

# Stanowisko badawcze z hamulcem elektrodynamicznym

## Research stand with electrodynamic brake

KRZYSZTOF NALEPA  
WOJCIECH MIĄSKOWSKI  
MARZENA WILAMOWSKA-KORSAK  
PIOTR PUCHOWSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.72>

W artykule przedstawiono budowę i charakterystyki wiroprądowego hamulca elektrodynamicznego, zastosowanego w układzie z asynchronicznym silnikiem klatkowym. Konstrukcja stanowiska umożliwia wyznaczanie charakterystyk silników elektrycznych pod regulowanym obciążeniem mechanicznym zapewnionym przez hamulec elektrodynamiczny. Prezentowany hamulec elektrodynamiczny pozwala na precyzyjną regulację momentu obrotowego obciążającego badany silnik. Umożliwia on uzyskanie obciążenia do 10 Nm przy prędkościach obrotowych z zakresu od 100 do 1500 obr/min.  
**SŁOWA KLUCZOWE:** prądy wirowe, hamulec elektrodynamiczny

*The article presents the design and characteristics of the eddy current electrodynamic brake used in the system working with an asynchronous motor. The construction of the stand allows the determination of the characteristics of electric motors in combination with the regulated mechanical load in the form of an electrodynamic brake. The presented electrodynamic brake allows precise adjustment of the torque loaded on the tested motor. It allows the load up to 10 Nm at speeds ranging from 100 to 1500 rpm.*

**KEYWORDS:** eddy current, electrodynamic brake

Hamulce wiroprądowe spełniają funkcję podobną do hamulców ciernych (które są najczęściej spotykane), jednak do wytworzenia siły hamującej wykorzystują zjawiska fizyczne zachodzące w przewodniku poruszającym się w polu elektromagnetycznym. Pole elektromagnetyczne indukuje napięcie w każdym elemencie metalowym, który porusza się prostopadle do linii tego pola. Zaindukowane napięcie jest źródłem prądów wirowych, wytwarzających pole elektromagnetyczne przeciwdziałające polu źródłowemu i tym samym wywołujących siłę, której jedna ze składowych jest przeciwnie skierowana do kierunku przemieszczania się hamowanego elementu [1, 2].

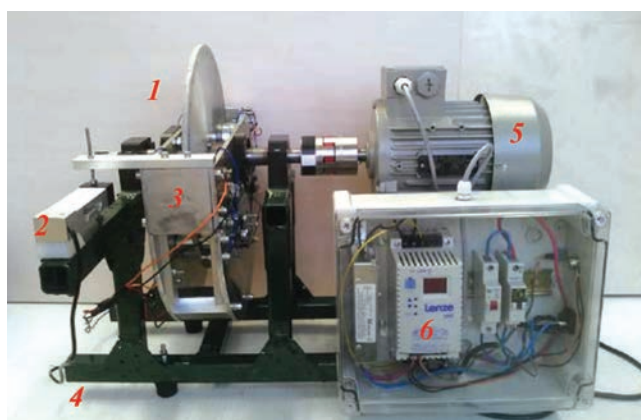
### Projekt i budowa hamulca

Na stanowisku zamontowano hamulec zaliczany do grupy hamulców typu kołowego. Hamulec obciąża badany silnik momentem powstającym w wyniku jego działania. Założeniem funkcjonalnym było opracowanie i zbudowanie stanowiska umożliwiającego badanie układów napędowych (silników wiatrowych) oraz generatorów energii elektrycznej małej mocy. Do zrealizowania pierwszego z założonych celów niezbędne było opracowanie hamulca elektrodynamicznego oraz zbadanie jego rzeczywistych parametrów i zakresu stosowalności.

Stanowisko pomiarowe składa się z następujących zespołów:

- hamulca wiroprądowego z układem zasilania regulowanego,
- zespołu napędowego, składającego się z silnika i jednostki zasilania,
- urządzeń pomiarowych,
- podstawy stanowiska.

Widok kompletnego stanowiska przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Widok kompletnego stanowiska do badania hamulca wiroprądowego: 1 – tarcza hamulcowa, 2 – belka tensometryczna, 3 – jarmzo z elektromagnesami, 4 – podstawa stanowiska, 5 – silnik, 6 – falownik

Zespół roboczy hamulca jest zbudowany z modułów stanowiących dwa zespoły:

- zespół napędowy, zawierający silnik asynchroniczny klatkowy zasilany z falownika;
- zespół hamulca, zawierający hamulec elektrodynamiczny oraz regulowany zasilacz prądu stałego.

