

doi:10.15199/48.2020.04.40

Identyfikacja parametrów napędu PMSM na stanowisku do badania algorytmów komutacji napędów bezpośrednich

Streszczenie. W artykule opisano podstawowe parametry napędu PMSM, w skład których wchodzi: rezystancja uzwojeń, indukcyjności w osiach d-q (L_d , L_q), stała elektromotoryczna silnika k_e oraz stała momentowa k_t . Wyznaczenie parametrów silnika zostało przeprowadzone na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym opisanym w jednym z głównych rozdziałów artykułu. Ponadto w artykule zawarto dokładny opis procedur wyznaczania omawianych parametrów elektrycznych silnika, wraz z zestawieniem wyników badań eksperymentalnych.

Abstract. The article describes the basic parameters of PMSM motor, which include: stator winding resistance, inductances (L_d , L_q), motor electrical constant k_e , and torque constant k_t . Motors' parameters determination was carried out on specially designed test bench described in one of the main chapters of the article. In addition, the article contains a detailed description of the procedures for determining the electric parameters of the motor, along with the summary of experimental research results. (**Identification of PMSM motor's parameters at the bench for direct drives' commutation algorithms study**).

Słowa kluczowe: napędy bezpośrednie, identyfikacja parametrów, parametry elektryczne, PMSM.

Keywords: direct drives, parameters identification, electrical parameters, PMSM.

Wstęp

Silniki typu synchronicznego z magnesami trwałymi (ang. Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM) mają obecnie duże znaczenie w projektowaniu mechatronicznym [1], [2], [3], [4]. Szeroki zakres wykorzystywania napędów w różnego rodzaju aplikacjach, spowodował dużą różnorodność konstrukcyjną pod względem budowy mechanicznej oraz parametrów magnetycznych i elektrycznych silników. Wspólną cechą konstrukcyjną tego typu silników jest zastosowanie magnesów trwałych w budowie wirnika oraz stojan wytwarzający wirujące pole magnetyczne. Dokładna znajomość parametrów elektrycznych silników PMSM ma duży wpływ na efektywność opracowywanych i implementowanych algorytmów komutacji opartych na modelu.

Jednym z problemów wpływających na powtarzalność sterowania napędami są różnice pomiędzy wartościami rzeczywistymi parametrów silnika, a parametrami katalogowymi, które wynikają z rozrzutu w procesie technologicznym (produkcyjnym) np. magnesów trwałych wykorzystanych do budowy silnika.

Do podstawowych parametrów elektrycznych silników synchronicznych z magnesami trwałymi można zaliczyć: międzyfazową rezystancję uzwojeń stojana, indukcyjności w osiach d-q (L_d i L_q), stałą momentową (k_t) oraz stałą elektromotoryczną (k_e), zwaną także stałą prędkościową. Najczęściej, w modelach, indukcyjności L_d i L_q są przyjmowane jako stałe, równe co do wartości, obliczane w sposób pośredni poprzez znajomość rezystancji i elektrycznej stałej czasowej (podawanych w dokumentacji technicznej silników, np. [5]). W innych przypadkach (dla których: $L_q \neq L_d$), im większą wartością ilorazu L_q/L_d charakteryzuje się dana konstrukcja, tym większa jest wartość składowej reluktancyjnej momentu elektromagnetycznego i tym samym całkowity moment elektromagnetyczny silnika [6].

Wartość stałej momentowej można oszacować jako stosunek maksymalnego momentu ciągłego (lub szczytowego) do wartości maksymalnego prądu ciągłego (lub szczytowego). Natomiast, stała elektromotoryczna jest stosunkiem amplitudy napięcia międzyfazowego do prędkości nieobciążonego silnika. Parametr ten wyznacza się poprzez linearyzację charakterystyki $U(\omega_r)$ nieobciążonego napędu. Stała elektromotoryczna wykorzystywana jest do obliczania maksymalnej prędkości

obrotowej silnika dla danego napięcia zasilania lub określenia minimalnego napięcia zasilania falownika dla uzyskania maksymalnej żądanej prędkości obrotowej. Większość metod spotykanych w literaturze [7],[8],[9], przeznaczonych do wyznaczania parametrów silnika, wykorzystuje skomplikowane algorytmy. Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych potwierdzają, że niektóre parametry (ogólnie w literaturze przyjmowane jako stałe) mogą zależeć np. od prądu płynącego przez uzwojenia silnika [9].

