

STANOWISKO DYDAKTYCZNE DOBORU PARAMETRÓW NAPĘDÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH

DIDACTIC STATUS OF POWER ELECTRONIC DRIVES PARAMETER SELECTION

Ryszard Janas

Zespół Szkół Politechnicznych „Energetyk”,
al. Wyzwolenia 5, 58-300 Wałbrzych,
Dolnośląskie Centrum Informacji Zawodowej
i Doskonalenia Nauczycieli w Wałbrzychu,
Rynek 6, 58-300 Wałbrzych,
Wałbrzyska Wyższa Szkoła Zarządzania
i Przedsiębiorczości,
ul. 1 Maja 131, 58-305 Wałbrzych
e-mail: rjanas27@gmail.com

Abstract: The article describes issues related to the didactic status of the selection of parameters of power electronic drives, AC and DC. The paper presents the teaching equipment, designed and built by the author, with the help of which classes for students (electrical technicians, electronics technicians) and students of production engineering have been conducted for 15 years. The use of frequency converters, motors, motor shaft loading methods in the process of determining the characteristics of the motor is presented. The paper shows the selection, testing and verification of a set of drive parameters in terms of their compliance with the established way of working drive. It illustrates the hazards of improper selection of parameters. The article focuses on the guidance of teaching-learning the selection of parameters of power electronic drives.

Keywords: didactic status, characteristic of the engine, electric motor, hydraulic brake, flywheel, tuning, electric drive, torque, frequency converter

Wprowadzenie

Obecnie stosowane napędy są głównie napędami energoelektronicznymi. Zarówno w napędach prądu stałego, jak i przemiennego do historii odeszły układy rozruchowe i sterujące oparte na rezystorach (w tym wodnych) i przełączaniu uzwojeń, jak również będące klasyką dla silników asynchronicznych przełączniki gwiazda – trójkąt [1, 2]. Coraz rzadziej także stosowane są silniki pierścieniowe. Rozruchu i sterowania pracą napędu dokonuje się za pomocą układów elektronicznych, opartych o podzespoły mocy, układy sterujące i technikę mikroprocesorową. Napędy takie cechują się w odróżnieniu od klasycznych innymi parametrami (moment

zahamowania wału, moment rozruchowy, moment napędowy, moment hamowania, stopień podniesienia, zabezpieczenie I^2t , czas rozruchu, czas wybiegu, kształt charakterystyki (liniowa lub kwadratowa) i inne), pozwalają także na pełną automatyzację i wizualizację ich pracy poprzez możliwość pracy w sieciach przemysłowych. W procesie dydaktycznym dotyczącym projektowania, wdrażania, programowania i konfiguracji konieczne jest stosowanie innych niż dotychczas metod pomiaru, w szczególności momentu obrotowego w całej rozpiętości prędkości obrotowej podczas napędu i hamowania, jak również przy nieruchomym wale silnika. Zmiany w tym zakresie nie nadążają niestety za postępem techniki napędowej. Stosowane

zwykle do pomiaru charakterystyk silników klasyczne stanowiska wyposażone w hamulce taśmowe lub szcękowe wszelkich typów nie spełniają tego zadania, nie jest możliwe za ich pomocą wykonanie niezbędnych pomiarów parametrów i wyznaczenie odpowiednich charakterystyk. Również stosowane w tym zakresie jako hamulce prądnice prądu stałego [3] lub inne maszyny elektryczne nie umożliwiają dokonania niezbędnych pomiarów. Niemożliwe jest bowiem badanie dynamiki napędu, jak również jego parametrów przy małych prędkościach obrotowych, przy częstotliwości rzędu 1 Hz, a także momentu hamowania nieruchomego wału. Także coraz częściej stosowane systemy oparte o maszyny elektryczne typu serwo, pracujące jako hamulce w pełnym zakresie prędkości obrotowej (już od 0 obr/min) nie w pełni spełniają swoje zadanie. Wykonują one bowiem najczęściej badania w cyklu całkowicie automatycznym, przez co zmniejszone zostają wartości dydaktyczne dotyczące pomiaru, uczeń/student nie wie, jakie czynności wykonuje zautomatyzowane stanowisko i z czego one wynikają, nie potrafi także odpowiednio zinterpretować wyników.

Przedstawione stanowisko, zaprojektowane przez autora, składające się z trzech zespołów – modułów: hamulca - pompy hydraulicznej, koła zamachowego oraz bębna ciągnowego z obciążnikami, jest systemem pomiarowym w pełni umożliwiającym przeprowadzenie opisanych wyżej pomiarów. Części te mogą pracować oddzielnie lub razem, co umożliwia pomiar złożonych sytuacji napędowych. Przy prowadzonych jednocześnie pomiarach prądu i napięcia, jak również $\cos \varphi$, mocy czynnej i biernej w obwodzie zasilającym przekształtnik lub przemiennik możliwe jest pełne badanie wszystkich parametrów napędu w przeciwieństwie do dotychczas stosowanych metod.

Porównanie stanowiska i zakresu jego stosowania z innymi metodami pomiarowymi wskazuje na jego przewagę dydaktyczną. Wpływ wszystkich nastaw na parametry napędu jest natychmiast widoczny. Możliwe jest praktyczne poznanie wpływu danego parametru na charakterystykę napędu energoelektronicznego. Właściwość ta jest szczególnie cenna przy kształceniu kadr w technicznych szkołach średnich i wyższych, jak również specjalistycznych kursach i szkoleniach, np. dla pracowników serwisu napędów.

