

Wojciech Zieliński
Politechnika Lubelska, Lublin

PRZEGLĄD MOŻLIWOŚCI DOŚWIADCZALNEGO OBCIĄŻENIA SILNIKÓW WYSOKOOBROTOWYCH

A REVIEW OF THE POSSIBILITIES OF EXPERIMENTAL LOADING OF HIGH-SPEED MOTORS

Abstract: High-speed motors are mainly used in the bearing, precision engineering and textile industries. In Poland, only one-off motors of this kind are produced. The developing high-speed technologies encourage work towards implementation of the production of high-speed motors for a suitable range of power, rotational speed and rotational speed regulation.

Most of the operations performed during the production of rolling bearings are grinding operations. For this operation to be carried out in a precise manner, it is necessary to provide a grinding wheel with a peripheral speed of several dozen meters per second, which corresponds to 12 to several hundred thousand revolutions per minute. The basic components of grinders are high-speed asynchronous squirrel-cage motors, which have different characteristic properties than classic motors supplied with power-line frequency. Also laboratory testing of those motors is done in a different way. They are supplied from motor or thyristor frequency converters with a voltage of $200 \div 2000kV$. The problem of loading a high-speed motor under laboratory conditions follows from the difficulty of mechanically coupling it to the test bench.

In this article, an attempt was made to choose a simple, classical motor loading method for high-speed motors using known types of mechanical, electromagnetic and electrodynamic brakes.

1. Wstęp

Silniki wysokoobrotowe stosowane są głównie w przemyśle łożyskowym, precyzyjnym i włókienniczym.

Obrabiarki skrawające bardzo twarde materiały wymagają zastosowania silników o prędkościach obrotowych do $150000 \text{ obr} / \text{min}$ oraz o mocach w przedziale $10 \div 4000W$ [1].

Większość operacji wykonywanych przy produkcji łożysk tocznych stanowią operacje szlifowania. Do dokładnego wykonania tej operacji konieczne jest zapewnienie tarczy szlifierskiej

prędkości obwodowej rzędu $40 \div 80 \frac{m}{s}$, co od-

powiada 12 do kilkuset tysięcy obrotów na minutę oraz mocy do $4kW$. Podstawową częścią szlifierek są wysokoobrotowe asynchroniczne silniki klatkowe, które posiadają inne cechy, niż tego rodzaju silników klasyczne zasilane napięciem o częstotliwości technicznej [4]. Również ich badanie w warunkach laboratoryjnych przebiega w odmienny sposób i wymagają odpowiedniego sposobu sprzęgnięcia z maszyną obciążającą [3], [4]. Zasilane są one z maszynowych lub tyrystorowych przetwornic częstotliwości napięciem o częstotliwości $200 \div 2000kV$.

Dodatkowo silniki wysokoobrotowe stosowane są do napędu np. ultrawirówek przy separacji zawieszin używanych w laboratoriach, kompresorów, pomp odśrodkowych, czy pomp próżniowych.

W Polsce produkowane są pojedyncze egzemplarze tych silników.

Rozwijające się technologie wysokoobrotowe skłaniają do przygotowania wdrożenia produkcji silników wysokoobrotowych dla odpowiedniego zakresu mocy, prędkości obrotowej i zakresu jej regulacji.

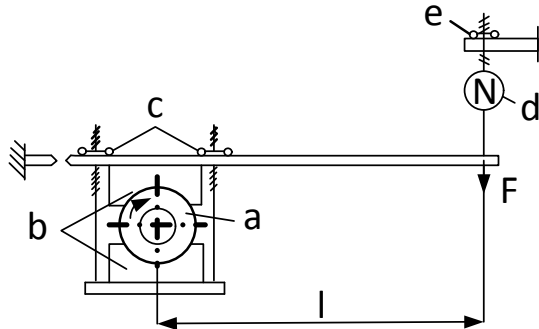
Problem obciążenia silnika wysokoobrotowego w warunkach laboratoryjnych wynika z trudności mechanicznego sprzęgnięcia go z hamownicą. Rozwiązanie takie wymaga zapewnienia współosiowości wałów obu maszyn i zastosowania odpowiedniego typu sprzęgła.

Problem ten można rozwiązać sprzęgając z silnikiem badanym drugą maszynę tego samego typu oraz o tych samych wymiarach gabarytowych [4]. Spełniony wówczas będzie warunek współosiowości wałów ze względu na to, iż zewnętrzne średnice stojanów wykonane są z dużą dokładnością ze względu na konieczność mocowania silników np. w aparatach szlifierskich, które muszą zapewnić odpowiednią dokładność obróbki łożysk tocznych.

