

Konrad Dąbala
Instytut Elektrotechniki, Warszawa

HAMOWNICE PRĄDU STAŁEGO I PRZEMIENNEGO ZE ZWROTEM ENERGII DO SIECI

DIRECT AND ALTERNATING CURRENT DYNAMOMETERS WITH THE ENERGY RETURN INTO THE MAIN

Abstract: In the paper were done some comparative tests of direct and alternating dynamometers with power-electronic device witch has possibility of returning energy to the main. There were used three types of motors witch had near the same rated torque and different speed. As criteria of the evaluation were used the values of stray load losses (method B), the dispersion of measured points, the fluctuation of tested motor input power and the shape of the current returned into the main. The measurements of torque were made by three devices a torque-meter, a force sensor and an electronic scale. There were presented the results of the tests, analysis of this results, conclusion, advantages and disadvantages of the devices.

1. Wstęp

W Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki w latach 2004-2005 została opracowana i wykonana komercyjna hamownica prądu stałego o mocy 15 kW [1] wraz z układem energoelektronicznym zapewniającym zwrot energii do sieci. W roku 2006 opracowano i wykonano hamownicę o mocy znamionowej 15 kW, ale tym razem prądu przemiennego również z układem energoelektronicznym zapewniającym zwrot energii do sieci. W niniejszym referacie przedstawiono szczegółowe wyniki badań obu typów hamownic oraz ich ocenę.

2. Obiekty badań

Do badań wybrano silniki indukcyjne klatkowe o różnej ilości biegunów i takiej mocy, że ich moment znamionowy był zbliżony i wynosił od 36 do 40 Nm.

Były to następujące silniki:

- Sg 160 M-2A, $P_N = 11$ kW, $U_N = 380$ V
- Sg 132 S-4, $P_N = 5,5$ kW, $U_N = 380$ V
- Sg 132 M-6A, $P_N = 4$ kW, $U_N = 380$ V.

3. Metody badań

Przy pomocy obu hamownic na powyższych silnikach przeprowadzono próby nagrzewania i wyznaczono charakterystyki obciążenia silników metodą B wg normy amerykańskiej [2]. Moment na wale był mierzony lub wyznaczany równocześnie trzema miernikami:

- wałkiem skrętnym
- czujnikiem siły (pomiar reakcji stojana)
- wagą (pomiar reakcji stojana).

Do oceny pomiarów momentu trzema sposobami wyznaczono z metody B charakterystyki strat dodatkowych obciążeniowych P_{al} w funkcji kwadratu momentu na wale silnika.

W celu wyznaczenia sprawności poszczególnych elementów układu (silnika badanego, hamownicy, układu energoelektronicznego oddającego energię do sieci) wykonano pomiary mocy pobieranej przez silnik badany i dodatkowo mocy oddawanej z hamownicy do układu energoelektronicznego oraz mocy oddawanej przez układ energoelektroniczny do sieci.

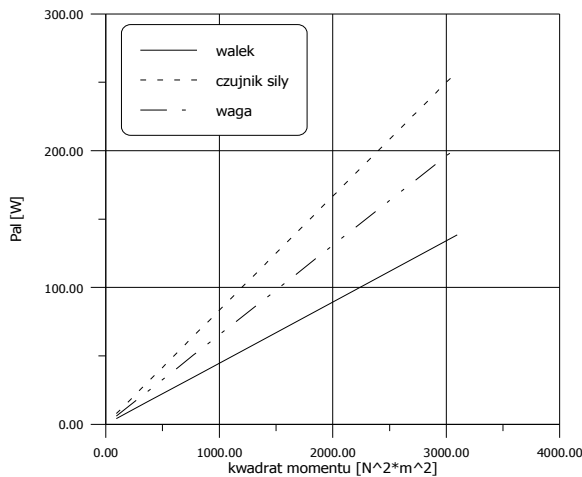
W celu oceny utrzymywania stabilności nastaw obu hamownic wyznaczono także zakres wahań mocy pobieranej przez silnik badany.

