 1. Zestawienie wybranych cech hamulców
Tab. 1. Characteristics of selected brakes

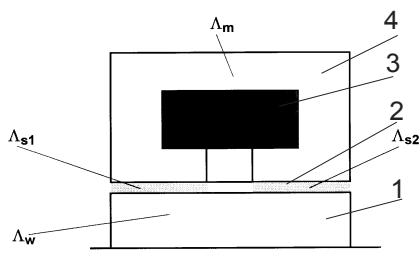
Rodzaj i typ hamownicy producent	Maksymalny moment hamujący Nm	Maksymalna prędkość obrotowa min ⁻¹	Zalecany zakres prędkości obrotowej min ⁻¹	Masowy moment bezwładności wirnika kgm ²	Moc nominalna W	Opory ruchu Nm
Silnik DC RE 65-353296 Maxon	0,65	3770	3550	1,38·10 ⁻⁴	250	0,021
Hamulec histerezowy HD-500 Magtrol	0,85	25 000	brak informacji	1,09·10 ⁻⁴	400	0,005
Hamulec wiroprądowy 4WB 2.7-8-K Magtrol	0,6	50 000	16 000	4,03·10 ⁻⁵	1000	0,012
Hamulec czarny proszkowy 1PB 2.7-8-K Magtrol	0,6	10 000	2 400	1,49·10 ⁻⁵	150	0,018
Hamulec czarny płytkowy 250 Warner Electric	1,0	3600	brak informacji	6,88·10 ⁻⁵	20	0,005

2. Hamulce elektromagnetyczne cierne

Do obciążania w stanowiskach badawczych stosowane są przede wszystkim hamulce proszkowe [3, 12]. W hamulcu takim wykorzystuje się zjawisko oporu cząstek proszku (znajdującego się w przestrzeni pomiędzy elektromagnesem stojana a wirnikiem) podczas przemieszczania ich w kierunku prostopadłym do linii sił strumienia magnetycznego przechodzącego przez warstwę proszku (rys. 1). Wartość momentu, jaki należy przyłożyć, aby ten opór pokonać jest funkcją indukcji magnetycznej wzbudzonej w proszku. Zależność na wartość tego momentu można przedstawić w uproszczonej postaci [2]

$$M_p = k \cdot \left(\frac{1}{\frac{1}{\Lambda_w} + \dots + \frac{1}{\Lambda_{s2}}} \right)^v \cdot I_h^v \quad (1)$$

gdzie: k - współczynnik proporcjonalności będący funkcją cech konstrukcyjnych hamulca, Λ_i - permeancje składowe obwodu magnetycznego, I_h - prąd wzbudzenia, v - wykładnik potęgi będący funkcją rozkładu pola magnetycznego oraz cech konstrukcyjnych hamulca. Wartości k i v należy dla każdego hamulca wyznaczyć doświadczalnie.



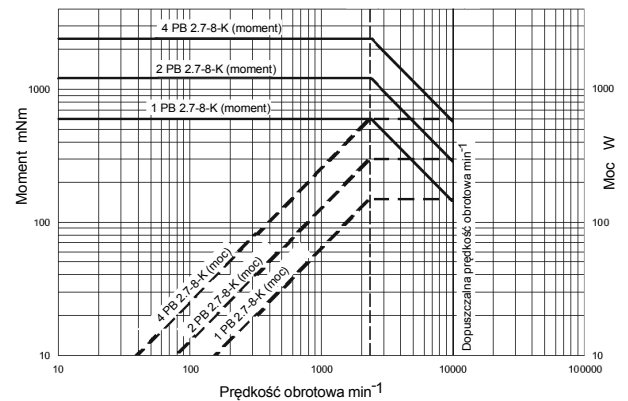
Rys. 1. Składowe permeancje obwodu magnetycznego hamulca proszkowego, 1 – wirnik, 2 - proszek ferromagnetyczny, 3 - uzwojenie wzbudzające, 4 – obwód magnetyczny stojana, Λ_m – permeancja obwodu magnetycznego stojana, Λ_w – permeancja wirnika, Λ_{s1} , Λ_{s2} – permeancje szczelin
Fig. 1. Components of the powder brake electromagnetic circuit permeance, 1 – rotor, 2- ferromagnetic powder, 3 – excitation winding, 4 – stator magnetic circuit, Λ_m – stator permeance, Λ_w – rotor permeance, Λ_{s1} , Λ_{s2} – magnetic gaps permeance