Rozwiązanie takie jest możliwe, lecz prowadzi do stosowania w każdej maszynie oddzielnych urządzeń do wytwarzania mgły olejowej i aparatów dostarczających czynnik chłodzący. W artykule dokonano próby doboru łatwej klasycznej metody obciążania silników wysokoobrotowych w oparciu o znane rodzaje hamulców: mechanicznych, elektromagnetycznych i elektrodynamicznych.

2. Hamulce mechaniczne

Hamulce mechaniczne działają na zasadzie tarcia koła osadzonego na wale badanego silnika o dociskany do niego element cierny. Równowaga występuje wówczas, gdy moment obrotowy silnika jest zrównoważony momentem tarcia. Klasycznym hamulcem mechanicznym jest hamulec Prony'ego, którego zasada działania pokazana jest na rysunku 1.



Rys. 1. Hamulec Prony'ego: a – koło cierne, b – klocki cierne, c – nakrętki śrub dociskowych do koła ciernego, d – dynamometr, e – nakrętka korekcyjna położenia ramienia hamulca

W hamulcu tym bęben hamowany jest klockami o regulowanym docisku. Moment określany jest jako $T = Fl$. Energia hamowania zamienia się w ciepło, co ogranicza możliwość stosowania hamulca dla silników o średnich i dużych mocach.

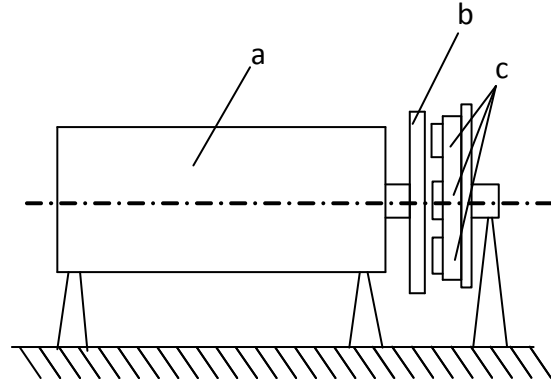
Specjalną odmianą hamulców mechanicznych są hamulce wodne. Moment obciążenia reguluje się ilością wody przepływającą przez hamulec. Woda spełnia zarazem rolę czynnika chłodzącego odprowadzając ciepło wytworzone na skutek tarcia.

Zastosowanie tego typu hamulców do obciążania silników o dużej prędkości obrotowej jest niemożliwe z uwagi na bardzo duże tarcie i odprowadzenia takiej ilości ciepła.

3. Hamulce elektromagnetyczne

Hamulce elektromagnetyczne działają na zasadzie prądów indukowanych w metalowych tarczach wirujących w nieruchomym polu magnetycznym [5].

Zasada działania hamulca elektromagnetycznego z tarczą zilustrowana jest na rysunku 2.



Rys. 2. Hamulec elektromagnetyczny: a – silnik badany, b – tarcza wirująca, c – elektromagnes

Stalowa tarcza osadzona jest na wale badanego silnika. Obok tarczy umieszczone są elektromagnes wzbudzone prądem stałym. Podczas wirowania tarcza jest przemagnesowywana i powstają w niej straty od prądów wirowych i histerezy. Moment obrotowy stara się obrócić elektromagnes w kierunku wirowania tarczy. Elektromagnesy przymocowane są do jarzma, przez które przebiega część linii sił magnetycznych. Jarzmo osadzone za pomocą łożyska w stojaku. Regulując prąd płynący w uzwojeniach elektromagnesów, bądź zmieniając szerokość szczeliny powietrznej, można regulować strumień, a więc i indukcję w wirującej tarczy. Tym samym reguluje się moment hamujący działający na badany silnik. W stanie równowagi moment elektromagnetyczny jest zrównoważony ciężarem Q zawieszonym na ramieniu l . Moment określa się zależnością $M = Ql \sin \alpha$.

W przypadku zastosowania tarczy z materiału niemagnetycznego nie wystąpią w niej straty od histerezy, ponadto do wytworzenia określonej wartości momentu należy wytworzyć wielokrotnie większą siłę magnetomotoryczną, niż w przypadku stosowania tarczy stalowej.

