

Zastosowanie pompy hydraulicznej i koła zamachowego do wyznaczania charakterystyk silników elektrycznych

Ryszard Janas

W artykule opisano zastosowanie pompy hydraulicznej i koła zamachowego do wyznaczania charakterystyk silników elektrycznych, szczególnie zasilanych przez przemienniki częstotliwości lub elektroniczne układy przekształtnikowe. Scharakteryzowano dotychczas stosowane sposoby hamowania, ich wady i zalety. Przedstawiono konstrukcję hydraulicznego układu hamującego, jego cechy charakterystyczne i sposób prowadzenia badań oraz zastosowanie koła zamachowego do wyznaczania niektórych charakterystyk silnika.

Wyznaczanie charakterystyk mechanicznych silników elektrycznych jest ważnym elementem procesu dydaktycznego w pracowniach elektrycznych szkół ponadgimnazjalnych i laboratoriach wyższych uczelni. Do przeprowadzenia procesu wyznaczania charakterystyk, oprócz typowego sprzętu laboratoryjnego, konieczny jest hamulec umożliwiający hamowanie wału silnika i pomiar momentu obrotowego. Najczęściej stosuje się hamowanie za pomocą ciernego hamulca taśmowego, określając moment obrotowy poprzez pomiar sił występujących w taśmie za pomocą siłomierzy mechanicznych. Sposób ten charakteryzuje się szybkim nagrzewaniem się bębna hamulca i taśmy, co uniemożliwia prowadzenie dłuższych pomiarów, szczególnie niezbędnych przy energoelektrycznych układach zasilających.

Używa się do tego celu także hamulca wiroprądowego, prozkowego lub maszyny prądu stałego pracującej jako prądnica. Są to jednak układy drogie, pomiar momentu obrotowego jest utrudniony, a problem odprowadzenia ciepła pozostaje nie do końca rozwiązany.

Energoelektryczne układy zasilające

Do zasilania badanych silników elektrycznych prądu stałego i przemiennego są stosowane klasyczne układy zasilające oraz skalarne i wektorowe przemienniki częstotliwości (do silników prądu przemiennego) i układy przekształtnikowe (do silników prądu stałego). Badając silniki zasilane w taki sposób konieczne jest przeprowadzenie pomiarów większej liczby parametrów. W przypadku silników prądu przemiennego (klatkowych-asynchronicznych) dokonuje się np. pomiaru momentu napędowego dla różnych częstotliwości i charakterystyk U/f (charakterystyka liniowa,

kwadratowa, różne wartości napięcia początkowego), mierzy się oprócz tego moment hamujący, czasami też moment hamowania zatrzymanego wału. W przypadku silników prądu stałego, oprócz momentu napędowego i hamującego, bada się jakość regulacji PID prędkości obrotowej wału silnika w zależności od obciążenia. Pomiaru tych parametrów najczęściej nie można przeprowadzić za pomocą opisanych wyżej urządzeń hamujących. Konieczne jest więc zastosowanie innych urządzeń do hamowania wału silnika.

Cel stosowania pompy i koła zamachowego

Hamulec – zbudowany do wyznaczenia charakterystyk silnika asynchronicznego klatkowego o mocy 0,68 kW i nominalnej prędkości obrotowej 950 obr/min, zasilanego ze skalarne lub wektorowe przemienniki częstotliwości (rys. 1, rys. 2) – był również stosowany do wyznaczenia charakterystyk silnika prądu stałego o podobnej mocy zasilanego z czterokwadrantowego przekształtnika elektronicznego (rys. 3). Maksymalny moment, jaki jest możliwy do zmierzenia, wynosi 5 Nm.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe

mgr inż. Ryszard Janas
– doktorant Politechniki Śląskiej



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe



Rys. 3. Silnik prądu stałego

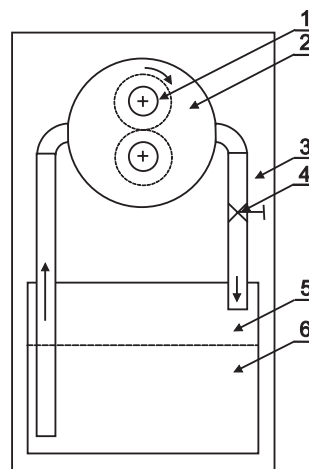
Celem zbudowania hamulca hydraulicznego oraz zastosowania koła zamachowego było umożliwienie wyznaczenia większości charakterystyk silników elektrycznych zasilanych z energoelektronicznych układów napędowych. Hamulec ten umożliwia przeprowadzenie dokładnych pomiarów napędowego momentu obrotowego dla różnych nastaw parametrów, umożliwia także praktyczne sprawdzenie obliczonego teoretycznie i nastawionego w przemienniku zabezpieczenia termicznego I^2t oraz zabezpieczenia nadprądowego, jak również pomiar mocy czynnej i biernej pobieranej z sieci zasilającej dla różnych parametrów konfiguracyjnych i obciążeń układu.