4. Wyniki pomiarów

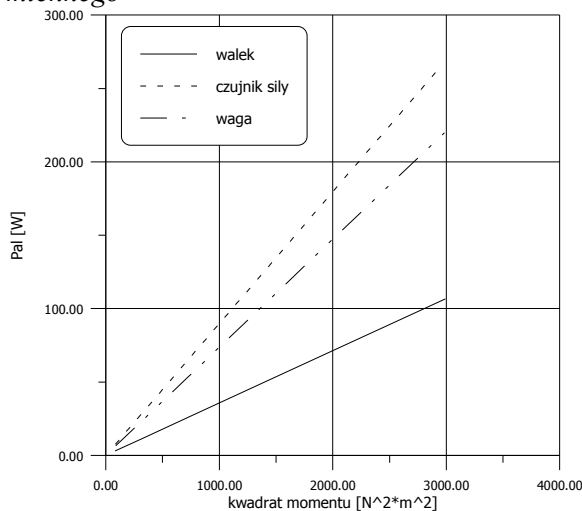
Przykładowe wyniki pomiarów dla silnika Sg 160 M-2A przedstawiono w tab. 1 i na rysunkach 1-4. Obejmują one wyniki badań strat dodatkowych obciążeniowych i sprawności silnika badanego oraz wartości współczynnika korelacji, która świadczy o rozrzucie punktów pomiarowych dla różnych sposobów pomiaru momentu na wale i różnych typów hamownic. Na rys. 3-4 przedstawiono sprawności poszczególnych elementów układu (silnik badany, hamownica, układ energoelektroniczny oraz sprawność hamownica - układ energoelektroniczny).

Tab. 1. Straty dodatkowe obciążeniowe znamionowe P_{al} , sprawność znamionowa η oraz współczynnik korelacji r dla silnika Sg 160 M-2A (11 kW) dla różnych hamownic i różnych sposobów wyznaczania momentu obrotowego silnika

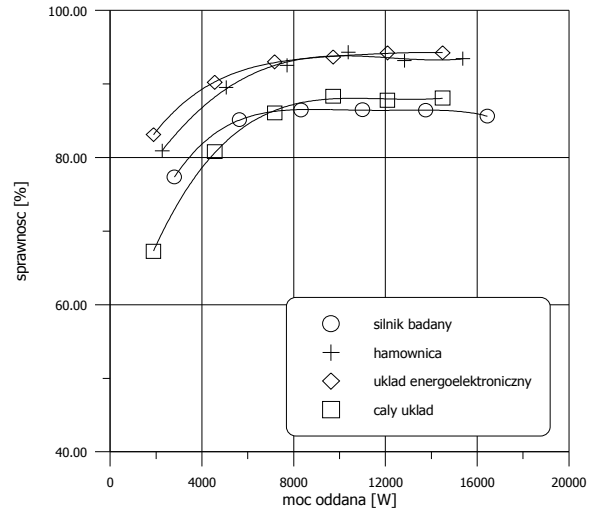
Sposób pomiaru momentu	hamownica prądu przemiennego			hamownica prądu stałego		
	P_{al} [W]	η [%]	r [-]	P_{al} [W]	η [%]	r [-]
walek	60,8	89,43	0,90	46,4	89,49	0,96
czujnik	111,8	89,03	0,91	115,8	88,93	0,94
waga	89,3	89,21	0,97	96,3	89,08	0,98
różnica (max-min)	51,0	0,40	0,07	69,4	0,56	0,02