Przedstawiona postać zależności (1) nie uwzględnia występującej w hamulcu niejednorodności pola magnetycznego, rozpraszania strumienia magnetycznego oraz nieliniowej zależności reluktancji od natężenia pola magnetycznego. Dlatego dokonując wyboru hamulca należy mieć na uwadze, że na przebieg zmian wartości rozwijanego przez niego momentu tarcia poza zmianami wartości prądu wzbudzenia wpływ będą miały procesy zachodzące w obwodzie magnetycznym, przede wszystkim w warstwie proszku znajdującego się w jego szczelinie.

Dostępne w publikacjach informacje nie pozwalają na sformułowanie jednoznacznego opisu matematycznego przebiegu zjawisk w tej warstwie w obecności pola magnetycznego o zmiennej wartości - występującego w hamulcu w przypadku jego wykorzystania do zadawania obciążenia w trakcie badań układów napędowych małej mocy. Odnoszą się one przede wszystkim do procesów zachodzących w obecności stałego pola magnetycznego wskazując, że o wartości naprężeń stycznych w hamulcu decydować będzie:

- wartość indukcji magnetycznej w szczelinie z proszkiem,
- zagęszczenie cząstek proszku w mikroobszarach współpracy,
- rodzaj proszku i jego właściwości (przede wszystkim ferromagnetyczne), oraz ich własności pod wpływem czynników zewnętrznych, w tym naprężeń mechanicznych, temperatury, oraz upływającego czasu.

Czynniki te wpływać muszą na wartość permeancji w szczelinach z proszkiem (np. Λ_{s1} i Λ_{s2} na rys. 1), a to może być przyczyną chwilowych zmian wartości rozwijanego przez hamulec momentu tarcia. Prezentowane przez producentów charakterystyki takich hamulców nie wskazują na to (rys. 2). Jedynym potwierdzeniem występowania wyżej wymienionych zjawisk jest wskazanie na występowanie histerezy w takich hamulcach [12].



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki rodziny hamulców proszkowych [12]
Fig. 2. Characteristics of the electromagnetic powder brake family [12]

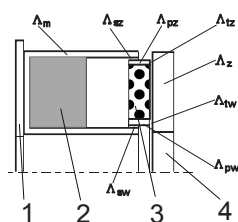
Niektórzy badacze podejmują próbę sformułowania hipotez zachowania proszku ferromagnetycznego w obecności pola magnetycznego, wskazując na istotny wpływ zmian pola magnetycznego na wartość i rozkład naprężeń mechanicznych w jego warstwie. Mimo, że uwzględniają także wpływ odkształceń plastycznych cząstek proszku, to przyjęte uproszczenia powodują, że niecelowa jest adaptacja proponowanych modeli do warunków panujących w hamulcach wykorzystywanych do zadawania obciążenia. Dlatego opis zachowań hamulców proszkowych wybranych do odwzorowania obciążenia w badaniach układów napędowych małej mocy należy przeprowadzać posiłkując się wynikami eksperymentów doświadczalnych konkretnych ich egzemplarzy [2].

Przeprowadzone przez autora prace [13] wskazują, że w przypadku potrzeby odwzorowania szybkich zmian wartości obciążenia można wykorzystywać hamulce płytkowe (rys. 3). Prawidłowy dobór materiałów zespołu ciernego i odpowiednia ich eksploatacja [14] umożliwiają ograniczenie zużycia powierzchni ciernych takich hamulców, zapewniając zmniejszenie często podnoszonej ich wady: małej trwałości.

Moment rozwijany przez taki hamulec opisać można uproszczonym równaniem [2]

$$M_{\rho} = \mu \cdot k \cdot \left(\frac{1}{\frac{1}{\Lambda_m} + \dots + \frac{1}{\Lambda_{sw}}} \right)^2 \cdot I_h^2 \quad (2)$$

gdzie: μ - współczynnik tarcia, k - współczynnik będący funkcją cech konstrukcyjnych hamulca, I_h - prąd płynący przez uzwojenie wzbudzące hamulca, Λ_i - permeancje elementów obwodu magnetycznego hamulca.