Charakterystyka stanowiska dydaktycznego

Stanowisko składa się z hamulca hydraulicznego (rys.1), koła zamachowego (rys.2) i bębna linowego z obciążeniem w postaci zbiornika z wodą lub szalki z odważnikami (rys.3). Badanym silnikiem jest silnik elektryczny prądu przemiennego, trójfazowy o mocy 0,55 kW, zasilany z przemiennika skalarnego (u/f) lub wektorowego (bezcujnikowy układ wektorowego sterowania silnikiem (Sensor less vector control (SVC))). Silnik wyposażony jest w układ obcego chłodzenia – wentylator napędzany silnikiem DC 24V. Przebiegi programowane są (parametryzowane) za pomocą lokalnych modułów. W układzie zasilającym podłączone są mierniki do pomiaru prądu, napięcia oraz mocy czynnej pobieranej z sieci. Dodatkowo w obwodzie zasilającym znajduje się licznik energii pobieranej przez stanowisko, filtr sieciowy, hamulec energoelektroniczny (chopper). Możliwe jest zamontowanie przekształtnika AC/DC oraz silnika prądu stałego. Prędkość obrotowa silnika mierzona jest za pomocą tachometru stykowego lub optycznego.

Za pomocą hamulca hydraulicznego (rys.1) przeprowadza się badanie podstawowych, statycznych charakterystyk silnika. Podczas pomiaru momentu obrotowego dokonuje się jednocześnie pomiaru prądu, napięcia i mocy czynnej po stronie zasilnia przemiennika. Pozwala to na wyznaczenie $\cos \varphi$ napędu w zależności od jego parametrów. Schemat budowy hamulca przedstawiono na rys. 4. Olej (7) pobierany jest ze zbiornika i tłoczony przez pompę hydrauliczną (8) i zawór dławiaczy (3) z powrotem do zbiornika. Powstający wskutek dławienia moment oporowy powoduje wychylenie się układu o określony kąt, przy którym moment obrotowy pochodzący od ciężaru hamulca jest równy momentowi obrotowemu silnika. Moment ten jest wskazywany na skali (4) przez wskazówkę (2). Podczas pracy hamulca olej nagrzewa się, jednak jest to proces powolny, pozwalający na wyznaczenia wszystkich planowanych charakterystyk silnika. Hamulec hydrauliczny zastępuje w tym przypadku stosowane dawniej powszechnie hamulce taśmowe, silnie nagrzewające się podczas pomiaru, uniemożliwiając tym samym wyznaczenie charakterystyk napędu energoelektronicznego

dla kilku zestawów parametrów konfiguracyjnych. Również stosowane jako obciążenie silnika prądnice prądu stałego z uwagi na niewielki moment oporowy przy małych prędkościach obrotowych nie mają w tym przypadku zastosowania.

Koło zamachowe (rys. 2) pozwala na wyznaczenie parametrów dynamicznych pracy napędowej i hamulcowej układu silnik napędowy – maszyna napędzana (zredukowana do koła zamachowego) jak m.in. możliwe do osiągnięcia przyspieszenie i opóźnienie kątowe,

czas hamowania (wybiegu) maszyny napędzanej, także przy zastosowaniu hamowania GSB oraz energoelektronicznego przerywacza hamulca. Możliwe jest także przeprowadzenie pomiarów charakterystyk prądowych zasilania przemiennika przy rozpędzaniu i hamowaniu mas wirujących, w tym pomiar ewentualnego odzysku energii. Włączenie miernika napięcia w obwód pośredni przemiennika pozwala na zbadanie funkcjonowania przerywacza hamulca.