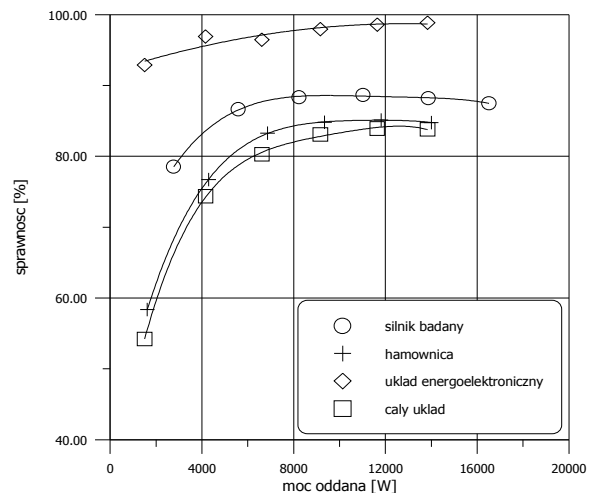
Rys. 1. Straty dodatkowe obciążeniowe P_{al} w funkcji kwadratu momentu wyznaczone dla różnych sposobów pomiaru momentu na wale silnika Sg 160 M-2A; hamownica prądu przemiennego



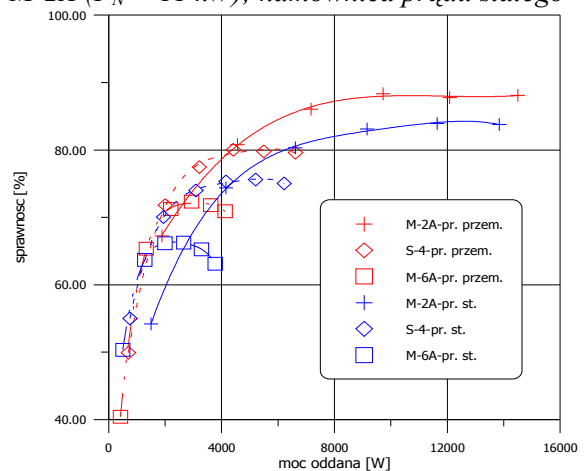
Rys. 2. Straty dodatkowe obciążeniowe P_{al} w funkcji kwadratu momentu wyznaczone dla różnych sposobów pomiaru momentu na wale silnika Sg 160 M-2A; hamownica prądu stałego



Rys. 3. Sprawność poszczególnych elementów układu oraz całkowita układu dla silnika Sg 160 M-2A ($P_N = 11$ kW); hamownica prądu przemiennego

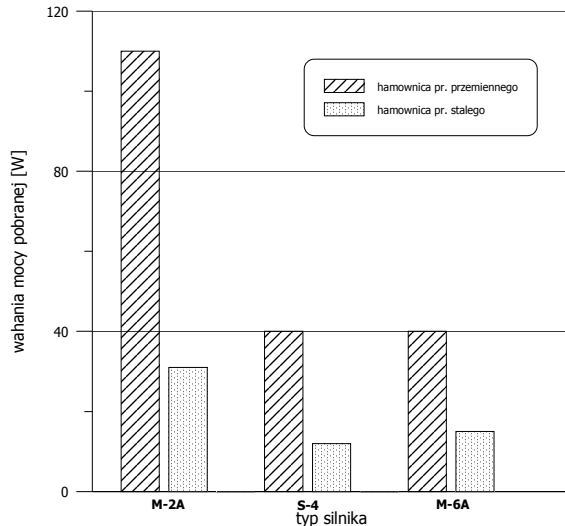


Rys. 4. Sprawność poszczególnych elementów układu oraz całkowita układu dla silnika Sg 160 M-2A ($P_N = 11$ kW); hamownica prądu stałego



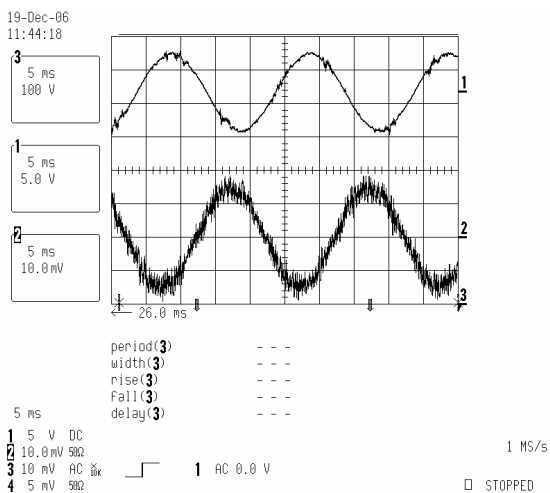
Rys. 5. Sprawność układu hamownica - układ energoelektroniczny dla różnych silników

Na rys. 5 przedstawiono wyniki sprawności układu hamownica - układ energoelektroniczny dla poszczególnych trzech typów badanych silników, zaś na rys. 6 wahania mocy pobranej przez różne silniki przy różnych hamownicach.