Koło zamachowe pozwala na wyznaczenie niektórych parametrów pracy hamulcowej silnika i układu zasilającego, jak m.in. przyspieszenie i opóźnienie kątowe, czas hamowania (wybiegu) napędzanej maszyny o określonym momencie bezwładności, jak również pracę energoelektronicznego modułu hamowania podłączonego do przemiennika, w tym pomiar przepływu energii – badanie prądów i napięć w gałęzi pośredniej. Możliwe jest także wyznaczenie charakterystyk prądowych zasilania przy rozpędzaniu i hamowaniu mas wirujących, w tym pomiar ewentualnego odzysku energii.

Budowa i zasada działania hamulca hydraulicznego

W skład hamulca hydraulicznego (rys. 4) wchodzi:

- podstawa wykonana z blachy aluminiowej o grubości 4 mm – (3)
- wał pompy zębatej napędzany przez badany silnik elektryczny – (1)
- pompa zębata – (2)
- zawór dławiący – (4)
- zbiornik oleju – (5)
- olej hydrauliczny – (6).

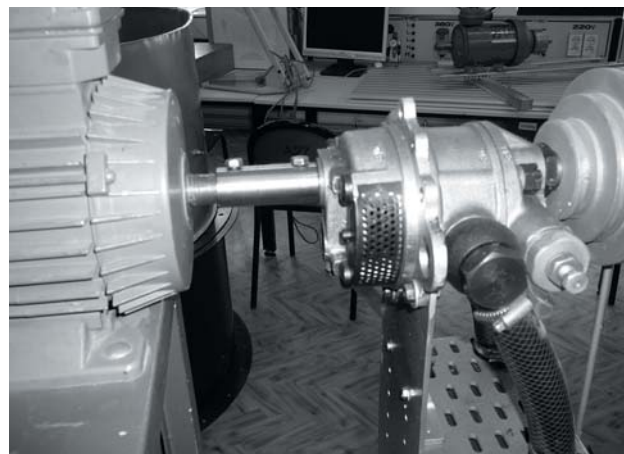


Kompletny hamulec jest połączony z wałem silnika sprzęgniętym, za pomocą sprzęgła tulejowego, z napędzającym wałem pompy (rys. 5, rys. 6).

Rys. 4. Budowa hamulca

Przy wykonywaniu tulei łączącej zespół hamulca z wałem badanego silnika, konieczne było zwrócenie szczególnej uwagi na współosiowość wykonanych w niej otworów. Zbyt duże odchyłki współosiowości są przyczyną drgań hamulca podczas wykonywania pomiaru.

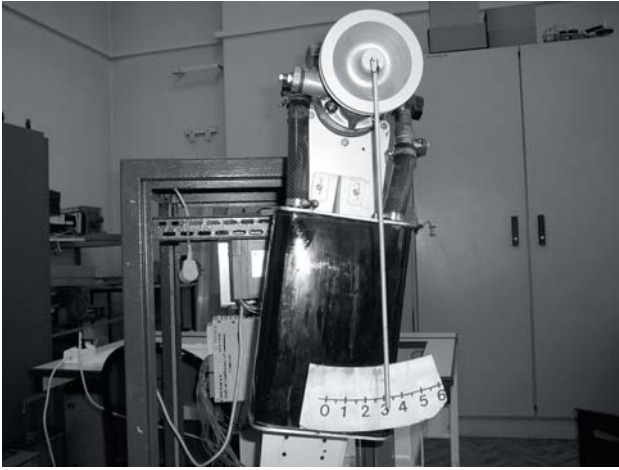
Podczas pracy pompa pobiera olej ze zbiornika i przetłacza go doń z powrotem poprzez zawór dła-