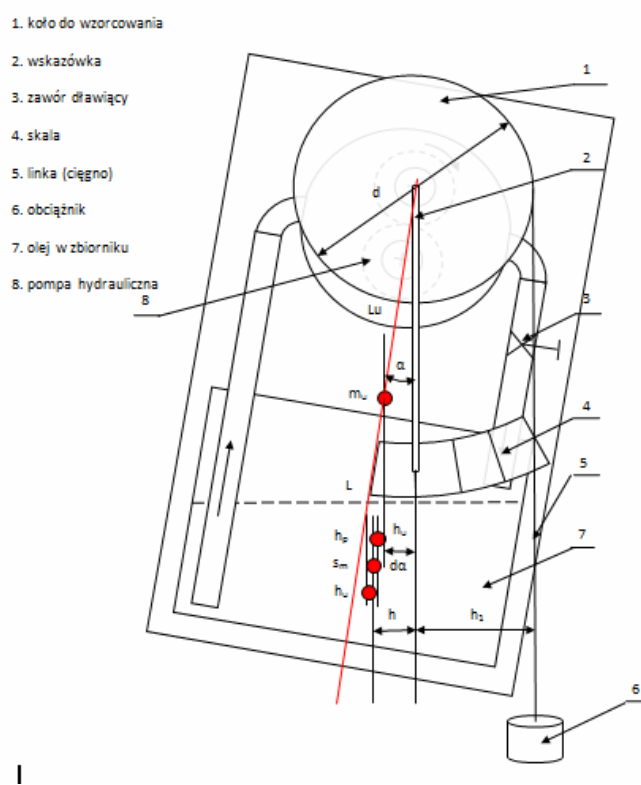
Rys. 1. Hamulec hydrauliczny



Rys. 2. Koło zamachowe



Rys. 3. Bęben linowy z obciążeniem



Rys. 4. Budowa hamulca hydraulicznego

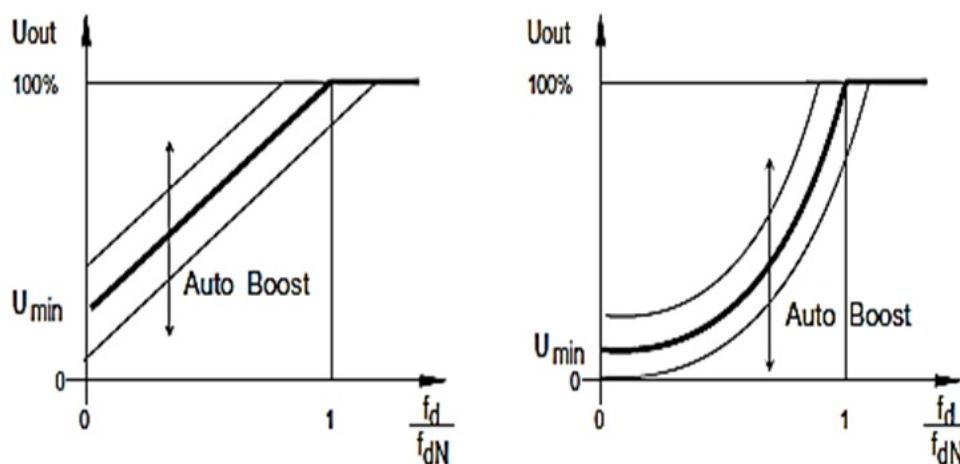
Bęben linowy z obciążeniem w postaci zbiornika z wodą (rys. 3) służy do przeprowadzania pomiaru momentu hamowania zatrzymanego wału oraz bardzo ważnej przy badaniu napędów energoelektronicznych charakterystyki przejścia zatrzymanie – napęd przy podnoszeniu i opuszczaniu wiszącego

ciężaru (przy dodatnim i ujemnym momencie obrotowym). Prawidłowy dobór parametrów dla takiej pracy napędu warunkuje bezpieczną pracę układów napędowych dźwigów osobowych i towarowych, jak również żurawi budowlanych, eliminując niestabilną pracę napędu i zjawisko „rollbacku” [4].

Stosowane przekształtniki i przemienniki częstotliwości

Przebieg skalarny AC/AC

Przebieg skalarny jest najprostszym urządzeniem energoelektronicznym do przekształcania energii i zasilania silnika. Sterowanie napięciem wyjściowym przebiegu jest liniowo [$U=f(f)$] lub kwadratowo [$U=f(f^2)$] (rys.5) zależne od zadawanej częstotliwości wyjściowej [5]. Na rys. 5 przedstawiono typowe charakterystyki



Rys. 5. Charakterystyki przebiegu u/f

Przebieg wektorowy AC/AC

Przebiegi wektorowe są coraz częściej spotykane w przemyśle. Charakteryzują się zaawansowanymi właściwościami regulacyjnymi. Można spotkać w tym zakresie różne rozwiązania, począwszy od najprostszych przebiegów wektorowych, do przebiegów z zaawansowanymi funkcjami technologicznymi i regulatorami PID. W przypadku stosowania tzw. przebiegu czujnikowego, możliwe jest mierzenie i dostarczanie poprzez obwód sprzężenia zwrotnego sygnału aktualnej prędkości obrotowej i położenia wału silnika do przebiegu.

Sterowanie silnikiem w takim przypadku jest sterowaniem polowym zorientowanym względem strumienia wirnika.

Każdy przebieg wektorowy umożliwia pracę w następujących trybach:

sterowania przebiegu skalarnego. Praca z charakterystyką liniową jest stosowana wszędzie tam, gdzie obciążenie silnika jest liniowo zależne od jego prędkości obrotowej, natomiast praca z kwadratową charakterystyką jest stosowana w układach wentylatorowych i pompowych (pompy odśrodkowe). Możliwe jest korygowanie charakterystyki poprzez tzw. podwyższenie U_{min} (Auto Boost), czyli podniesienie wartości minimalnej amplitudy napięcia wyjściowego w niższym niż znamionowym zakresie częstotliwości wyjściowych.

- skalarna liniowa lub kwadratowa regulacja prędkości (praca w trybie U/f),
- wektorowa regulacja prędkości,
- wektorowa regulacja momentu

Przebieg AC/DC

Do zasilania silników prądu stałego we współczesnych układach napędowych stosuje się przekształtniki AC/DC. W zależności od dedykowanego zastosowania mogą one zapewnić funkcjonowanie napędu w jednej, dwóch lub czterech ćwiartkach układu współrzędnych, poprzez napęd i hamowanie w jednym lub dwóch kierunkach wirowania. Przeznaczone są do zasilania silników z oddzielnym uzwojeniem wzbudzenia, jak również ze wzbudzeniem od magnesów trwałych. Obwód wzbudzenia jest najczęściej nieregulowany, zasilany z sieci poprzez mostek prostowniczy. Sterowanie przekształtnika odbywa się podobnie jak przebiegu

częstotliwości za pomocą sygnałów analogowych lub cyfrowych podawanych na jego zaciski, lub za pomocą przemysłowych sieci. Silnik z reguły musi być wyposażony w prądnicę tachometryczną, stanowiącą niezbędną gałąź sprzężenia zwrotnego.

Parametry przemienników i przekształtników

Dla przemiennika skalarnego (u/f) podstawowymi parametrami są [6]:

- minimalna i maksymalna częstotliwość napięcia zasilającego silnik,
- częstotliwość znamionowa silnika,
- częstotliwość pracy silnika,
- kilka częstotliwości wstępnie zaprogramowanych,
- kształt charakterystyki u/f (liniowy lub kwadratowy),
- funkcja „*auto bost*” (jest to samoczynne podnoszenie napięcia na silniku podczas pierwszych sekund pracy),
- podniesienie U_{min} ,
- czas rozruchu i wybiegu,
- poziom hamowania GSB,
- częstotliwość przy której załączane jest hamowanie GSB,
- poziom zabezpieczenia I^2t oraz dla przemienników wektorowych ponadto [7]:
- liczba par biegunów,
- prąd silnika na biegu jałowym,
- rezystancja uzwojeń,
- indukcyjność uzwojeń,
- parametry regulatora PID prędkości obrotowej dla przekształtnika AC/DC [8]:
- napięcie wzbudzenia,
- czas rozruchu,
- czas wybiegu,
- maksymalny prąd twornika,
- parametry regulatora PI prędkości obrotowej (wzmocnienie, czas całkowania).