Modułowa budowa stanowiska zapewnia mu uniwersalność. Stanowisko może być wykorzystywane do badania:

- układów napędowych – po zastąpieniu przedstawionego tu silnika napędowego badanym układem napędowym; hamulec służy do obciążania mechanicznego napędu poddawanego badaniom;
- wolnoobrotowych generatorów energii elektrycznej – hamulec elektrodynamiczny usuwa się, a w jego miejsce montuje tarczowy generator energii elektrycznej; układ napędowy z silnikiem klatkowym i falownikiem zapewnia moment napędowy z możliwością regulacji prędkości obrotowej.

W układzie zastosowano wyprodukowany przez firmę Siemens, połączony w gwiazdę trójfazowy silnik asynchroniczny typu 1LA7083-4AA10-Z o mocy znamionowej 0,75 kW przy prędkości obrotowej 1395 obr/min i znamionowym momencie obrotowym 5,1 Nm. Silnik napędowy współpracuje z falownikiem firmy Lenze smd, zapewniającym płynną regulację w całym zakresie prędkości obrotowej silnika.

Element hamowany, wykonany w formie aluminiowej jednolitej tarczy, jest wraz z wałem ułożyskowany w obudowie. Po bokach, w dolnej części elementu umieszczono

\* Dr inż. Krzysztof Nalepa (nalepka@uwm.edu.pl), dr inż. Wojciech Miąskowski (wojmek@uwm.edu.pl), dr inż. Marzena Wilamowska-Korsak (wilam@uwm.edu.pl), dr inż. Piotr Puchowski (piotr581@wp.pl) – Wydział Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego

12 elektromagnesów typu BEST ITS-MS-5030, zamocowanych do aluminiowych pokryw bocznych. Po każdej stronie tarczy znajduje się sześć elektromagnesów. Pokrywy boczne stanowią elementy ramy hamulca, z którą połączone jest ramię oddziałujące na belkę tensometryczną.

Na stanowisku badano dwa główne parametry: moment hamujący, obserwowany jako siła działająca na stałym ramieniu, oraz prędkość obrotową.

Pierwszy parametr mierzono za pomocą tensometrycznego przetwornika siły typu BTENS-N1-020.

Ramię przymocowane do obudowy hamulca bezpośrednio oddziaływało na belkę tensometryczną. Sygnał z belki był przesyłany do modułu pomiarowego ADT1-U firmy Wobit, połączonego z komputerem z zainstalowanym programem monitorującym MDT100T-PC.

Prędkość obrotową mierzono bezkontaktowym obrotomierzem ST723 firmy Sentry.

Podstawę wykonano jako konstrukcję spawaną z profili stalowych o wymiarach  $30 \times 30$  mm oraz grubości ścianki 3 mm. Zastosowano cztery elementy nośne, przypominające kształtem odwróconą literę „U”. Dwa niższe stanowią oparcie dla silnika, a dwa wyższe – dla hamulca. Elementy nośne przyspawano do podstawy przypominającej literę „H”, podstawę zaś ustawiono na czterech stopkach wibroizolacyjnych, aby zapewnić stabilną i bezpieczną pracę podczas prowadzenia badań.

Profile wykonano ze stali konstrukcyjnej S235359 o parametrach podanych w tabl. I.

TABLICA I. Parametry stali konstrukcyjnej S235359

Współczynnik sprężystości, N/m <sup>2</sup>	2,1 e+11
Współczynnik Poissona	0,28
Współczynnik naprężenia ścinającego, N/m <sup>2</sup>	7,9 e+10
Masa właściwa, kg/m <sup>3</sup>	7700
Wytrzymałość na rozciąganie, N/m <sup>2</sup>	723 825 600
Wytrzymałość na ściskanie, N/m <sup>2</sup>	723 825 600
Granica plastyczności, N/m <sup>2</sup>	620 422 000
Współczynnik rozszerzalności cieplnej, 1/K	1,3 e-5

### Analiza wytrzymałościowa podstawy

Wykonano analizy wytrzymałościowe z uwzględnieniem obciążeń statycznych oraz obciążeń wynikających z pracy stanowiska, mające na celu wstępne sprawdzenie trwałości konstrukcji oraz określenie, czy cały ustrój podczas pracy będzie bezpieczny dla użytkownika. Do analiz wykorzystano program Solidworks z dodatkiem Simulation.