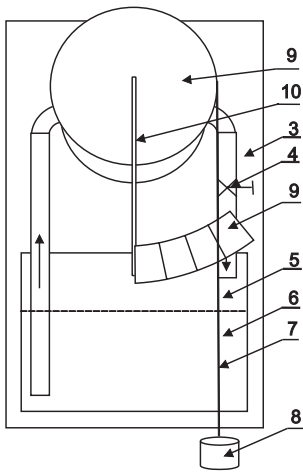
Rys. 5. Zawieszenie hamulca



Rys. 6. Zawieszenie hamulca



Rys. 7. Pomiar momentu obrotowego



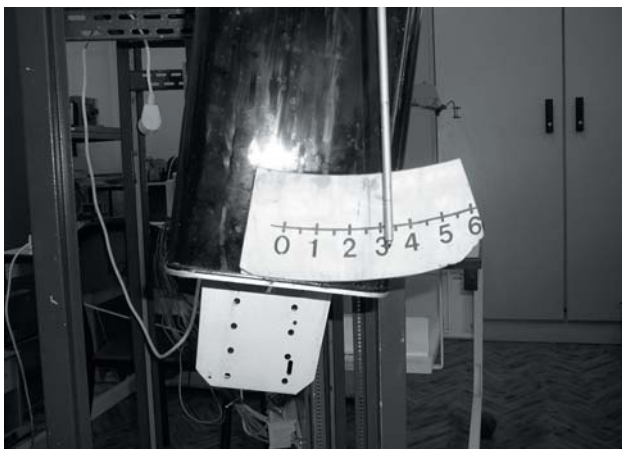
Rys. 8. Skalowanie hamulca

wiący – (rys. 6). Dławienie przepływu oleju zaworem powoduje wzrost momentu oporowego pompy, skutkiem czego cały hamulec wychyla się o określony kąt od położenia początkowego (rys. 7). Kąt ten jest miarą momentu obrotowego, jaki występuje w danym stanie obciążenia na wale silnika i jest wskazywany na skali przez wiszącą wskazówkę (10) – (rys. 8, rys. 9).

Skalowanie urządzenia przeprowadza się (rys. 8)

z wykorzystaniem zamocowanego na osi pompy koła pasowego (9) zawieszając określone masy (8) na owiniętym wokół niego cięgnie (7). Wskazania są zależne od ilości oleju znajdującego się w zbiorniku. Przy założeniu, że ilość oleju hydraulicznego jest stała, nie jest potrzebne częste powtarzanie procesu skalowania.

Powstające podczas hamowania ciepło bardzo powoli nagrzewa zgromadzony w zbiorniku olej, umożliwiając przeprowadzenie długotrwałych pomiarów parametrów silnika.



Rys. 9. Pomiar momentu obrotowego

Koło zamachowe

Koło zamachowe (rys. 10) osadzone jest na wale silnika za pomocą piasty. Umożliwia pomiar uzyskanego przyspieszenia i opóźnienia kątownego w danej konfiguracji układu napędowego. Pozwala również zbadać



Rys. 10. Koło zamachowe

działanie energoelektronicznego modułu hamowania przemienników z obwodem pośrednim i pracę hamulcową przekształtników czterokwadrantowych. Możliwe jest także przeprowadzenie pomiarów charakterystyk prądowych przy rozpędzaniu i hamowaniu mas wirujących.

Prowadzenie pomiaru

Po ustawieniu zadanych parametrów przemiennika częstotliwości lub układu przekształtnikowego zasilającego silnik należy wykonać następujące czynności:

- przygotować tachometr stykowy lub optyczny do pomiaru prędkości obrotowej silnika lub wykorzystać do tego celu zamontowaną na silniku prądnicę tachometryczną z podłączonym miernikiem napięcia
- zawór dławiący ustawić w pozycji maksymalnie otwartej
- uruchomić silnik
- dokonać pomiaru prędkości obrotowej silnika na biegu luzem
- zwiększyć dławienie na zaworze dławiącym, aż do uzyskania określonego przyrostu momentu obrotowego (np. 0,5 Nm)
- zmierzyć prędkość obrotową silnika
- powtarzać czynności e) oraz f) aż do całkowitego zamknięcia zaworu dławiącego
- zmniejszać dławienie zaworu podobnie jak w e)
- zmierzyć prędkość obrotową silnika
- powtarzać czynności h) oraz i) aż do całkowitego otwarcia zaworu
- zatrzymać silnik
- wykonać wykres charakterystyki silnika.