Badanie wpływu parametrów przemiennika/przekształtnika na charakterystykę statyczną silnika

Skalowanie hamulca przeprowadza się (rys. 4) z wykorzystaniem zamocowanego na osi pompy koła z wykonanym dookoła rowkiem (1), (jest to zaadaptowane koło pasowe), zawieszając określone masy (6) na cięgnie (5) wokół niego owiniętym. Korzystając z

zależności (1) wyznacza się masy obciążników, jakie powinny być wieszane na szalce w celu uzyskania określonego momentu na osi hamulca. Do mniej dokładnych pomiarów skalowanie może być przeprowadzone za pomocą używanego na tym stanowisku zbiornika z wodą.

$$M_{obr} = m_{obc}g \frac{d}{2} \quad (1)$$

gdzie:

- M_{obr} – moment obrotowy od wiszącego obciążnika [Nm],
- m_{obc} – masa obciążnika [kg],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
- d – średnica koła [m].

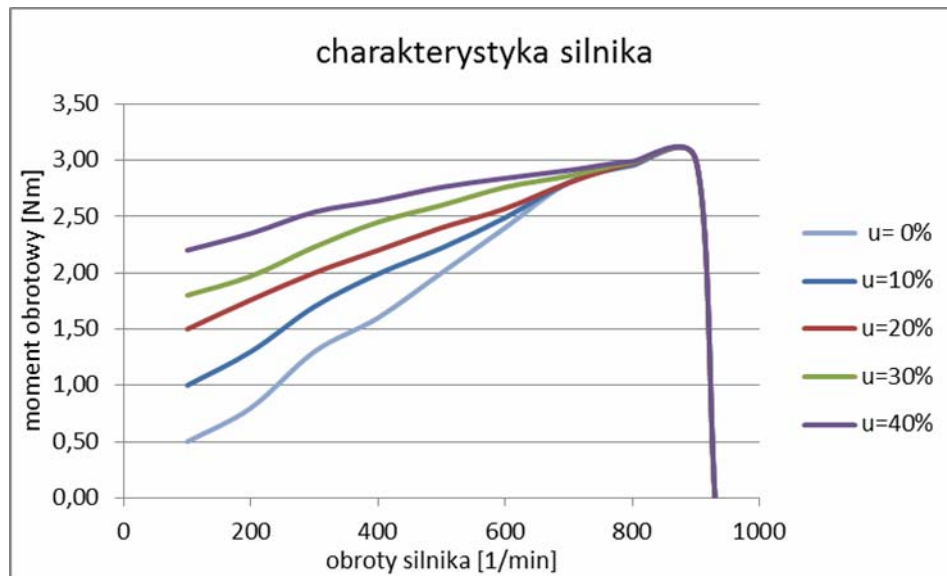
W czasie skalowania silnik powinien pracować z niewielką prędkością obrotową przy całkowicie otwartym zaworze dławiącym. Zabieg taki wynika z konieczności rozmieszczenia oleju w całym układzie, także w pompie hydraulicznej i przewodach. Przy nieruchomym silniku cały olej znajdowałby się w zbiorniku, co zmieniłoby położenie jego środka ciężkości i powstanie dodatkowego błędu pomiaru. Wskazania są zależne bowiem od poziomu oleju (dokładnie od jego masy i położenia środka ciężkości) i każda jego zmiana powoduje konieczność powtórzenia procesu skalowania. Poziom oleju zależy również od jego temperatury, która jest zmienna w trakcie pomiaru. Dlatego konieczne jest jej bieżące odczytywanie i obliczenie poprawek.

Pomiar charakterystyki mechanicznej silnika przeprowadza się w następujący sposób: 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,
- zmontować układ elektryczny zasilający silnik wraz z miernikami (prąd, napięcie, moc czynna),
- zawór dławiący ustawić w pozycji maksymalnie otwartej,
- uruchomić silnik,
- dokonać pomiaru prędkości obrotowej silnika na biegu jałowym,

- zwiększyć dławienie na zaworze dławiającym, do uzyskania określonego przyrostu momentu obrotowego (np. o 0,5 Nm),
 - zmierzyć prędkość obrotową silnika,
 - powtarzać poprzednie dwie czynności do całkowitego zamknięcia zaworu dławiającego i „utknięcia” silnika,

- zmniejszyć dławienie zaworu,
 - zmierzyć prędkość obrotową silnika,
 - powtarzać poprzednie dwie czynności do całkowitego otwarcia zaworu,
 - zatrzymać silnik,
 - wykonać wykres charakterystyki silnika $M[\text{Nm}] = f(n[1/\text{min}])$ (rys. 6).



Rys. 6. Charakterystyki silnika AC - przemiennik skalarny (opracowanie: autor)

Można także dokonać pomiaru charakterystyki silnika ustalając kolejno określone, coraz mniejsze obroty silnika i odczytując ze skali moment obrotowy im odpowiadający, następnie uzyskując poprzez stopniowe otwieranie zaworu określone, coraz większe obroty, odczytywać moment obrotowy, aż do uzyskania obrotów biegu jałowego.

Dla każdego punktu pomiarowego należy ponadto odczytać parametry elektryczne układu:

- napięcie sieci zasilającej,
- prąd pobierany z sieci zasilającej,
- moc czynną pobieraną z sieci zasilającej,
- napięcie w obwodzie pośrednim (dla przemienników AC/DC/AC),
- napięcie na zaciskach silnika (napięcie wirnika w silnikach DC),
- prąd silnika (prąd wirnika w silnikach DC).

W celu dokładnego poznania przebiegu napięcia i prądu w obwodzie silnika (wirnika w silnikach DC) należy dokonać pomiaru tych wielkości za pomocą oscyloskopu cyfrowego włączonego poprzez wzmacniacz separujący.