Analiza konstrukcji obciążonej statycznie ma na celu sprawdzenie odkształceń podstawy spowodowanych ciężarem hamulca oraz silnika. Analizę podzielono na cztery bardziej szczegółowe badania. W trzech pierwszych siła miała wartość 250 N i równała się sumie sił nacisku wywieranych przez wszystkie zamocowane elementy. W czwartym badaniu następowało jednoczesne oddziaływanie identycznych obciążeń wzdłuż wszystkich trzech osi. Suma składowych sił wynosiła 250 N. Jednocześnie w każdym badaniu obciążano podporę dłuższą i krótszą. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki sumarycznego oddziaływania sił (rys. 3 i 4).

Analiza wytrzymałościowa przypadku obciążeń wynikających z pracy stanowiska pozwoliła na sprawdzenie wytrzymałości konstrukcji na maksymalne obciążenia powstałe wskutek oddziaływania siły hamującej na ramię montażowe belki tensometrycznej. Maksymalny moment obrotowy, jaki może wytworzyć silnik, wynosi 15 Nm.

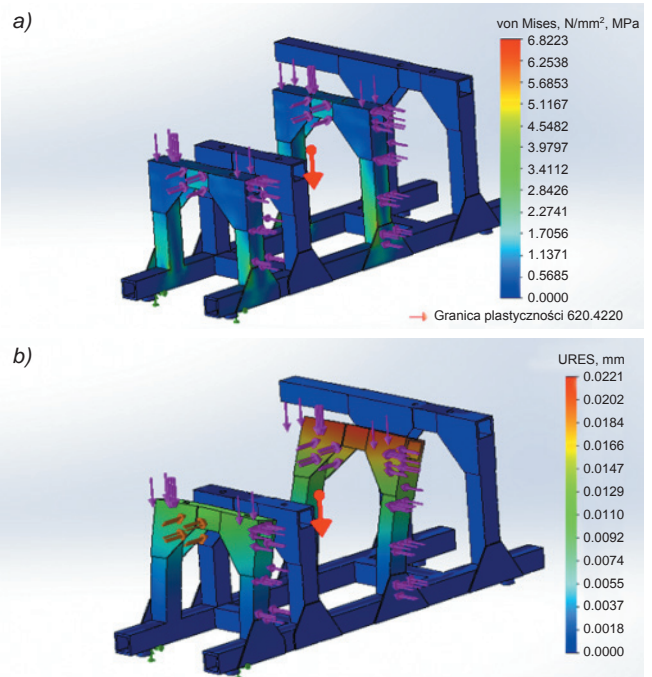
Z obliczeń wykonanych w środowisku Solidworks wynika, że ten moment może wywołać na końcu ramienia maksymalną siłę nacisku wynoszącą 91 N. Ze względu na uniwersalność stanowiska siła obciążająca belkę została zwiększona trzykrotnie – do wartości 273 N. W wyniku analiz uzyskano rozkład naprężeń w elementach oraz wartość przemieszczeń. W każdym badaniu dodatkowo uwzględniono siłę grawitacji. Parametry siatki elementów skończonych, zastosowanej w analizach, podano w tabl. II.