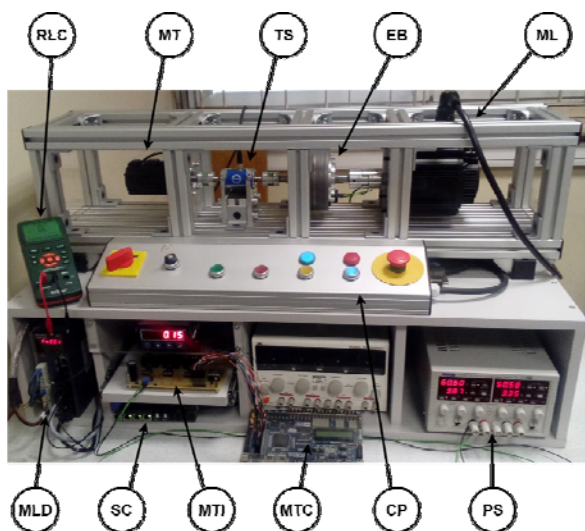
Dokładna znajomość wartości parametrów silnika otrzymanych poprzez identyfikację, pozwala na opracowanie dokładniejszego modelu silnika i wykorzystanie go w układzie komutacji, co przekłada się na dokładność pozycjonowania, utrzymywanie prędkości czy fluktuację wytwarzanego momentu.

Stanowisko do badania algorytmów komutacji napędów bezpośrednich

W celu identyfikacji parametrów napędu PMSM EMJ-04APB22 firmy Estun wykorzystano stanowisko badawcze zaprojektowane do badania algorytmów komutacji elektronicznej napędów bezpośrednich widoczne na rysunku 1.

Część mechaniczna stanowiska jest zbudowana w sposób modułowy, co umożliwiła szybką zmianę jej konfiguracji i łatwe dostosowanie do potrzeb aktualnie prowadzonych badań. Uzyskuje się to poprzez dodanie, usunięcie lub wymianę elementów składowych stanowiska. Podstawowymi elementami stanowiska są: zasilacz laboratoryjny (**PS**), czujnik momentu (**TS**), napęd elektryczny ze sterownikiem stanowiący obciążenie (**ML** i **MLD**), hamulec elektryczny (**EB**), panel operatorski (**CP**), stopień mocy badanego napędu (**MTI**) wraz z jego układem komutacji elektronicznej zaimplementowanym w układzie FPGA (ang. Field Programmable Gate Array) (**MTC**) oraz sterownik stanowiska (**SC**).

Zasilacz laboratoryjny (**PS**) jest przeznaczony do zasilania stopnia mocy **MTI**. Posiada dwa niezależne (izolowane galwanicznie) kanały, dzięki czemu możliwe jest osiągnięcie napięcia stałego do 120 V lub maksymalnego prądu do 40 A. Dodatkowo zasilacz, posiada cyfrowe interfejsy komunikacyjne (RS-232, USB, wejścia i wyjścia cyfrowe w standardzie napięciowym TTL) przeznaczone do zdalnego sterowania, zapisu i odczytu parametrów pracy.



Rys.1. Stanowisko do badania algorytmów komutacji napędów bezpośrednich: **RLC** – Mostek RLC; **MT** – badany napęd PMSM; **TS** – czujnik momentu siły; **EB** – hamulec elektryczny; **ML** – napęd stanowiący obciążenie dla badanego silnika; **MLD** – sterownik napędu **ML**; **SC** – sterownik stanowiska; **MTI** – stopień mocy dla napędu **MT**; **MTC** – komutator elektroniczny dla stopnia mocy **MTI** zaimplementowany w układzie FPGA; **CP** – panel sterowania; **PS** – zasilacz laboratoryjny

Drugim elementem stanowiska jest czujnik momentu (**TS**), przeznaczony do pomiaru momentu obrotowego przenoszonego pomiędzy testowanym napędem (**MT**) a obciążeniem, które stanowi napęd **ML** lub hamulec elektryczny (**EB**). Generuje on sygnał analogowy w zakresie 0,5 – 4,5 V proporcjonalny do momentu obciążenia. Stanowisko wyposażone jest w trzy czujniki o zakresach: $\pm 2,5$ Nm, $\pm 7,5$ Nm oraz $\pm 17,5$ Nm montowane w zależności od maksymalnego momentu generowanego przez testowany napęd (**MT**). Czujnik pozwala na pomiar przy prędkości obrotowej od 0 do 5000 obr/min a jego pasmo wynosi 1 kHz. Deklarowana przez producenta dokładność wynosi poniżej 0,5%, a powtarzalność wynosi poniżej 0,1% pełnego zakresu pomiarowego. Dzięki zastosowaniu niezależnego czujnika momentu możliwy jest pomiar momentu obrotowego generowanego przez badany silnik z wysoką dokładnością.