Powstające podczas hamowania ciepło bardzo powoli nagrzewa zgromadzony w zbiorniku olej umożliwiając przeprowadzenie długotrwałych pomiarów parametrów silnika. Zakładając, że początkowa temperatura oleju wynosi 20°C, maksymalna dopuszczalna zaś 90°C, czas pracy hamulca przy pełnej mocy silnika można obliczyć z zależności (2).

$$Pt = cm\Delta t \quad (2)$$

gdzie:

- P – moc badanego silnika - 0,67 kW,
- t – czas pomiaru [s],
- m – masa oleju – 4 kg,
- Δt – przyrost temperatury oleju - 70°C,
- c – ciepło właściwe oleju hydraulicznego – 1885 J/kgK.

Po wykonaniu obliczeń otrzymamy czas dopuszczalny czas pomiaru równy 1013 s. Jest to czas obliczony przy założeniu pracy silnika z maksymalną mocą. Ponieważ silnik nie pracuje ciągle z maksymalną mocą, olej jest ciągle chłodzony przez dużą powierzchnię zbiornika, rzeczywisty czas osiągnięcia temperatury 90°C jest znacznie dłuższy i wynosi wg badań autora około 35 minut. Pozwala to na przeprowadzenie

pełnego cyklu badań, który zajmuje około 25 minut. Autor przez wiele lat używania stanowiska w procesie dydaktycznym dla uczniów i studentów (przeprowadzenie ponad 1000 cykli badań) nie stwierdził zaistnienia przypadku konieczności przerwania badań z uwagi na zbyt wysoką temperaturę oleju. Maksymalna jej wartość wynosiła 68°C.

Procedury badań i tabele pomiarowe

Tabelę pomiarową dla rys. 6 przedstawia tabela 1. Podobne tabele tworzy się dla prądu silnika (Tab. 2), napięcia silnika (Tab. 3), prądu pobieranego z sieci (Tab. 4), napięcia w obwodzie pośrednim (Tab. 5). Podobnie jak poprzednio pomiar można prowadzić dla częstotliwości 30, 40, 60 Hz.

Tabela 1. Tabela pomiarowa $M = f(n)$ dla różnych wartości napięcia początkowego (podniesienia [%])

dla 50 Hz		obroty											
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
podn %	40	2	2,2	2,35	2,54	2,64	2,76	2,84	2,91	2,99	3	0	moment
	30	1,7	1,8	1,97	2,23	2,45	2,6	2,76	2,86	2,98	3	0	
	20	1,5	1,5	1,76	2	2,2	2,4	2,57	2,8	2,97	3	0	
	10	1	1	1,3	1,7	1,99	2,22	2,49	2,8	2,96	3	0	
	0	0,3	0,5	0,8	1,3	1,6	2	2,4	2,8	2,95	3	0	

Tabela 2. Prąd silnika – charakterystyka statyczna przy zadanym podniesieniu

dla 50 Hz		obroty											
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
podn %	40	2	2,1	2,2	2,4	2,8	3	3,5	4	3	1,8	0	prąd
	30												silnika
	20												
	10												
	0	1	1,1	1,3	1,8	2,4	2,8	3,1	4	3	1,8	0	

Tabela 3. Napięcie silnika – charakterystyka statyczna przy zadanym podniesieniu

dla 50 Hz		obroty											
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
podn %	40	2	2,1	2,2	2,4	2,8	3	3,5	4	3	1,8	0	prąd z sieci
	30												
	20												
	10												
	0	1	1,1	1,3	1,8	2,4	2,8	3,1	4	3	1,8	0	

Tabela 4. Prąd pobierany z sieci – charakterystyka statyczna przy zadanym podniesieniu

dla 50 Hz		obroty											
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
podn %	40	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	napięcie op
	30												
	20												
	10												
	0	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	

Tabela 5. Napięcie w obwodzie pośrednim – charakterystyka statyczna przy zadanym podniesieniu

dla 50 Hz		obroty											
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
podn %	40	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	napięcie
	30												silnika
	20												
	10												
	0	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	

Koło zamachowe – cel i sposób pomiaru parametrów dynamicznych napędu

Koło zamachowe (rys. 2) osadzone jest na wale silnika za pomocą piasty. Umożliwia pomiar możliwego do uzyskania przyspieszenia i opóźnienia kąowego dla danej konfiguracji układu napędowego, jak również pozwala zbadać działanie energoelektronicznego modułu hamowania dla przemienników z obwodem pośrednim i pracę hamulcową przekształtników czterokwadrantowych. Możliwe jest także przeprowadzenie pomiarów charakterystyk prądowych przy rozpędzaniu i hamowaniu mas wirujących. Pomiar przeprowadzany jest w celu zbadania zdolności napędu do przeprowadzenia rozruchu i wybiegu wg zadanej rampy czasowej z określonym zapasem bezpieczeństwa. Parametry jakie mają wpływ na zdolność napędu do rozruchu i zatrzymania maszyny roboczej w zadanym czasie (według zadanej rampy) dla danej częstotliwości roboczej (przełączniki AC/AC) są następujące:

- czas rozruchu - ustawiany przez użytkownika,
- czas zatrzymania (wybiegu) – ustawiamy przez użytkownika w określonym zakresie, możliwe jest także swobodne zatrzymanie napędu,
- charakterystyka u/f (liniowa lub kwadratowa) – ustawiana przez użytkownika,
- podniesienie U_{min} – ustawiane przez użytkownika,
- włączenie lub wyłączenie rezystora hamowania w obwodzie pośrednim - realizowane przez użytkownika sprzętowo lub programowo,
- oddawanie energii do sieci przy hamowaniu – zależy od możliwości przemiennika w tym zakresie,

- adaptacja rampy – parametr pozwalający przemiennikowi na wydłużenie czasu zatrzymania przy niemożności osiągnięcia zadanego. Jeżeli użytkownik nie zezwoli na adaptację rampy nastąpi w takim przypadku wyłączenie napędu z sygnalizacją błędu i silnik zatrzyma się w trybie swobodnego wybiegu,

- częstotliwość, przy której następuje włączenie hamowania GSB. Parametrem takiego trybu hamowania jest wartość napięcia na silniku, nie zaś czas.