TABLICA II. Parametry siatki elementów skończonych

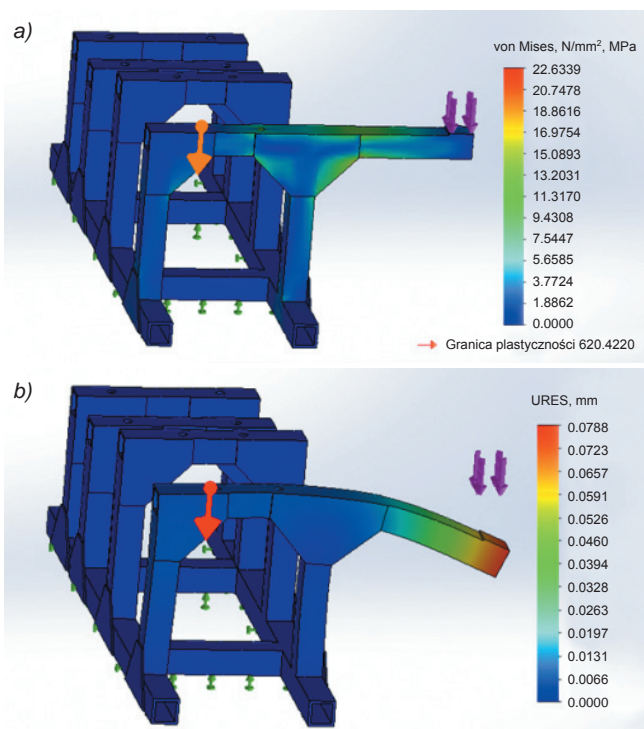
Typ siatki	Siatka bryłowa	
Użyty generator siatki	Siatka standardowa	
Automatyczne przejście	Wylączone	
Uwzględnij automatyczne pętle siatki	Wylączone	
Punkty jakobianu	4 punkty	
Rozmiar elementu, mm	9,82939	
Tolerancja, mm	0,49147	
Jakość siatki	Wysoka	
Całkowita liczba węzłów	63 096	
Całkowita liczba elementów	31 916	
Maksymalny współczynnik kształtu	15,082	
Procent elementów o współczynniku kształtu	< 3	35,3
	> 10	0,0815

Maksymalne naprężenie występujące w zamodelowanych elementach podstawy miało wartość 6,8223 MPa, a maksymalne przemieszczenie – 0,0221 mm (rys. 3). Z kolei maksymalne naprężenie w ramieniu belki tensometrycznej wyniosło 22,63 MPa, a jej maksymalne przemieszczenie – 0,079 mm.

W żadnym przypadku nie stwierdzono przekroczenia granicy plastyczności, tj. 620,42 MPa. Wartość maksymalna w badaniach statycznych wyniosła 14,38 MPa, natomiast w badaniach dynamicznych – 22,63 MPa. Największe przemieszczenie było równe 0,079 mm (badanie obciążeń dynamicznych). Wartości przemieszczeń nie przekraczają wstępnie założonej wartości 0,5 mm.



Rys. 3. Wartości sumarycznych naprężeń (a) i przemieszczeń (b) elementów podstawy



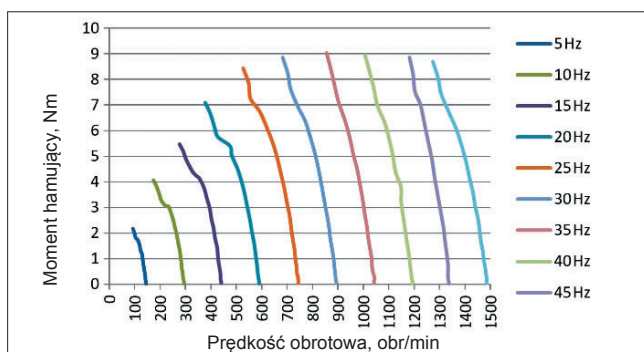
Rys. 4. Wartości sumarycznych naprężeń (a) i przemieszczeń (b) ramienia belki tensometrycznej

### Badanie hamulca wiropędowego

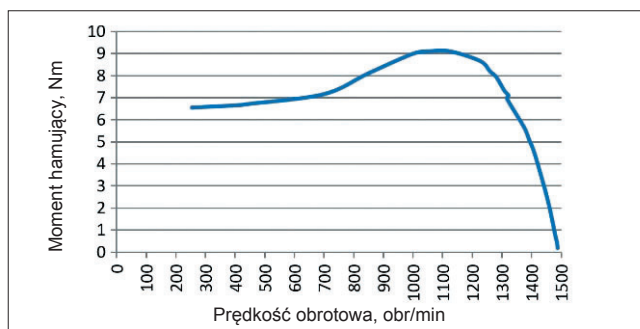
Wykonano badania dla dziesięciu nastaw falownika zasilającego silnik asynchroniczny: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 i 50 Hz. Odpowiadają im prędkości synchroniczne: 150, 300, 450, 600, 750, 900, 1050, 1200, 1350 i 1500 obr/min. Badania przeprowadzono kolejno dla ustalonej wartości częstotliwości prądu zasilającego silnik. Podczas badań nastawiano wartość częstotliwości na falowniku, a następnie zmieniano wartość napięcia hamowania podawanego na elektromagnesy hamulca w zakresie od 0 do 20 V, wywołując w ten sposób obciążenie mechaniczne silnika. Wartość siły odczytywano za pomocą przetwornika tensometrycznego, a wartość prędkości obrotowej – za pomocą obrotomierza.