Rys.2. Sterownik stanowiska do badania algorytmów komutacji napędów bezpośrednich

Kolejnym elementem stanowiska jest napęd elektryczny typu PMSM o mocy 1,1 kW (**ML**) wraz ze sterownikiem (**MLD**). Głównym ich zadaniem jest generowanie

statycznego i dynamicznego momentu będącego obciążeniem dla testowanego napędu i/lub stopnia mocy. Maksymalny ciągły moment obrotowy dla tego silnika wynosi 4,78 Nm (moment chwilowy 14,3 Nm) a prędkość znamionowa 3000 obr/min. Układ może pracować w pętli sterowania: momentowej, prędkościowej oraz pozycyjnej, dzięki czemu może być wykorzystywany w szerokim zakresie badań i eksperymentów.

W celu wygenerowania momentu obciążenia dla testowanego napędu można także wykorzystać wbudowany w stanowisko proszkowy hamulec elektryczny (**EB**) o momencie hamowania do 15 Nm. Zadany moment obciążenia jest proporcjonalny do prądu zasilającego uzwojenia hamulca, dzięki czemu możliwa jest płynna jego regulacja. Hamulec wykorzystywany jest także w statycznych próbach i eksperymentach.

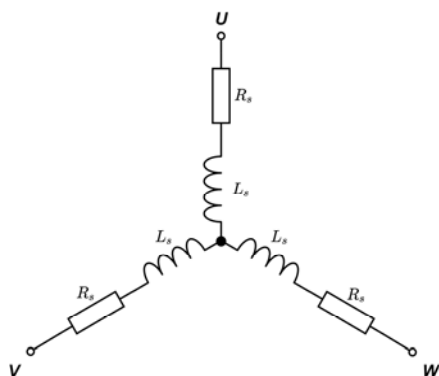
Ostatnim elementem stałym stanowiska jest jego sterownik (**SC**), który składa się z dwóch części: modułu Terasic DE0-Nano z układem FPGA z rodziny Cyclone IV firmy Altera oraz obwodu drukowanego PCB (ang. Printed Circuit Board), stanowiącego interfejs z układami peryferyjnymi stanowiska. Do głównych zadań sterownika widocznego na rysunku 2 należą:

- pomiar sygnału analogowego z czujnika momentu oraz jego konwersja poprzez wbudowany 16-bitowy przetwornik ADC (ang. Analog to Digital Converter);
- generowanie sygnału analogowego w standardzie ± 10 V stanowiącego wartość zadanej momentu obciążenia dla sterownika napędu **ML**, poprzez wbudowany 16-bitowy przetwornik DAC (ang. Digital to Analog Converter);
- komunikacja ze sterownikiem **MLD** poprzez szeregowy interfejs RS-485 oraz cyfrowe porty wejścia i wyjścia;
- komunikacja z komputerem PC poprzez port szeregowy, co umożliwia: zadawanie i odczyt parametrów oraz akwizycję danych pomiarowych (np. prędkość, pozycja wału, sygnał z czujnika momentu);
- komunikacja z panelem operatorskim (np. zmiana trybu pracy, rozpoczęcie i zatrzymanie pomiaru, sygnalizacja błędów i awarii);
- generowanie przebiegów wartości zadanej (pozycji, prędkości lub momentu) oraz zadanego momentu obciążenia i hamowania, poprzez zaimplementowany generator przebiegów;
- pomiar aktualnej pozycji kątowej wału na podstawie sygnałów generowanych przez sterownik **MLD** w standardzie RS-422;
- pomiar temperatury z czterech niezależnych kanałów (np. na stopniu mocy, napędzie, hamulcu).

Dodatkowymi elementami stanowiska są: miernik cyfrowy RLC LCR200 firmy Extech pozwalający wyznaczyć rezystancje i indukcyjności uzwojeń stojana oraz czterokanałowy, cyfrowy oscyloskop MSO7054B firmy Agilent Technologies.

Wyznaczanie parametrów elektrycznych napędu PMSM

Rezystancja uzwojenia stojana R_s jest zwykle definiowana jako rezystancja między zaciskiem fazowym a punktem neutralnym uzwojeń. Z powodu występowania zależności rezystancji uzwojeń od temperatury, zwykle wartość oporu jest podawana dla temperatury 25 °C. Pomiaru rezystancji uzwojeń można dokonać mostkiem RLC poprzez pomiar rezystancji międzyfazowej (pomiar między punktami U i V, U i W lub V i W) zgodnie ze schematem zastępczym uzwojeń stojana widocznym na rysunku 3. W dokumentacji technicznej napędów podawana jest zwykle rezystancja międzyfazowa lub fazowa (wtedy zmierzoną wartość należy podzielić przez 2).