Rys. 3. Składowe permeancje obwodu magnetycznego hamulca płytkowego, 1 – stojan, 2 – uzwojenie wzbudzące, 3 – pierścień cierny, 4 – zwora, Λ_m – permeancja obwodu magnetycznego stojana, Λ_z – permeancja szczeliny pomiędzy obwodem magnetycznym stojana a pierścieniem zewnętrznym, Λ_{sw} – permeancja szczeliny pomiędzy obwodem magnetycznym a pierścieniem wewnętrznym, Λ_{pz} – permeancja pierścienia zewnętrznego, Λ_{pw} – permeancja pierścienia wewnętrznego, Λ_z – permeancja zwory, Λ_{tz} – permeancja szczeliny pomiędzy pierścieniem zewnętrznym a zworą, Λ_{ww} – permeancja szczeliny pomiędzy pierścieniem wewnętrznym a zworą

Fig. 3. Component of a disc brake magnetic circuit permeance, 1 – stator, 2 – excitation winding, 3 – friction ring, 4 – cramp, Λ_m – permeance of the stator magnetic circuit, Λ_z – permeance of the gap between the stator magnetic circuit and outer ring, Λ_{sw} – permeance of the gap between the stator magnetic circuit and the inner ring, Λ_{pz} – permeance of the outer ring, Λ_{pw} – permeance of the inner ring, Λ_z – permeance of cramp, Λ_{tz} – permeance the gap of outer ring – cramp, Λ_{tz} – permeance in gap of internal ring – cramp,

Jego postać dowodzi, że (podobnie jak w przypadku hamulca proszkowego) o przebiegu zmian rozwijanego przez hamulec momentu tarcia decydować będą, poza zmianami wartości prądu wzbudającego, także procesy zachodzące w obszarze współpracy ciernej ferromagnetycznych elementów obwodu magnetycznego – mające wpływ na wartości reluktancji i współczynnika tarcia. Bez identyfikacji zjawisk wywołujących te procesy (zachodzących w obecności niejednorodnego, o zmiennej wartości, pola magnetycznego) nie jest możliwe dokładne opisanie zachowań hamulców płytkowych w stanach nieustalonych.

Chcąc zapewnić dużą szybkość narastania strumienia magnetycznego i małą wartość remanencji w produkowanych seryjnie hamulcach wykonuje się zarówno magnetowód jak i zworę z czystego technicznie żelaza „armco”. Materiał ten źle współpracuje cernie w parze ze sobą, w wyniku czego po pewnym okresie eksploatacji pojawiają się bruzdy na powierzchni współpracy, zmianie ulega wartość współczynnika tarcia oraz permeancja obwodu magnetycznego. W skrajnych przypadkach zjawisko to może prowadzić do chwilowych niestabilności współpracy ciernej, czego konsekwencją będą drgania i szybkie zużywanie się współpracujących cernie elementów magnetowodu [2, 15].

Dlatego zastosowanie hamulców płytkowych do zadawania obciążenia w badaniach układów napędowych małej mocy poprzedzone powinno być wyborem odpowiedniego skojarzenia materiałowego ferromagnetycznego zespołu cierneho: charakteryzującego się podobnymi do żelaza parametrami magnetycznymi i korzystniejszymi właściwościami trybologicznymi.

Decydujący wpływ na chwilową wartość momentu tarcia rozwijanego przez oba wyżej wymienione typy hamulców będą miały procesy mechaniczne i magnetyczne w obszarze szczeliny pomiędzy elementami stacjonarnymi i wirującymi hamulców (z prosz-

kiem w przypadku hamulca proszkowego lub śladowymi ilościami ferromagnetycznych produktów zużycia cierneho w przypadku hamulca płytkowego) będące rezultatem zmian wartości prądu wzbudzenia i prędkości obrotowej. Ich przebieg będzie uzależniony zarówno od zakładanego dla konkretnych badań zakresu jak i przebiegu zmian wartości tych wielkości. Przeprowadzone przez autora eksperymenty [2] umożliwiły wskazanie zagadnień, na które należy zwrócić uwagę wybierając hamulec do odwzorowania obciążenia w stanach nieustalonych. Istotniejsze z nich przedstawiono w tab. 2.