Wyniki badań działania hamulca – rodzinę charakterystyk hamulca dla nastawianych częstotliwości prądu zasilającego – przedstawiono na rys. 5. Na rys. 6 pokazano zależność maksymalnego momentu obrotowego uzyskiwanego przy napięciu zasilającym 20 V.

Jedną z funkcjonalności prezentowanego stanowiska jest możliwość badania układów napędowych. Przeprowadzono badania silnika obciążanego hamulcem elektrodynamycznym. Uzyskaną przykładową cha-

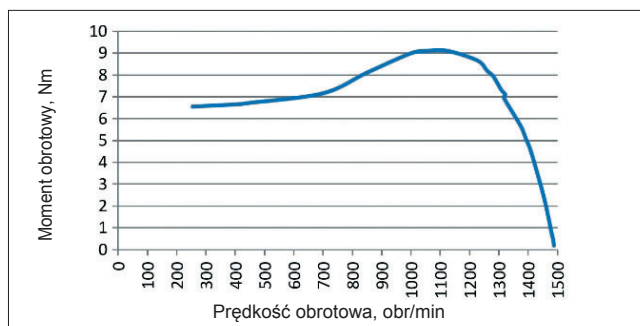


Rys. 5. Charakterystyka momentu hamującego wytwarzanego przy zasilaniu hamulca napięciem od 0 do 20 V przy różnych nastawach falownika zasilającego silnik (5÷50 Hz)



Rys. 6. Maksymalny moment hamujący powstający podczas pracy hamulca przy napięciu zasilającym 20 V

rakterystykę momentu napędowego badanego silnika Siemens 1LA7083-4AA10-Z w funkcji prędkości obrotowej przedstawiono na rys. 7. Badania przeprowadzono dla nastawionej częstotliwości 50 Hz (co daje prędkość synchroniczną 1500 obr/min) – silnik obciążano aż do uzyskania momentu obciążającego równego wartości krytycznej, a następnie obserwowano zmniejszanie się momentu napędowego generowanego przez silnik.



Rys. 7. Charakterystyka momentu obrotowego generowanego przez silnik, uzyskana dla przypadku zastosowania hamulca elektrodynamicznego

### Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w niniejszym artykule stanowisko badawcze zostało zaprojektowane i zbudowane do testowania układów napędowych w postaci modeli sinikowych wiatrowych, które mają być użyte do przetwarzania energii wiatru w quasi-autonomicznych punktach oświetleniowych lub sygnalizacyjnych (stanowisko z modułem hamulca elektrodynamicznego), oraz do badania generatorów energii elektrycznej, przeznaczonych do punktów oświetleniowych lub sygnalizacyjnych (stanowisko z modułem napędowym, przystosowane do badania generatorów).

Zaprezentowane charakterystyki obrazują zakres stosowalności badanego hamulca elektrodynamicznego. Pozwala on na precyzyjną regulację momentu obrotowego obciążającego badany silnik i zapewnia uzyskanie obciążenia do 10 Nm przy prędkościach obrotowych z zakresu od 100 do 1500 obr/min.

**Przedstawione prace zostały zrealizowane w ramach projektu *Modele funkcjonalne i badania konstrukcji quasi-autonomicznego punktu oświetleniowego lub sygnalizacyjnego* (decyzja Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego Nr 5119/B/T02/2011/40 z dnia 2011-02-04).**

### LITERATURA

- Skowron J. „Badanie wpływu indukcyjności na charakterystykę hamulca wiropędowego”. *Symulacja w Badaniach i Rozwoju*. 1, 1 (2010): s. 85–92.
- Skowron J. „Hamulce elektromagnetyczne w pojazdach szynowych”. *Symulacja w Badaniach i Rozwoju*. 3, 3 (2012): s. 159–167.