Stosowanie tego typu hamulca do obciążenia silnika wysokoobrotowego jest niebezpieczne

dla jego łożysk, gdyż w tarczy wydzielają się bardzo duże ilości ciepła. Mogą również występować trwałe odkształcenia pogarszające własności badanego układu. Dużą poważną wadą takiego rodzaju rozwiązania jest hałas, który powstaje przy bardzo dużych prędkościach obrotowych.

Zarówno hamulce mechaniczne, jak i elektromagnetyczne mają wspólną wadę, która wynika z niemożności odprowadzenia, gromadzonej w nich dużej ilości ciepła.

4. Hamulce elektrodynamiczne

Hamulcem elektrodynamicznym jest każda prądnicą elektryczną o specjalnej konstrukcji, której stojan może obracać się w łożyskach. Można wówczas dokonać bezpośredniego pomiaru momentu hamującego. Podczas pracy w hamownicy powstaje moment obrotowy, który przy ułożyskowanym stojanie powoduje jego ruch.

Powyższy moment może być zrównoważony ciężarem Q zawieszonym na ramieniu l .

Tego typu hamulce to głównie maszyny prądu stałego, gdyż mają wygodną regulację obciążenia przez zmianę prądu w obwodzie wzbudzenia. Zbyt mała wytrzymałość mechaniczna uniemożliwia stosowanie tych prądnic do obciążania silników pracujących przy dużych prędkościach obrotowych.

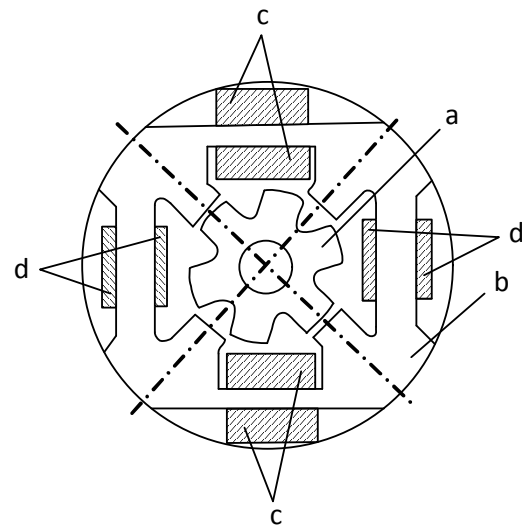
5. Hamulec induktorowy o odwracalnym kierunku strumienia

Budowa hamulca induktorowego została przedstawiona na rysunku 3 [6].

Hamulec ten posiada wirnik uzębiony w kształcie gwiazdy (a), wykonany z pakietu blach elektrotechnicznych i osadzony na końcu wału badanego silnika. Stojan hamulca (b) jest również zbudowany z pakietu blach i posiada dwa uzwojenia: twornika (c) oraz wzbudzące (d). Uzwojenie wzbudzące zasilane jest napięciem stałym o regulowanej wartości prądu.

Podczas obracania się wirnika strumień wzbudzony w stojanie zamyka się drogami o różnej reluktancji w związku z różną ilością zębów stojana i wirnika. Z uzwojeniem twornika skojarzony jest więc strumień przemienny, który indukuje w tym uzwojeniu napięcie przemiennie

o częstotliwości $f = \frac{zn}{60}$, gdzie z - liczba zębów wirnika, n - prędkość obrotowa.



Rys. 3. Hamulec indukcyjny z odwracalnym kierunkiem strumienia: a – wirnik, b – stojan, c – uzwojenie twornika, d – uzwojenie wzbudzenia

Powstająca energia tracona jest poza układem silnik - hamownica np. na rezystorze dołączonym do obwodu twornika.

Taki więc rodzaj hamulca może być używany przy obciążaniu silników wysokoobrotowych w warunkach laboratoryjnych [7]. Wirnik nie posiada uzwojenia jest uzębiony i ma niewielką średnicę, może więc być przykręcony do końca wału. Istnieje możliwość dokładnego wyważenia go i wycentrowania na bazie końca wału. Również można uzyskać dość dokładną centryczność stojana na bazie stojana silnika wysokoobrotowego.

Hamulec indukcyjny z odwracalnym kierunkiem strumienia umożliwia określenie mocy oddawanej przez badany silnik z dość dużą dokładnością.

Próby z zastosowaniem prądnic indukcyjnych zostały przeprowadzone przy obciążaniu silnika indukcyjnego klatkowego o mocy $P_N = 2kW$ i prędkości obrotowej $n_N = 90000obr/min$ stosowanego do szlifowania łożysk tocznych.