Tab. 2. Wybór elektromagnetycznego hamulca cierneho do odwzorowania obciążenia

Tab. 2. Selection of electromagnetic friction brake for load representation

Czynność	Hamulec proszkowy	Hamulec płytkowy
Zastosowanie hamulca w roli obciążenia wymaga	<ul style="list-style-type: none"> wskazania wartości prądu wzbudzenia powyżej której następuje nasywanie obwodu magnetycznego - w celu określenia dopuszczalnego zakresu jego zmian w procesie odwzorowywania obciążenia przeprowadzenia opisu wybranych zachowań hamulców w przypadku konieczności odwzorowania złożonych funkcji przebiegów w stanach nieustalonych z dużą dokładnością sprawdzenia czy procesy cieplne zachodzące w hamulcu w przewidywanych zakresach odwzorowania obciążenia nie wpływają na oczekiwaną jego dokładność okresowej wymiany próbek ferromagnetycznych wskazania sposobu przeprowadzenia procesu filtracji sygnału rozwijanego momentu tarcia 	<ul style="list-style-type: none"> wskazania wartości prądu wzbudzenia powyżej której następuje nasywanie obwodu magnetycznego - w celu określenia dopuszczalnego zakresu jego zmian w procesie odwzorowywania obciążenia bezwzględnego przeprowadzenia procesu docierania elementów ferromagnetycznej pary ciernej przed zastosowaniem hamulca do odwzorowania obciążenia przeprowadzenia opisu wybranych zachowań hamulców w przypadku konieczności odwzorowania złożonych funkcji przebiegów w stanach nieustalonych z dużą dokładnością wskazania sposobu przeprowadzenia procesu filtracji sygnału rozwijanego momentu tarcia
Kształtowanie zachowań hamulców	<ul style="list-style-type: none"> bez wprowadzenia istotnych zmian konstrukcyjnych oraz zmiany składu proszku ferromagnetycznego praktycznie niemożliwe; nie należy się przy tym spodziewać możliwości swobodnego ich kształtowania, gdyż to wymaga pełnego zidentyfikowania procesów zachodzących w obszarze współpracy ciernej, indywidualnie dla każdego rodzaju hamulca 	<ul style="list-style-type: none"> dobór materiałów ferromagnetycznej pary ciernej umożliwia zmianę charakteru procesów zachodzących w obszarze ich współpracy przez co pozwala wpływać na wartość rozwijanego momentu tarcia (zmiana współczynnika tarcia) oraz charakter jego oscylacji w przypadku gdyby rezultaty wymienionych poczynań okazały się niewystarczające należałoby przeprowadzić pełną identyfikację procesów zachodzących w obszarze współpracy ciernej, indywidualnie dla każdego rodzaju hamulca

3. Hamulce elektromaszynowe

Wykorzystanie w roli obciążenia silnika prądu stałego umożliwia zadawanie:

- oporów ruchu (obciążenia biernego) podczas pracy prądnicowej na rezystor,
- momentu czynnego (obciążenia czynnego) podczas pracy maszynowej (przy podłączeniu silnika do źródła zasilania).

W pierwszym przypadku (przy braku zasilania i zwarcia uzwojenia twornika rezystorem) moment hamujący w stanie ustalonym opisywać będzie zależność [16]

$$M_h = K_M \frac{K_E}{R_t + R_d} \omega + M_F \quad (3)$$

w której: K_E - stała napięcia, K_M - stała momentu, M_F - moment tarcia statycznego w silniku, M_h - moment hamujący, R_d - rezystancja zwierająca obwód twornika, R_t - rezystancja obwodu twornika, ω - prędkość kątowna wirnika.

Zmieniając wartość rezystancji R_d można wpływać na wartość momentu hamującego rozwijanego przez silnik prądu stałego. W przypadku pracy maszynowej do uzwojeń silnika doprowadzane powinno być napięcie zasilające U_z . Moment hamujący rozwijany przez silnik opisywać będzie w takim przypadku zależność

$$M_h = M_F - K_M \frac{U_z - K_E \omega}{R_t} \quad (4)$$

Postać powyższych zależności dowodzi, że w przypadku zastosowania silnika prądu stałego w roli obciążenia podczas:

- pracy maszynowej należy się liczyć z pewną minimalną wartością rozwijanego momentu - poniżej której nie można go wykorzystywać w stanowiskach badawczych (o wartości tej decyduwać będą parametry konstrukcyjne silnika), bądź należy przeprowadzać w tym zakresie kompensację zasilając maszynę napięciem większym od siły elektromotorycznej ($U_z > K_E \omega$),
- pracy prądnicowej na rezystor należy zmieniać wartości rezystancji zwierającej wyprowadzenia silnika, a to powoduje, że ten sposób praktyczne zastosowanie znaleźć może jedynie w przypadku potrzeby obciążania momentem o stałej wartości; w tym przypadku minimalną wartość momentu określają opory ruchu ułożyskowania silnika.