Rys.3. Schemat zastępczy uzwojeń stojana napędu PMSM

Na rysunku 4 przedstawiony jest schemat elektryczny silnika PMSM we współrzędnych wirnika (d,q). Zależności opisujące napęd we współrzędnych (d, q), przedstawiają równania:

$$(1) \quad u_d = i_d R_s + L_d \frac{d}{dt} i_d - L_q \omega_e i_q$$

$$(2) \quad u_q = i_q R_s + L_q \frac{d}{dt} i_q + L_d \omega_e i_d + \psi_{PM} \omega_e$$

$$(3) \quad T_e = \frac{3}{2} p [\psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

$$(4) \quad k_e = p \psi_{PM}$$

$$(5) \quad k_t = \frac{3}{2} p \psi_{PM}$$

gdzie: u_d, u_q – napięcia stojana we współrzędnych wirnika, i_d, i_q – prądy stojana we współrzędnych wirnika, L_d, L_q – indukcyjności w osiach d-q, ψ_{PM} – strumień magnetyczny od magnesów trwałych, k_e – stała elektromotoryczna, ω_e – elektryczna prędkość kątowna, T_e – moment siły generowany przez napęd, p – liczba par biegunów, k_t – stała momentowa.

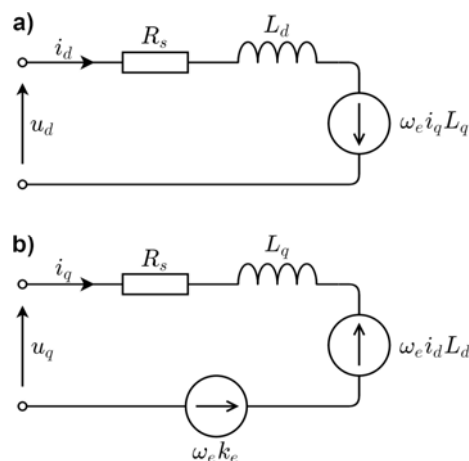
Indukcyjności w osiach d-q (L_d oraz L_q) są w modelach matematycznych napędów przyjmowane jako stałe i wyznaczone w statycznym stanie pracy silnika, przy niewielkich wartościach prądów. Jednak badania eksperymentalne pokazują istotne zmiany wartości indukcyjności (szczególnie L_d) w funkcji prądu [9]. Parametry obwodów magnetycznych ulegają zmianom wraz ze wzrostem prądu [10], dlatego też wartości indukcyjności L_d oraz L_q nie są stałe w całym zakresie pracy napędu. Ma to mniejsze znaczenie dla składowej L_d ponieważ wartość składowej i_d prądu stojana utrzymywana jest jako 0 lub jej wartość jest niewielka w stosunku do składowej i_q , w zależności od przyjętej strategii sterowania. Dla przyjętego modelu matematycznego napędu, indukcyjności L_d oraz L_q zostały wyznaczone jako stałe, pomijając wpływ zmiany indukcyjności w funkcji prądu.

Dla zerowej prędkości kątownej ($\omega_e = 0$) schematy zastępcze napędu PMSM we współrzędnych wirnika (rys. 4) upraszczają się do obwodów RL dla każdej ze składowych (d i q). Wyznaczenie indukcyjności podłużnej (L_d) i porzecznej (L_q) może być osiągnięte poprzez zbadanie odpowiedzi prądowej obwodów rezystancyjno-indukcyjnych na wymuszenie w postaci napięciowego skoku

jednostkowego. Odpowiedź taka ma charakter inercyjny z czasem narastania zależnym od stałej czasowej obwodu RL, zgodnie z równaniem:

$$(6) \quad i(t) = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

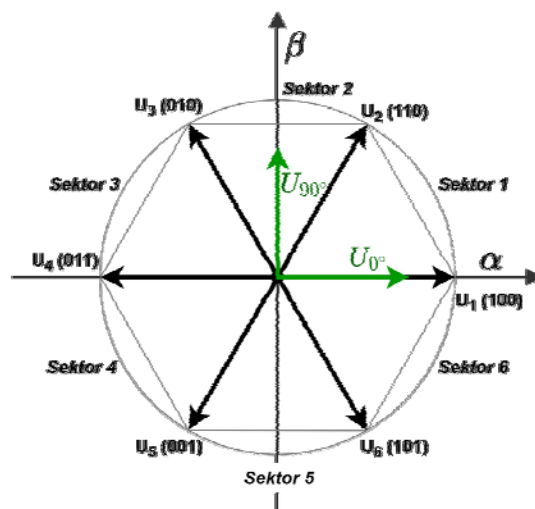
gdzie: $i(t)$ – prąd obwodu RL, V – amplituda napięcia, R – rezystancja obwodu RL, τ – stała czasowa obwodu RL.