Dla przekształtników AC/DC parametry będą następujące:

- czas rozruchu - ustawiany przez użytkownika,
- czas zatrzymania (wybiegu) – ustawiany przez użytkownika w określonym zakresie, możliwe jest także swobodne zatrzymanie napędu,
- ograniczenie prądowe prądu w obwodzie wirnika.

Jak wspomniano wcześniej, czas rozruchu i wybiegu jest bardzo ważnym parametrem napędowym dla wielu napędzanych przez silniki elektryczne maszyn roboczych. W celu poznania wpływu poszczególnych, wyżej wyszczególnionych parametrów na pracę napędu konieczne jest przeprowadzenie następujących badań:

- Zdolności napędu do rozruchu w zadanym czasie. Polega ono na programowaniu coraz krótszych czasów rozruchu przy danej konfiguracji innych parametrów i obserwacji czasu rzeczywistego. Szczególny wpływ ma tutaj (silniki AC) podniesienie U_{min} . – napięcie jakie pojawia się na zaciskach silnika przy $f = 0$ i dalej rosnące liniowo lub kwadratowo do znamionowego. Moment obrotowy silnika jest funkcją napięcia na jego zaciskach, a jak wynika z równania napędu, od momentu obrotowego (w tym przypadku

zmiennego w czasie) zależy czas rozpędzania (rozruchu) maszyny roboczej.

- Zdolności napędu do zatrzymania maszyny roboczej w zadanym czasie. Tutaj sytuacja jest bardziej skomplikowana, ponieważ o ile przy rozruchu adaptacja rampy jest niejako zawsze włączona (czas rozruchu maszyny może się wydłużyć w przypadku niemożliwości wytworzenia przez silnik koniecznego momentu obrotowego), w przypadku hamowania z powodu problemu z przetworzeniem energii kinetycznej mas wirujących mogą zachodzić różne przypadki. Należy mieć także na uwadze oszczędność energii – np. zbyt wczesne włączenie hamowania GSB powoduje wprawdzie zatrzymanie napędu w zadanym czasie, ale wiąże się z dużym poborem energii z sieci i dodatkowo koniecznością dodatkowego chłodzenia silnika. Użycie w takim przypadku hamulca energoelektronicznego – choppera – powoduje zamianę energii na ciepło wydzielające się na jego radiatorze, z sieci nie jest pobierana w tym przypadku praktycznie żadna energia. Najkorzystniejsze jest użycie przemiennika z możliwością odzysku energii (jej zwrotu) do sieci. Wszystkie te przypadki wymagają odpowiedniego zaprogramowania przemiennika. Oczywiście priorytetem są własności ruchowe napędu, aczkolwiek czynnik ekonomiczny jest także ważny. Badanie polega, podobnie jak przy rozruchu na programowaniu coraz krótszych czasów wybiegu dla danej konfiguracji napędu i obserwacji czasów rzeczywistych i reakcji napędu. W przypadku przekształtnika AC/DC mamy do czynienia z mniejszą ilością parametrów. Praktycznie w procesie nastawiania (programowania) parametrów możliwe jest operowanie czasem rozruchu i wybiegu i ograniczeniem prądu wirnika. Procedura przebiegu badań jest analogiczna. Możliwość zwrotu energii do sieci zasilającej oraz hamowania zatrzymanego wału zależy od możliwości konkretnego przemiennika.

Przykładowe tabele i wykresy

Na rys. 7 i 8 przedstawiono wyniki pomiaru czasu rozruchu do zadanej prędkości obrotowej koła zamachowego dla różnych napięć początkowych (podniesień w %) z włączoną i wyłączoną funkcją Autobost. Zauważyć można różną zależność czasu osiągnięcia zadanej prędkości obrotowej od zaprogramowanego

podniesienia dla włączonej jak i wyłączonej funkcji.

Zespół do badania napędu przy bezruchu, rozruchu i hamowaniu, charakterystyki przejściowe, przejście od zatrzymanego wału do ruchu, napęd dwukwadrantowy

Osadzony na wale silnika bęben linowy (ciągnowy), na który nawinięta jest linka obciążona szalką z odważnikami lub pojemnik z cieczą (rys. 3), umożliwia prowadzenie pomiarów przejścia: bezruch – ruch – napęd – hamowanie przy małych prędkościach obrotowych silnika. Do takich badań należą:

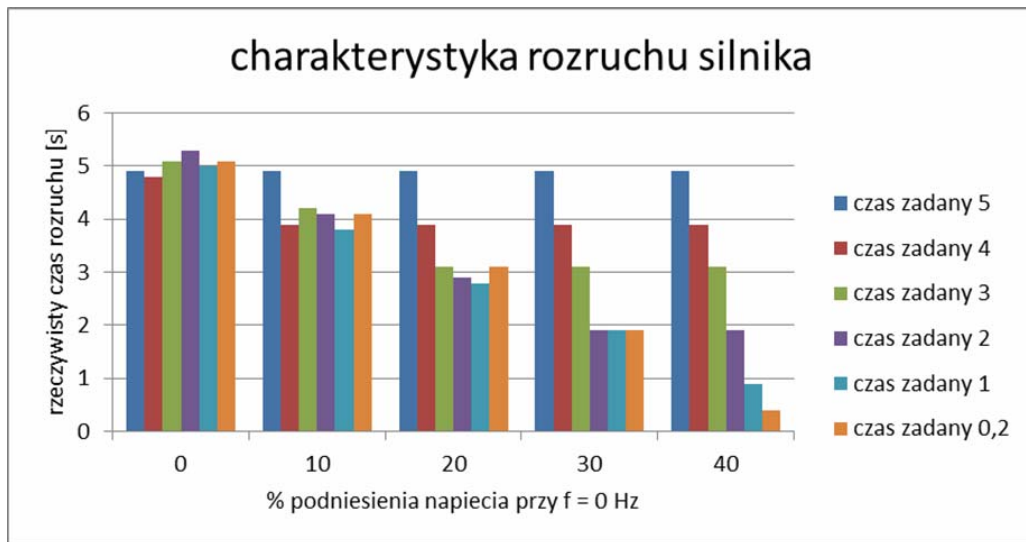
- badanie momentu hamowania przy zahamowanym wale silnika (hamowanie GSB),
- badanie stanu przejściowego: rozruch – przejście od zahamowanego wału silnika (GSB) do ruchu w górę (dodatni moment obrotowy) – obserwacja zjawiska „rollbacku”,
- badanie stanu przejściowego: rozruch – przejście od zahamowanego wału silnika (GSB) do ruchu w dół (ujemny moment obrotowy) – obserwacja zjawiska „rollbacku”,
- badanie stanu przejściowego: zatrzymanie – przejście od ruchu w górę (dodatni moment obrotowy) do zatrzymania i hamowania GSB,
- badanie stanu przejściowego: zatrzymanie – przejście od ruchu w dół (ujemny moment obrotowy) do zatrzymania i hamowania GSB.

Badanie momentu hamowania zatrzymanego wału bada się obciążając linkę poprzez zwiększanie ilości wody w zawieszonym zbiorniku. Po zauważeniu obracania się wału silnika pod obciążeniem należy dokonać zważenia pojemnika z wodą na wadze laboratoryjnej i wyznaczyć moment hamowania dla zadanego poziomu napięcia hamującego na uzwojeniach silnika.

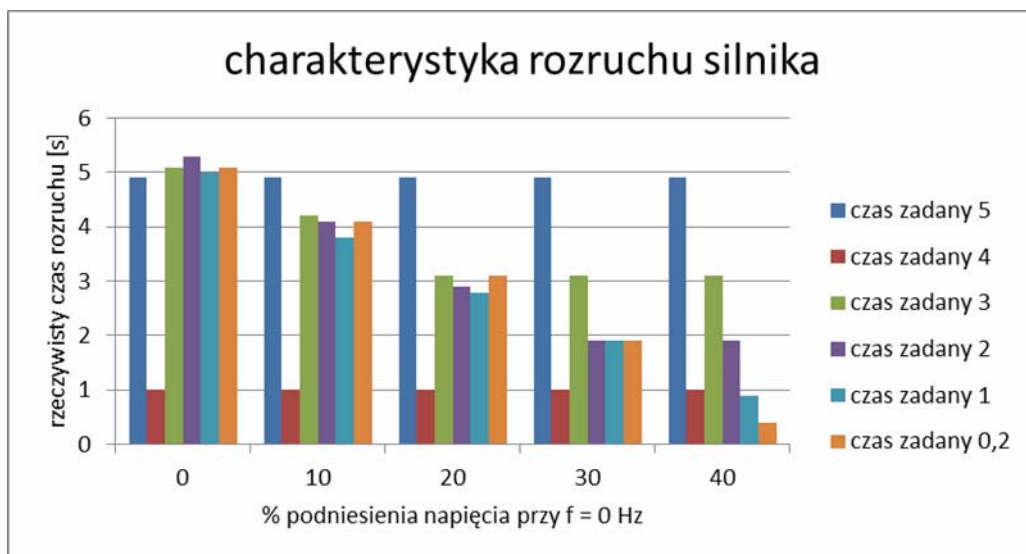
Przejście zatrzymanie – ruch badane jest za pomocą wiszącego na cięgnie pojemnika z wodą lub szalki z ciężarkami w następujący sposób: Ustala się obciążenie wału w wysokości odpowiadającej na rys. 9 linii *a*. Linia *b* przedstawia moment rozwijany przez silnik podczas rozruchu i pracy. Linia *c* przedstawia moment hamowania zatrzymanego wału (GSB). Wszystkie wielkości przedstawione są jako przeliczone na napięcie na zaciskach silnika, jakie wytwarza

przebiegiem. Ćwiczenie polega na takim doborze parametrów, aby przejście od stanu zatrzymania do ruchu przy podnoszeniu i opuszczaniu pojemnika z wodą odbywało się płynnie, bez zjawiska „rollbacku”, czyli niekontrolowanego opadania wiszącego ciężaru. Następuje ono w przypadku, kiedy początkowy moment obrotowy wytwarzany przez silnik jest mniejszy od statycznego obciążenia napędu (silnika) np. wiszącym na