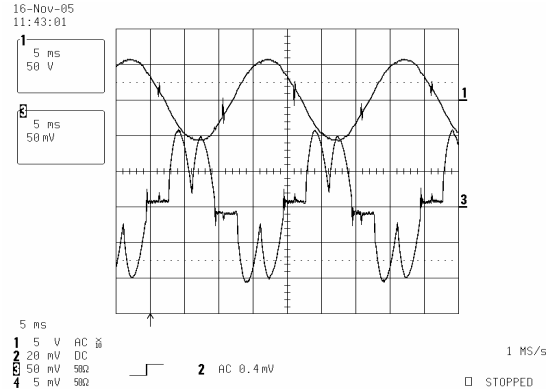


Rys. 6. Wahania mocy pobranej przez różne silniki z różnymi hamownicami

Rysunki 7 i 8 obrazują przebiegi napięć międzyfazowych i prądów fazowych oddawanych do sieci przez układ hamownicy prądu przemiennego i stałego dla przykładowego silnika Sg 160 M-2A przy obciążeniu 1,25 obciążenia znamionowego.



Rys. 7. Oscylogram napięcia międzyfazowego i prądu fazowego oddawanego do sieci silnika Sg 160 M-2A przy obciążeniu 1,25 obciążenia znamionowego - hamownica prądu przemiennego



Rys. 8. Oscylogram napięcia międzyfazowego i prądu fazowego oddawanego do sieci silnika Sg 160 M-2A przy obciążeniu 1,25 obciążenia znamionowego - hamownica prądu stałego. Przebiegi typowe dla tego rodzaju przekształtnika (tj. tyrystorowy dwumostkowy)

5. Analiza wyników badań

5.1 Straty dodatkowe obciążeniowe

Do analizy porównawczej hamownic wybrano metodę B i jej niewrażliwy punkt tj. wyznaczenie strat dodatkowych obciążeniowych. Rozrzut punktów pomiarowych może być kryterium oceny układu pomiarowego. Straty dodatkowe obciążeniowe w metodzie B wg [2] są wyznaczone dwuetapowo. W pierwszym kroku wyznacza się tzw. straty resztkowe, które są różnicą między mocą pobraną przez silnik a mocą oddaną. Moc pobrana jest mocą elektryczną, moc oddana wyznaczana jest z pomierzonych wartości wielkości mechanicznych tzn. momentu obrotowego na wale silnika i prędkości obrotowej silnika. W drugim etapie przeprowadzana jest regresja liniowa strat resztkowych w funkcji kwadratu momentu obrotowego silnika. Do oceny jakości pomiarów służy współczynnik korelacji r . Pomiaru są zadawalające, jeżeli $r \geq 0,90$, gdy $r = 1$ wtedy mamy do czynienia z interpolacją. Z doświadczenia wiadomo, że wyniki pomiarów o małych rozrzutach charakteryzują się $r > 0,96$. Sposób pomiaru momentu ma zasadnicze znaczenie przy pomiarach metodą B. Może to być pomiar bezpośredni na wale silnika za pomocą wałka skrętnego, lub pośredni przez pomiar siły reakcji stojana hamownicy. Według literatury w tym drugim przypadku należy uwzględnić straty mechaniczne hamownicy i siłę im odpowiadającą odjąć od wskazań czujnika siły. W naszych pomiarach zastosowaliśmy czujnik siły firmy Hottinger oraz równocześnie wagę elektryczną.