Rys.4. Schemat elektryczny napędu PSMS we współrzędnych wirnika (d, q): a) schemat dla osi d, b) schemat dla osi q

Pomiar elektrycznej stałej czasowej dla takiej odpowiedzi wraz ze znajomością rezystancji uzwojeń pozwala na wyznaczenie wartości indukcyjności podłużnej i poprzecznej uzwojeń stojana.

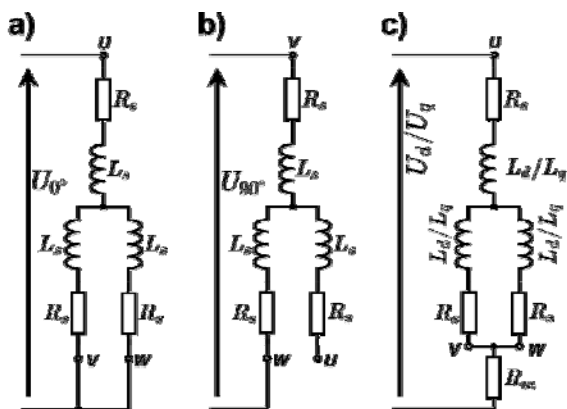
W celu wyznaczenia indukcyjności L_d wymuszono ustawienie się wirnika nieobciążonego napędu w pozycji 0° elektrycznych (rys. 5). Można to osiągnąć wykorzystując zasilacz laboratoryjny (PS), poprzez podanie wektora napięcia U_{0° (faza U – podłączona do górnej szyny zasilającej zasilacza, fazy V i W podłączone do dolnej szyny zasilającej) zgodnie ze schematem z rysunku 6a.



Rys.5. Rozmieszczenie wektorów przestrzennych napięć we współrzędnych stojana (α, β)

Amplitudę wektora U_{0° dobrano tak aby przez uzwojenia napędu popłynął maksymalny prąd ciągły. Spowodowało to powstanie momentu siły, który ustawił wirnik blisko pozycji 0° elektrycznych. Następnie wirnik został zablokowany przy

pomocy hamulca, a pomiędzy dolną szynę zasilającą zasilacza laboratoryjnego a połączone wyprowadzenia uzwojeń V i W wpięto rezystor pomiarowy (R_m) o wartości 1Ω , zgodnie ze schematem z rysunku 6c. Pomiar napięcia na rezystorze umożliwia rejestrację przebiegu prądu płynącego przez uzwojenia stojana.



Rys.6. Konfiguracje podłączeń napędu PMSM do wyznaczenia indukcyjności w osiach d-q: a) ustawienie wirnika w położeniu 0° elektrycznych, b) ustawienie wirnika w położeniu 90° elektrycznych, c) schemat układu pomiarowego

Wyznaczenia indukcyjności L_d dokonano poprzez zbadanie odpowiedzi prądowej obwodu przedstawionego na rysunku 6c, na wymuszenie w postaci napięciowego skoku jednostkowego. Amplitudę napięcia dobrano tak aby przez uzwojenia stojana popłynął prąd równy 10%, 15% oraz 20% maksymalnego prądu ciągłego. Następnie wyniki te zostały uśrednione. Zarejestrowane przebiegi napięcia i prądu (rys. 7) w formacie pliku csv zostały zaimportowane do środowiska Matlab i poddane filtracji dolnoprzepustowej w celu usunięcia szumów i zakłóceń wysokoczęstotliwościowych z sygnałów napięcia i prądu (rys. 8). Tak otrzymane wyniki stanowiły podstawę do wyznaczenia stałej czasowej odvodu pomiarowego (rys. 6c). Zależności pomiędzy wartościami elementów obwodu pomiarowego a wyznaczoną stałą czasową (obwodu pomiarowego) przedstawiają równania:

$$(7) \quad R_z = \frac{3}{2} R_s + R_m$$

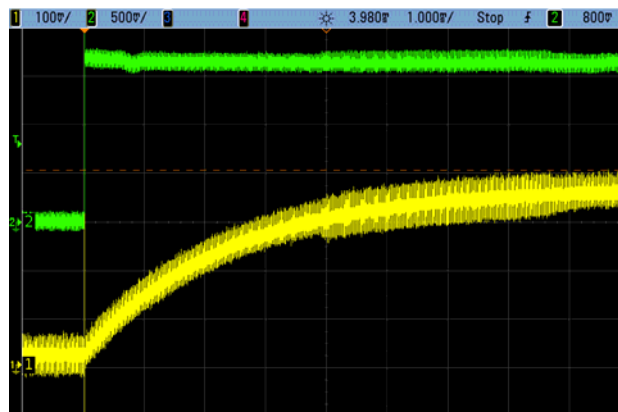
$$(8) \quad L_z = \frac{3}{2} L_d$$

$$(9) \quad \tau_z = \frac{L_z}{R_z}$$

$$(10) \quad L_d = \frac{2}{3} L_z = \frac{2}{3} \left(\tau_z \left(\frac{3}{2} R_s + R_m \right) \right)$$

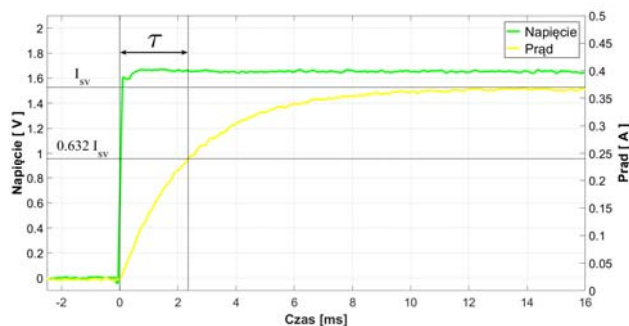
$$(11) \quad L_q = \frac{2}{3} L_z = \frac{2}{3} \left(\tau_z \left(\frac{3}{2} R_s + R_m \right) \right)$$

gdzie: R_m – rezystancja rezystora pomiarowego, L_d , L_q – indukcyjności w osiach d-q, R_z – rezystancja zastępcza obwodu pomiarowego, L_z – indukcyjność zastępcza obwodu pomiarowego, τ_z – zastępcza elektryczna stała czasowa obwodu pomiarowego.

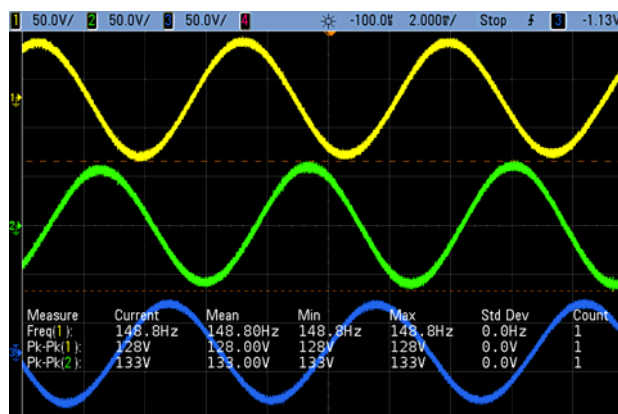


Rys.7. Odpowiedź układu na wymuszenie w postaci skokowej zmiany napięcia przy wyznaczaniu indukcyjności L_d

Analogiczną procedurę wyznaczenia wartości indukcyjności dokonano dla składowej L_q . W tym celu wymuszono ustawienie się wirnika nieobciążonego napędu w pozycji 90° elektrycznych (rys. 5), poprzez podanie wektora napięcia U_{90° (faza V – podłączona do górnej szyny zasilającej zasilacza, faza W podłączona do dolnej szyny zasilającej, faza U - niepodłączona) zgodnie ze schematem z rysunku 6b.



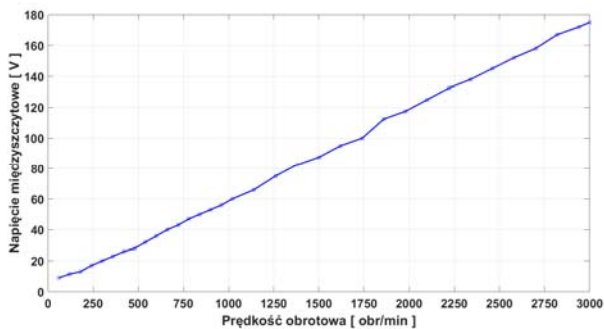
Rys.8. Wyznaczanie stałej czasowej obwodu pomiarowego w środowisku Matlab