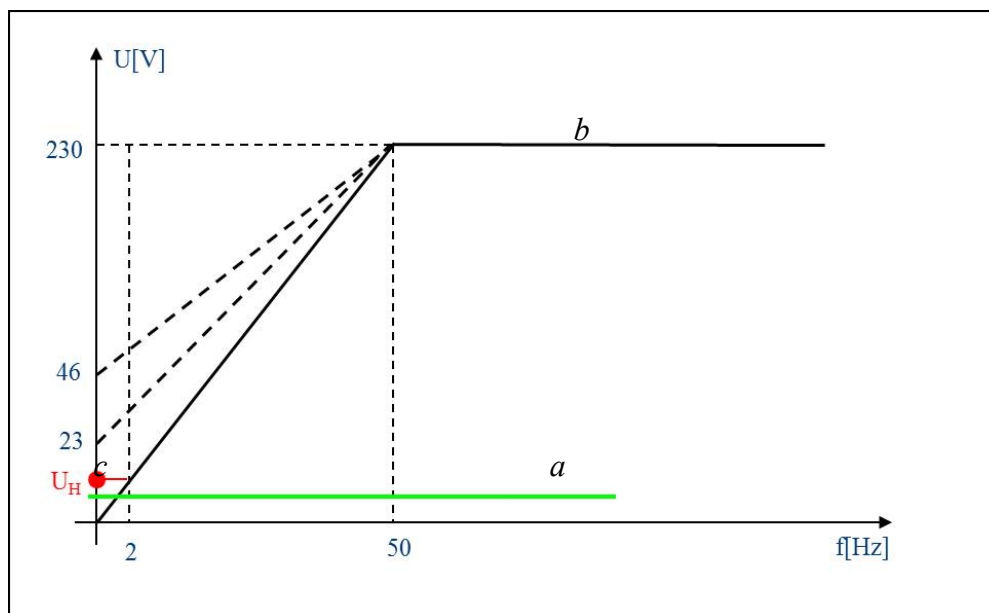
zawiesiu żurawia budowlanego elementem budowlanym. Do czasu wytworzenia przez silnik odpowiedniego momentu obrotowego wiszący ciężar w takim przypadku opada, powodując zagrożenia na placu budowy. Z rysunku wynika, że zaprogramowanie podniesienia w wysokości 10 % (23 V przy 0 Hz) powoduje wyeliminowanie w/w opisanego negatywnego zjawiska.



Rys. 7. Pomiar czasu rozruchu przy wyłączonej funkcji Autobost



Rys. 8. Pomiar czasu rozruchu przy włączonej funkcji Autobost



Rys. 9. Przejście zatrzymanie – ruch (opracowanie: autor)

Uwagi końcowe

Jak wynika z przedstawionego opisu badań, oraz porównania z innymi sposobami prowadzenia pomiarów charakterystyk silników elektrycznych, opisane stanowisko umożliwia kompleksowe prowadzenie pomiaru charakterystyk silników elektrycznych prądu stałego i przemiennego, w tym w szczególności zasilanych z energoelektronicznych urządzeń zasilających w zakresie:

- Charakterystyk $M=f(n)$ dla różnych konfiguracji przemiennika lub przekształtnika (charakterystyka napędowa maszyn roboczych zredukowanych do obliczeniowego momentu oporowego),
- Charakterystyk rozpędzania i hamowania maszyn roboczych (napędzanych) po ich zredukowaniu do obliczeniowego momentu bezwładności,
- Charakterystyk hamowania GSB (hamowanie prądem stałym - niem. Gleichstrombremsung),
- Charakterystyk przejściowych napęd – hamowanie – bezruch – napęd - hamowanie.

Obecnie w procesie nauczania przedmiotów zawodowych zauważyć można tendencję do zastępowania rzeczywistych stanowisk laboratoryjnych symulacjami z wykorzystaniem programów komputerowych, min. Matlab Simulink. Powinny one być jednak tylko

uzupełnieniem procesu prowadzonego na maksymalnie zbliżonych do rzeczywistych obiektów stanowiskach pomiarowych. Inną tendencją są stanowiska całkowicie zautomatyzowane, które samoczynnie wykonują często bardzo skomplikowane badania, a jedyną rolą ucznia/studenta jest obserwacja i wykonywanie poleceń komputera. Często końcowe sprawozdanie jest niestety także wykonywane automatycznie. Wartość takiego procesu dydaktycznego, jak wynika z ponad 20 letniego doświadczenia autora w prowadzeniu pracowni elektrycznej, jest niewielka. Uczeń/student nie wykonując praktycznie wszystkich czynności nie poznaje i nie rozumie wielu zależności i wzajemnych wpływów, „nie czuje” zachodzących zjawisk. Opisane stanowisko umożliwia poprzez całkowicie odmienną koncepcję budowy - w której ćwiczący ma wpływ na wszystko - sprawne prowadzenie procesu dydaktycznego programowania parametrów ruchowych przemienników częstotliwości i przekształtników. Wpływ poszczególnych parametrów na własności ruchowe napędu jest możliwy do natychmiastowego zaobserwowania przez ucznia/studenta. Prosta budowa stanowiska, bezpośrednio obserwacji, możliwość kompleksowego badania napędów w zakresie charakterystyk statycznych i dynamicznych, jak również pracy przy małych prędkościach w trybie bezruch – ruch – napęd –

hamowanie czynią je bardzo przydatnym w procesie dydaktycznym w szkolnictwie ponadgimnazjalnym jak również wyższych uczelniach.

Bibliografia

1. Goźlińska E., *Maszyny elektryczne*, WSiP, Warszawa 1995.
2. Koczara W., *Wprowadzenie do napędu elektrycznego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
3. Bonisławski M., *Sterowane obciążenie energoelektroniczne pomocne przy badaniu napędów elektrycznych*, PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 246, 2010, s. 85-96.
4. Kolano K., Kolano J., *Problemy rozruchu układów napędowych współczesnych dźwigów osobowych z silnikiem indukcyjnym*, Zeszyty Problemowe, Maszyny Elektryczne, Nr 82/2009, s. 7-12.
5. Knapczyk M., Pieńkowski K., *Analiza sterowania wektorowego napędem indukcyjnym z przekształtnikiem dwustronnym AC/DC/AC w stanach pracy silnikowej i hamowania odzyskowego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały, Vol 58, Nr 25/2005, s. 369-380.
6. Przemienniki serii 8200 – Instrukcja użytkowania, Lumel S.A. 1996.
7. Przemienniki częstotliwości serii 650V – Eurothrm Drives Limited 2003.
8. Przekształtnik Rectivar 4 – Telemecanique 1995.