Przeprowadzone przez autora eksperymenty symulacyjne zachowań silnika prądu stałego w przypadku jego obciążenia silnikiem prądu stałego (dla skokowych zmian wartości momentu obciążenia) [16] wykazały, że

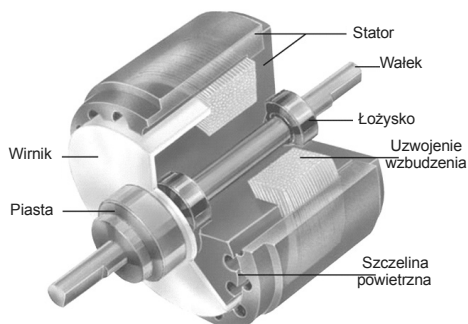
- ze względu na wartość mogących wystąpić błędów oba sposoby zadawania obciążania można uznać za porównywalne,
- zdecydowanie mniejszych błędów odwzorowania przebiegu momentu w stanach nieustalonych należy się spodziewać w przypadku wykorzystania silnika prądu stałego w charakterze obciążenia biernego

Powyzsze oraz zależność wartości rozwijanego momentu obrotowego od wartości prędkości obrotowej wskazują, że wykorzystanie silnika prądu stałego do zadawania obciążenia należy ograniczyć do eksperymentów w warunkach quasistatycznych.

W hamulcach histerezowych (rys. 4) wykorzystuje się wzbudzenie momentu elektromagnetycznego wywołwane występowaniem strat histerezy w obwodzie magnetycznym. Moment histerezowy powstaje w wyniku opóźnienia obrotu domen magnetycznych materiału względem osi wirującego wywołanego prądami wzbudzenia. Jego wartość można opisać zależnością [17]

$$M_h = 0,5 p V_h B_h \max \sin \gamma \quad (5)$$

gdzie: p – liczba faz maszyny, V_h – objętość materiału magnetycznego, B_h – indukcja w obwodzie magnetycznym, H_h – natężenie pola magnetycznego, γ – wartość kąta fazowego o jaki harmoniczna strumienia opóźnia się względem wywołującego go prądu (będący funkcją kształtu i szerokości pętli histerezy materiału magnetycznego).



Rys. 4. Konstrukcja hamulca histerezowego firmy Magtrol [10]
Fig. 4. Construction of the Magtrol hysteresis brake [10]

Należy przy tym mieć na uwadze, że w maszynie takiej w zakresie pracy asynchronicznej (a taki przypadek występuje w przypadku jej wykorzystania w roli hamulca) działać będzie dodatkowo moment indukcyjny wywołany wzajemnym oddziaływaniem na siebie strumienia stojana i prądów wirowych indukowanych w wirniku przez ten strumień. Same prądy wirowe osiągają jednak małe wartości, gdyż zwykle tak konstruuje się hamulce, aby rezystywność materiału histerezowego była możliwie duża.

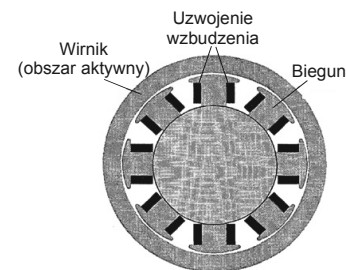
Wytwarzany w maszynie moment, będący wynikiem oddziaływań indukcyjnych, opisywać będzie zależność [18]

$$M_i = \frac{P_i}{\omega_s} \quad (6)$$

gdzie: P_i – wytworzona moc w wyniku oddziaływania zjawisk indukcyjnych, ω_s – prędkość obrotowa wirnika maszyny.

Mimo, że w maszynach histerezowych dąży się aby oddziaływania obu tych zjawisk były niewielkie, to powodują one, że wynikowa wartość rozwijanego momentu będzie funkcją nieliniową prędkości obrotowej.