Rys.9. Przebiegi napięć fazowych przy prędkości 2200 obr/min

Charakterystyka prędkość-napięcie napędu oraz powiązana z nią stała elektromotoryczna może być wyznaczona poprzez pomiar napięć fazowych napędu, podczas gdy jest on napędzany przez inny silnik ze stałą prędkością obrotową. Wartość skuteczna indukowanej w ten sposób siły elektromotorycznej SEM jest zależna od prędkości obrotowej wirnika napędu. Wyznaczenia punktów charakterystyki dokonano poprzez wykonanie serii

pomiarów polegających na zadaniu stałej prędkości obrotowej napędowi **ML** (nominalnie stanowiącemu obciążenie dla testowanego napędu) i rejestrację napięć fazowych przy pomocy oscyloskopu cyfrowego. Przykładowy przebieg napięć fazowych dla prędkości 2200 obr/min widoczny jest na rysunku 9. Następnie dane pomiarowe z oscyloskopu w formacie pliku csv zostały zaimportowane do środowiska Matlab i poddane filtracji dolnoprzepustowej w celu usunięcia szumów i zakłóceń wysokoczęstotliwościowych z sygnałów napięć fazowych. Tak otrzymane wyniki stanowiły podstawę do wyznaczenia charakterystyki widocznej na rysunku 10 oraz stałej elektromotorycznej stanowiącej współczynnik kierunkowy prostej powstałej poprzez linearyzację tej charakterystyki. Wykonano 34 pomiary w przedziale od 60 obr/min do 3000 obr/min.



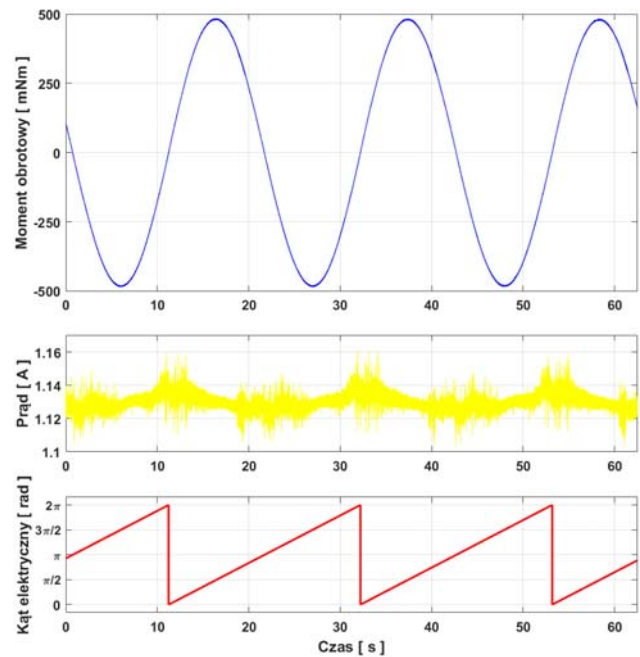
Rys.10. Charakterystyka prędkość-napięcie napędu EMJ-04APB22 firmy Estun

Aby w pełni wykorzystać moc przekształtnika, silniki powinny pracować przy maksimum ilorazu momentu elektromagnetycznego do prądu zasilania T/I (ang. Maximal Torque Per Ampere). Jeżeli indukcyjności w osiach magnetycznych - podłużnej i poprzecznej są sobie równe to maksymalny iloraz momentu do prądu jest osiągnięty dla kąta fazowego pomiędzy wektorem prądu stojana a wektorem strumienia magnetycznego magnesów trwałych równego 90° elektrycznych. W konstrukcjach napędów, których indukcyjność poprzeczna jest większa od podłużnej ($L_d < L_q$), optimum ilorazu T/I występuje gdy wektor prądu zasilającego wyprzedza wektor strumienia magnetycznego wirnika o kąt fazowy większy niż 90° elektrycznych. Niesymetrię magnetyczną najczęściej spotkać można w silnikach z magnesami mocowanymi wewnątrz rdzenia wirnika IPM (ang. Interior Permanent Magnet) [11].