Wyniki przedstawione na rys. 1-2 świadczą o tym, że we wszystkich przypadkach strat dodatkowe wyznaczone na podstawie pomiarów wałkiem skrętnym są o ok. 50% mniejsze niż wyznaczone na podstawie pomiarów siły reakcji stojana. Dotyczy to zarówno czujnika jak i wagi (różnica między wskazaniem tych dwóch czujników różni się nie więcej niż 20%). Można by przypuszczać, że różnica ta (wałek a czujniki siły) wynika ze strat mechanicznych hamownicy, ale w metodzie B straty te są wyznaczane w tzw. „korekcji dynamometru” i uwzględniane w wyniku końcowym. Należy też zauważyć, że różnica ta nie jest wartością stałą a zależną od obciążenia, ponieważ współczynniki kierunkowe prostych znacznie się różnią. Należy zauważyć, że „korekcja dynamometru” jest wyznaczana w metodzie B praktycznie przy biegu jałowym (silnik badany napędza niezasiloną hamownicę) i odejmowana od momentu zmierzonego we wszystkich punktach obciążenia jako wartość stała, a przecież jest ona zależna (dla tej wielkości silników) od prędkości obrotowej w trzeciej potędze (wynika to z pomiarów przeprowadzonych w Zakładzie Maszyn Elektrycznych). Jednak, jak pokazały wyniki obliczeń uwzględnienie korekcji zależnej od prędkości obrotowej też nie tłumaczy tej aż 50 % różnicy między pomiarami z wałka i czujnikami. Prowadzi to do różnic w wyznaczanej sprawności silnika badanego nawet do 0,8 punktu procentowego. Uzasadnienia można częściowo upatrywać w rodzaju zastosowanej hamownicy. Na rys. 1-2 i z tab. 1 widać, że **różnice te są większe dla hamownicy prądu stałego**. Może się to wiązać z bardziej złożoną zależnością strat mechanicznych od prędkości obrotowej (obciążenia) w maszynie komutatorowej. Natomiast przedstawione w tab. 1 wartości współczynników korelacji **świadczą na korzyść hamownicy prądu stałego**, gdyż prawie we wszystkich pomiarach są **znaczaco większe dla tej właśnie hamownicy**, co świadczy o mniejszym rozrzucie strat resztkowych w funkcji kwadratu momentu.

5.2 Wahania mocy pobranej

Na rozrzut wyników pomiarów ma duży wpływ m. in. utrzymywanie stałego momentu na wale silnika. Należy zauważyć, że „jednocześnie” wykonuje się pomiar wielkości elektrycznych i mechanicznych. W rzeczywistych warunkach pomiarowych nawet z układami energoelektronicznymi utrzymującymi stały moment na wale

(a takie są oba rozważane układy hamownic tzn. prądu przemiennego i prądu stałego) występują **wahania mocy pobieranej i co za tym idzie mocy oddawanej** i w rezultacie mamy do czynienia z wieloma stanami kwazi-ustalonymi a nie z wyidealizowanym stanem ustalonym. Wahania te są spowodowane głównie zmianami parametrów sieci zasilającej (wartości skutecznej i częstotliwości napięcia sieci) jak również specyfiką układu mechanicznego silnik badany-hamownica (zmiany strat w czasie próby spowodowane docieraniem się części mechanicznych, rozgrzewaniem smaru). Prowadzą one w rezultacie do sytuacji, w której wynikiom pomiaru wielkości elektrycznych odpowiadają wyniki pomiarów wielkości mechanicznych inne niż dla tego właśnie wymuszenia elektrycznego. Ta „nieodpowiedniość” wynika z różnic w stałych czasowych obwodu elektrycznego i mechanicznego.

Wyniki przedstawione na rys. 6 świadczą jednoznacznie, że **w układzie pomiarowym z hamownicą prądu przemiennego występują 3-krotnie większe wahania** mocy pobieranej przez silnik badany niż w układzie z hamownicą prądu stałego. Potwierdzają to pośrednio także wartości współczynnika korelacji r w tab. 1, świadczące o większych rozrzutach strat resztkowych.