W hamulcach na prądy wirowe wykorzystuje się moment obrotowy powstający w wyniku oddziaływania wirującego pola magnetycznego na indukowane prądy. Jednakże w odróżnieniu od maszyn asynchronicznych nie posiadają one uzwojenia roboczego klatkowego lecz tarczę lub masywną stalową tuleję (lub walec), w których strumień magnetyczny powoduje przepływ prądów wirowych. Z uwagi na większą skuteczność najczęściej wykorzystywane są hamulce o konstrukcji przedstawionej na rys. 5.



Rys. 5. Schemat hamulca wiroprowadowego, w którym prądy wirowe wzbudzane są w tulei [19]

Fig. 5. Eddy current brake with in-tube eddy current induction

Jeśli przyjmijemy za [19], że moc mechaniczna rozpraszana w takim hamulcu

$$W_{mech} = \frac{2\pi m M_h}{\pi D L} \quad (7)$$

będzie tożsama z mocą traconą w wyniku wzbudzenia prądów wirowych

$$W_{wir} = \frac{\rho \alpha}{2} H^2 \quad (8)$$

dla których to zależności

$$\alpha^2 = \frac{\mu \mu_0 \omega^2}{2\rho} \quad (9)$$

$$\omega = 2\pi n \quad (10)$$

gdzie: ρ – głębokość wnikania fali elektromagnetycznej, H – natężenie pola magnetycznego w A/m, D – średnica hamulca, L – szerokość oddziaływania pola elektromagnetycznego, ω – prędkość kątowa w rd/s, n – prędkość obrotowa 1/s, μ – przenikalność magnetyczna materiału, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni.

to po prostych przekształceniach uzyskamy zależność w postaci

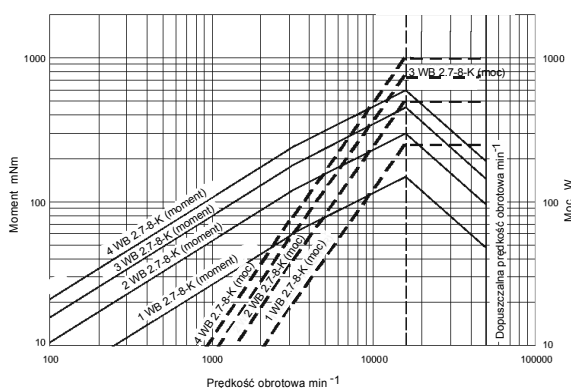
$$M_h = \frac{DL}{4} H^2 \sqrt{\frac{\pi \mu \mu_0 \rho}{n}} \quad (11)$$

A to wskazuje, że także w tym przypadku wartość rozwijanego momentu hamującego będzie funkcją prędkości obrotowej. Potwierdzają to charakterystyki hamownic oferowanych przez niektóre firmy (por. rys. 6). Szczegółową analizę procesów zachodzących w tego typu hamulcach znaleźć można w publikacji [20].

4. Wnioski

Przedstawione rozważania skłaniają do stwierdzenia, że do odwzorowywania obciążenia w trakcie badań układów napędowych małej mocy najkorzystniej jest stosować elektromagnetyczne hamulce cierne. Umożliwiają one mogą zadawanie chwilowych zmian rozwijanego momentu w formie najbardziej zbliżonej do przebiegów występujących w mechanizmach urządzeń mechatronicznych. Jednakże udostępniane przez producentów opisy hamulców prozkowych zalecanych do tych zadań [12] nie przedstawiają ich zachowań w trakcie rozruchu i hamowania, których to znajomość jest istotna w przypadku potrzeby odwzorowywania obciążeń wnoszonych przez mechanizmy urządzeń mechatronicznych.

Z uwagi na ograniczony zakres informacji udostępnianych przez wytwórców wykorzystanie hamulca w roli sterowanego obciążenia należy poprzedzić identyfikacją jego zachowań w stanach niestabilnych, w warunkach oczekiwanych w trakcie konkretnych badań, konkretnych układów napędowych, na konkretnym stanowisku badawczym. Jej wyniki powinny stanowić podstawę poszukiwania sposobu sterowania – umożliwiającego odwzorowanie za pomocą wybranego hamulca obciążenia wnoszonego przez mechanizmy napędzane takimi układami.