6. Wnioski końcowe

Z przeprowadzonej analizy wynikają następujące wnioski:

1. Problem obciążenia silnika wysokoobrotowego w warunkach laboratoryjnych wynika z trudności mechanicznego sprzęgnięcia go z hamownicą. Rozwiązanie takie wymaga zapewnienia współosiowości wałów obu

- maszyn i zastosowania odpowiedniego typu sprzęgła.
2. Hamulce mechaniczne i elektromagnetyczne wymagają mechanicznego sprzęgnięcia z wałem silnika wysokoobrotowego i dlatego nie można ich stosować do tego typu badań. Zastosowanie tego typu hamulców do obciążania silników o dużej prędkości obrotowej jest niemożliwe z uwagi na bardzo duże tarcie i odprowadzenia takiej ilości ciepła.
 3. Przy dużych prędkościach obrotowych (rzędu $120000 \text{ obr} / \text{min}$) połówki sprzęgła znajdują się względem siebie w płaszczyznach nierównoległych. Wskutek tego dochodzi prawie natychmiast do zniszczenia elementów elastycznych znajdujących się pomiędzy nimi. Z kolei sztywne skrócenie czyni pracę niemożliwą i prowadzi do szybkiego zniszczenia łożysk silnika i hamownicy. Hamulce tego rodzaju mogą być brane pod uwagę tylko w przypadku obciążania silników których prędkość obrotowa nie przekracza $18000 \text{ obr} / \text{min}$.
 4. Do obciążeń silników wysokoobrotowych nie mogą być również używane hamulce elektromagnetyczne. Są one stosunkowo duże oraz wydzielają ciepło w swoich tarczach lub bębnach osadzonych na wałach badanych silników powodujące deformacje łożysk i wirników. Ilość ciepła jest stosunkowo duża, a jego odprowadzenie niemożliwe. Przykładowo w silniku o mocy $P_N = 2 \text{ kW}$ i prędkości obrotowej $n_N = 90000 \text{ obr} / \text{min}$ ciepło należałoby odprowadzić z tarczy o średnicy około 5 cm .
 5. Najodpowiedniejszym hamulcem do obciążania silników o dużej prędkości obrotowej jest hamulec induktorowy o odwracalnym kierunku strumienia. Wirnik ma małą średnicę, nie posiada uzwojenia natomiast jest uzębiony. Może on być przykręcony na końcu wału podobnie jak tarcza szlifierska do elektrowrzeciona szlifującego łożyska i bieżnie łożysk tocznych. Istnieje możliwość dokładnego wycentrowania go na bazie końca wału oraz dokładnego wyważenia.
 6. Warunek współosiowości wałów jest spełniony przy sprzęgnięciu z silnikiem badanym drugiej maszyny tego samego typu

oraz o tych samych wymiarach gabarytowych. Zewnętrzne średnice stojanów silników wysokoobrotowych wykonane są z dużą dokładnością ze względu na konieczność mocowania ich np. w aparatach szlifierskich, które muszą zapewnić odpowiednią dokładność obróbki łożysk tocznych. Rozwiązanie takie wymaga stosowania w każdej maszynie oddzielnych urządzeń do wytwarzania mgły olejowej i aparatów dostarczających czynnik chłodzący.

7. Literatura

- [1]. Dąbrowski M., Rudeński A. *Oprogramowanie do projektowania silników indukcyjnych wysokoobrotowych*. Maszyny Elektryczne, BOBRME, KOMEL, Zeszyty problemowe, Nr 80/2008, Ryto – maj 2008.
- [2]. Dubicki B.: *Maszyny elektryczne, Tom III: Silniki indukcyjne*, WNT, Warszawa 1964.
- [3]. Zielińska M.: *Własności mechaniczne szybkoobrotowych indukcyjnych silników klatkowych*. XI Seminarium Techniczne BOBRME, KOMEL, Ustroń – maj 2001.
- [4]. Zielińska M.: *Cechy szczególne silników indukcyjnych zasilanych napięciem o dużej częstotliwości*, rozprawa doktorska, Gliwice 1986r.
- [5]. Pełczewski W.: *Sprzęgła elektromagnetyczne*, WNT, Warszawa 1964.
- [6]. Wróbel T.: *Prądnice zwiększonej częstotliwości*, MON, Warszawa, 1972.
- [7]. Kasperek W.: *Badanie prądnicy induktorowej z komutacją strumienia*, Praca dyplomowa, Zakład AiEK, Lublin.