5.3 Sprawność

Innym kryterium służącym do oceny hamownic z możliwością oddawania energii do sieci jest sprawność urządzeń. Na rys. 3-5 przedstawiono charakterystyki sprawności w funkcji mocy oddanej: hamownic, układów energoelektronicznych z nimi współpracującymi oraz całego układu hamownica - układ energoelektroniczny. Oczywiście jest, że hamownica prądu stałego ma sprawność mniejszą o ok. 10 punktów procentowych od sprawności hamownicy wykonanej na bazie silnika indukcyjnego klatkowego. Za to tyrystorowy układ przekształtnikowy prądu stałego ma sprawność wyższą o ok. 5 pn. % od układu prądu przemiennego. Sprawność zaś całego układu hamownica - układ energoelektroniczny jak łatwo wydedukować wychodzi korzystniej dla układu prądu przemiennego.

Można zauważyć także, że sprawność układów energoelektronicznych dla obciążeń poniżej 0,5 obciążenia znamionowego zaczyna spadać i dla 0,25 P_N może się różnić od znamionowej o 10 punktów procentowych.

5.4 Kształt prądu oddawanego do sieci

Układ prądu przemiennego oddaje do sieci prąd sinusoidalny z naniesionymi mikro przebiegami niestabilnymi (przebieg oscylacyjny gasnący), wywołanymi przez mikro zwarcia międzyfazowe podczas przełączania tranzystorów a wytłumiany za pomocą dławika. Prąd z przekształtnika prądu stałego ma kształt niesinusoidalny, typowy dla układu tyrystorowego dwumostkowego.

6. Wnioski

Stwierdzono różnice w stratach dodatkowych obciążeniowych przy pomiarach momentu wałkiem skrętnym a czujnikami siły dochodzące do 50%. Prowadzi to do różnic w wyznaczonej sprawności silnika badanego nawet do 0,8 punktu procentowego. Może to być spowodowane wahaniami parametrów sieci zasilającej, niejednoczesnością pomiarów wielkości elektrycznych i mechanicznych, nieuwzględnieniem w „korekcy dynamometru” zależności od prędkości obrotowej silnika. Wydaje się, że jednym z rozwiązań ograniczających wahania parametrów zasilania mogłoby być zastosowanie stabilizatora napięcia i częstotliwości przemiennej. W celu ostatecznej oceny hamownic zebrano kryteria i oceny w tab. 2, z której wynika, że hamownicą wyżej ocenioną jest hamownica prądu przemiennego. W ocenie jej przeważała nowoczesność przekształtnika (kształt prądu sinusoidalny) i wyższa sprawność całego układu. Ale z punktu widzenia jakości przeprowadzanych pomiarów zdecydowanie przeważa hamownica prądu stałego, zapewniając stabilniejszą pracę układu i mniejsze wahania mocy pobieranej przez silnik badany.

Tab. 2. Podsumowanie oceny hamownic

L p.	Kryterium	Ham. pr. przem.	Ham. pr. stałego
1.	Różnica między pomiarami z wałka i czujnikami	+	-
2.	Rozrzut strat resztkowych	-	+
3.	Wahania mocy pobieranej przez silnik badany	-	+
4.	Sprawność hamownicy	+	-
5.	Sprawność układu energoelektronicznego	-	+
6.	Sprawność całego układu	+	-
7.	Kształt prądu oddawanego do sieci	+	-
	Razem	4+	3+

7. Literatura

- [1]. Dąbała K., Dylis W., Zagrajek M.: *Hamownica prądu stałego z oddawaniem energii do sieci*. Nowa Elektrotechnika. Nr 2/2006, str. 8-9
- [2]. *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. IEEE Std 112-1996

Autor

Dr inż. Konrad Dąbała
Instytut Elektrotechniki, Zakład Maszyn Elektrycznych
04-703 Warszawa, ul. Pożaryskiego 28
tel. 0-22 812-30-20
e-mail: k.dabala@iel.waw.pl