Rys. 6. Charakterystyki rodziny hamownic wiroprądowych [11]

Fig. 6. Sample characteristics for eddy current brake [11]

Dokonując wyboru hamulców do badań należy kierować się:

- stabilnością charakterystyki rozwijanego momentu obrotowego,
 - możliwością uzyskania dużej szybkości zmian strumienia magnetycznego,
- oraz zapisami normy PN-M-42011:1992 [21], zgodnie z którymi „charakterystyka dynamiczna siłownika” (układu napędowego):
- „z silnikiem innym niż skokowy” powinna być analizowana
 - „w okresie opóźnienia rozruchu” (według normy czas nie powinien być dłuższy niż 0,3 do 1 s – w zależności od charakteru obciążenia),

- „w zakresie drogi wybiegu” (według normy nie powinna być większa niż 0,5°),
- z silnikiem skokowym powinna być określona co najmniej dla maksymalnej częstotliwości rozruchu oraz częstotliwości granicznej siłownika obciążonego siłą lub momentem siły o krotności wartości obciążenia nominalnego: 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1.

5. Literatura

- [1] PN-E 01006:1987 Maszyny elektryczne - Elementy automatyki – Terminologia.
- [2] Igielski J.: Zachowania zespołów hamowania a zadawanie obciążenia w badaniach układów napędowych małej mocy, Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, z. 220, OWPW, Warszawa, 2007.
- [3] Mikrosilniki elektryczne. Badanie właściwości statycznych i dynamicznych. Praca zb. pod red. W. Jaszczuka. PWN, Warszawa 1991.
- [4] PN-EN 60034-1:2005 Maszyny elektryczne wirujące. Dane znamionowe i parametry.
- [5] [PN-E-06836:1996: Maszyny elektryczne wirujące. Maszyny do sterowania. Silniki skokowe.
- [6] Brenner W., Haddad G., Detter H., Popovic G., Vujanic A., Delic N.: The measurement of minimotors and micromotors torque-characteristic using miniaturised cable brake. Microsystems Technologies, 1997, s. 68-71.
- [7] PN-EN 60034-4:2008: Maszyny elektryczne wirujące - Metody wyznaczania wielkości charakterystycznych maszyn synchronicznych na podstawie badań.
- [8] PN-EN 60034-2:2008: Maszyny elektryczne wirujące - Metody wyznaczania strat i sprawności na podstawie badań.
- [9] <http://www.dynesystems.com/dc-dynamometers.htm>
- [10] http://www.magtrol.com/brakesandclutches/hysteresis_brakes.html
- [11] <http://www.dynesystems.com/eddycurrent.htm>
- [12] http://www.magtrol.com/brakesandclutches/convectionpowder_brake.html
- [13] Igielski J.: Wykorzystanie hamulców elektromagnetycznych ciernych do obciążania maszyn elektrycznych małej mocy. Przegląd Elektrotechniczny, 1991, nr 4, s. 83-85.
- [14] Igielski J.: Docieranie ferromagnetycznych elementów maszyn. Trybologia. 1985, nr 4, s. 25-29.
- [15] Igielski J.: Badanie zużycia elementów obwodu magnetycznego szybko działających sprzęgieł elektromagnetycznych. Praca doktorska. Politechnika Warszawska. Wydział Mechaniki Precyzyjnej. Warszawa, 1983.
- [16] Igielski J., Wierciak J.: Loading the mechatronic drive systems by means of DC motors. Archives of Electrical Engineering - vol. XLIX, nr 3-4, 2000, s. 361-376.
- [17] Owczarek J., Pochanke A.: Elektryczne maszynowe elementy automatyki. wyd.2, 1980, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej.
- [18] Owczarek J.: Elektryczne maszynowe elementy automatyki, WNT, Warszawa, 1983 r.
- [19] Dietrich A. B., Chabu I. E. Cardoso J. R.: Eddy-current brake analysis using analytic and FEM calculations - Part I: theory. Downloaded from IEEE Xplore.
- [20] Davies E.J.: An Experimental and Theoretical Study of Eddy-Current Couplings and Brakes. IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, 1963 s. 401- 419.
- [21] PN-M-42011:1992: Automatyka i pomiary przemysłowe. Siłowniki elektryczne. Ogólne wymagania i badania.

otrzymano / received: 26.04.2010

przyjęto do druku / accepted: 02.07.2010

artykuł recenzowany