Koło zamachowe ma określony moment bezwładności J . Przy zastosowaniu wzorów

$$\varepsilon = \frac{M}{J} \quad \text{oraz} \quad \varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

gdzie: ε – przyspieszenie kątowe, M – moment obrotowy, J – moment bezwładności, $\Delta\omega$ – przyrost prędkości, Δt – przyrost czasu

określane jest doświadczalnie maksymalne przyspieszenie, jakiego można oczekiwać od napędu w danej konfiguracji. Wykonuje się to poprzez ustawienie określonego czasu rozpędzania i hamowania, a następnie obserwację prądu pobieranego przez układ zasilający, prądu silnika, czasu rzeczywistego rozbiegu i wybiegu, jak również napięcia w obwodzie pośrednim i działania przerywacza hamowania z rezystorem hamowania.

Możliwości automatyzacji pomiaru

Wyznaczanie charakterystyk za pomocą opisanego urządzenia może zostać częściowo lub całkowicie zautomatyzowane przy następujących założeniach:

- pomiar prędkości obrotowej silnika za pomocą prądnicy tachometrycznej - napięcie na niej powstające doprowadzone za pośrednictwem dzielnika napięcia do wejścia analogowego napięciowego (0 – 10 V) sterownika PLC
- zmiana dławienia zaworu za pomocą serwomechanizmu sterowanego poprzez wyjście analogowe napięciowe lub PWM sterownika PLC z odczytem położenia zaworu za pomocą potencjometru
- pomiar kąta obrotu hamulca hydraulicznego za pomocą potencjometru zamocowanego na osi pompy – sygnał rezystancji po przetworzeniu na standardowy sygnał napięciowy doprowadzony do wejścia analogowego sterownika
- pomiar prądów i napięć w sieci zasilającej, obwodzie pośrednim oraz w obwodzie silnika za pomocą przetworników, których wyjścia są podłączone do wejść analogowych sterownika PLC.

Wyznaczanie charakterystyki z wykorzystaniem sterownika PLC

Podczas pomiaru zautomatyzowanego do sterownika PLC doprowadzone są sygnały analogowe:

- sygnał prędkości obrotowej silnika mierzony za pomocą prądnicy tachometrycznej – doprowadzony do wejścia analogowego napięciowego (0 – 10 V) przez dzielnik rezystorowy
- sygnał wychylenia hamulca od położenia pionowego mierzony za pomocą potencjometru – doprowadzony poprzez przetwornik R/U lub R/I do wejścia analogowego sterownika
- sygnał kąta obrotu zaworu mierzony za pomocą potencjometru wchodzącego w skład serwomechanizmu – doprowadzony poprzez przetwornik R/U lub R/I do wejścia analogowego sterownika
- sygnały prądów i napięć opisane w punkcie „Możliwości automatyzacji pomiaru”.

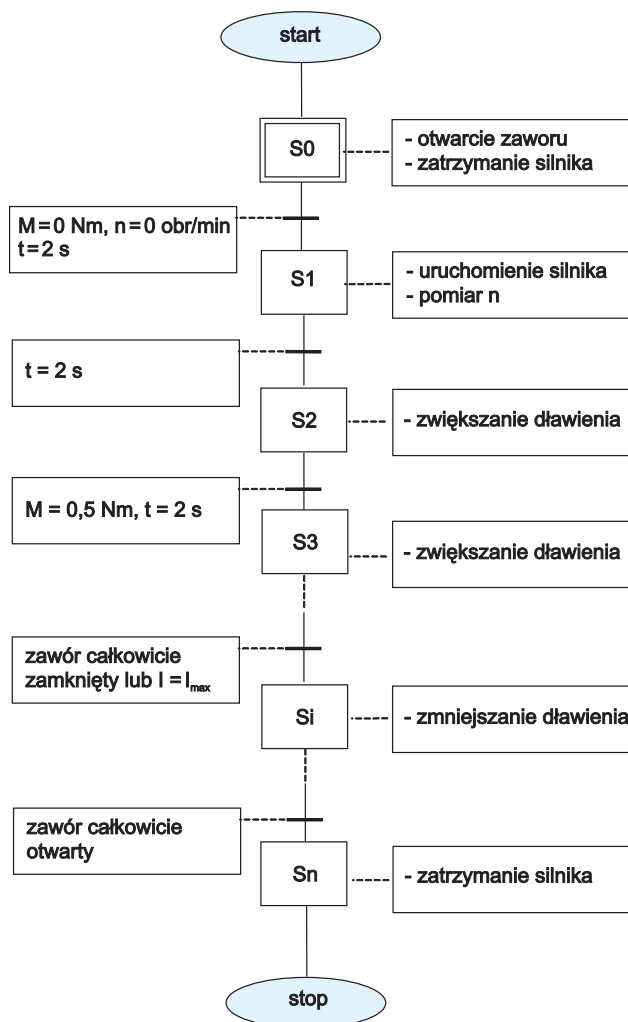
Z wyjść sterownika są wyprowadzone:

- analogowy sygnał sterujący serwomechanizmem otwierającym i zamykającym zawór dławiący przepływ oleju
- binarny sygnał uruchamiający silnik.

Zadaniem sterownika jest przeprowadzenie pomiaru charakterystyki silnika i zgromadzenie danych do późniejszej obróbki. Najodpowiedniejszym do celu badania silnika jest program typu Grafset, pozwalający precyzyjne podzielenie procesu badania na etapy oraz ustalenie warunków przejścia między etapami. Uproszczony przykładowy algorytm programu przedstawiony jest na rys. 11.

Opis algorytmu:

- W pierwszym etapie sterownik wykonuje całkowite otwarcie zaworu dławiącego, resetuje wyjście złączające silnik i sprawdza, czy wskazania prędkości obrotowej i momentu są równe zeru. Jest to warunek przejścia do etapu drugiego.
- W drugim etapie zostaje uruchomiony silnik i przeprowadzony pomiar prędkości obrotowej biegu luzem, warunkiem przejścia jest czas ustalony wstępnie na 2 s.
- W trzecim etapie dławienie zaworu zostaje zwiększone tak, aby uzyskać zadany moment obrotowy. Zakłada się, że będzie to 0,5 Nm. Po uzyskaniu zadanego momentu i czasie 2 s program przechodzi do etapu czwartego.



Rys. 11. Algorytm programu do wyznaczenia charakterystyki silnika

- W dalszych etapach następuje zwiększanie dławienia zaworu do uzyskania zadanych wartości momentu aż do całkowitego jego zamknięcia lub spadku prędkości obrotowej poniżej zadanej jako graniczna. Możliwe jest też ustalenie progowej wartości prądu pobieranego przez silnik.
- Po zaistnieniu opisanego wyżej warunku następuje cykliczne zmniejszanie dławienia. Pomiar kończy się, gdy zawór jest całkowicie otwarty, wyłączeniem silnika. Zmierzone wartości zostają zapamiętane w sterowniku, można je odczytać za pomocą programu narzędziowego sterownika lub oprogramowania wizualizacyjnego.

Automatyczna obróbka danych

Przy zastosowaniu oprogramowania do wizualizacji możliwa jest obserwacja procesu na ekranie, tworzenie charakterystyk i eksport danych, np. do programu Microsoft Excel. Pozwala to na pełną automatyzację badania. Mając do dyspozycji przemiennik lub przekształtnik współpracujący z PC, można uzupełnić proces automatyzacji badania poprzez programową zmianę nastaw realizowaną przez sterownik PLC. Możliwe jest wtedy także przeprowadzenie analizy mocy biernej (podstawowej częstotliwości zasilającej i częstotliwości harmonicznych) pobieranej przez silnik.

Stan obecny

W chwili obecnej pomiar wykonuje się operując zaworem ręcznie. Moment obrotowy jest odczytywany na podziałce przymocowanej do zbiornika oleju, prędkość obrotową mierzy się tachometrem. W najbliższym czasie zamontowany zostanie serwomechanizm sterujący zaworem oraz tachoprądnica i potencjometr. Pozwoli to na prowadzenie pomiarów w sposób automatyczny z zastosowaniem sterownika PLC.

Wnioski

Za pomocą przedstawionego hamulca oraz koła zamachowego możliwe jest przeprowadzenie pomiaru charakterystyk silników elektrycznych, szczególnie zasilanych za pośrednictwem energoelektronicznych układów zasilających. Budowa stanowiska i sposób prowadzenia pomiaru umożliwiają jego częściowe lub całkowite zautomatyzowanie, jak również przekazanie wyników pomiarów do urządzeń rejestrujących i komputera

Bibliografia

1. Dokumentacja techniczna i materiały informacyjne firm: Lumel, Lenze, Lucas Nülle.
2. E. Goźlińska: *Maszyny elektryczne*. WSiP Warszawa 2007.