Charakterystyka prąd-moment napędu oraz powiązana z nią stała momentowa może być wyznaczona poprzez pomiar momentu obrotowego generowanego przez napęd przy pomocy czujnika momentu dla zadanej wartości prądu zasilającego napęd. Wyznaczenia punktów charakterystyki dokonano poprzez wymuszenie powolnego obrotu wektora prądu stojana przy zaciśniętym hamulcu (utrzymanie stałej pozycji wirnika) oraz rejestrację sygnału z czujnika momentu (**TS**) umieszczonego pomiędzy badanym napędem (**MT**) a hamulcem (**EB**). Amplituda wektora prądu stojana zasilającego napęd była utrzymywana na stałym poziomie dzięki układowi komutacji elektronicznej z zaimplementowanym regulatorem typu PI, a wartość kąta fazowego ulegała zmianie ze stałą prędkością kątową, zgodnie z rysunkiem 11.

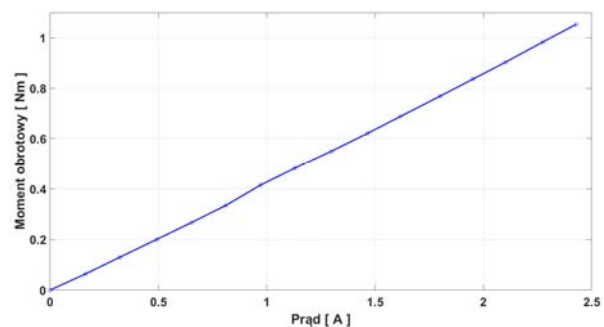
Na tej podstawie, w każdej z serii pomiarów wyznaczono maksymalne wartości momentu obrotowego generowanego przez badany napęd przy zadanej amplitudzie wektora prądu stojana. Tak otrzymane wyniki

stanowiły podstawę do wyznaczenia charakterystyki widocznej na rysunku 12 oraz stałej momentowej napędu stanowiącej współczynnik kierunkowy prostej powstałej poprzez linearyzację tej charakterystyki. Wykonano 15 pomiarów w przedziale od 0,15 A do 2,45 A.



Rys.11. Zależność momentu generowanego przez napęd od wektora (amplitudy i kąta) prądu zasilającego uzwojenia

Metoda ta pozwala również na wyznaczenie charakterystyki prąd-moment dla napędów o niesymetrycznej indukcyjności, dla których maksymalny moment jest generowany dla kąta fazowego pomiędzy wektorem prądu a wektorem strumienia magnetycznego wirnika różnego od 90° elektrycznych.



Rys.12. Charakterystyka prąd-moment napędu EMJ-04APB22 firmy Estun

Wyniki badań eksperymentalnych

W tabeli 1 przedstawiono porównanie wartości parametrów elektrycznych napędu Estun EMJ-04APB22 na podstawie danych zawartych w dokumentacji technicznej napędu dostarczonej przez producenta oraz wartości wyznaczonych eksperymentalnie przy pomocy procedur opisanych powyżej. Stała momentowa i elektromotoryczna zostały wyznaczone poprzez regresję liniową punktów charakterystyk prąd-moment oraz prędkość-napięcie.

Tabela 1. Porównanie parametrów elektrycznych napędu Estun EMJ-04APB22

Parametr	Wartość podana w dokumentacji	Wartość wyznaczona eksperymentalnie	Jednostka	Błąd względny
Rezystancja uzwojeń R_s	4,7	4,9	Ω	4,1%
Elektryczna stała czasowa T_e	2,979	2,96 ⁽³⁾	ms	0,6%
Stała elektromotoryczna k_e	31,63	29,49	$V \cdot \min / obr \cdot 10^{-3}$	7,3%
Stała momentowa k_t	0,471 ⁽¹⁾	0,428	Nm/A	10,0%
Indukcyjność poprzeczna L_q	14 ⁽²⁾	14,52	mH	3,6%
Indukcyjność podłużna L_d	14 ⁽²⁾	14,34	mH	2,4%

⁽¹⁾ Wartość wyznaczona na podstawie maksymalnego momentu ciągłego (1,27 Nm) oraz maksymalnego prądu ciągłego (2,7 A)

⁽²⁾ Wartość wyznaczona na podstawie elektrycznej stałej czasowej (2,979 ms) oraz rezystancji uzwojeń (4,7 Ω)

⁽³⁾ Stała czasowa wyznaczona na podstawie indukcyjności L_q

W dokumentacji technicznej napędu nie przedstawiono dokładnych charakterystyk prąd-moment oraz prędkość-napięcie.

Wnioski

Parametry elektryczne podane w dokumentacji technicznej napędu dostarczonej przez producenta różnią o 0,6-10% w stosunku do parametrów wyznaczonych eksperymentalnie przy pomocy metod opisanych w niniejszym artykule. W wyznaczonych charakterystykach prąd-moment oraz prędkość-napięcie można zaobserwować niewielki błąd nieliniowości krzywych opisujących obie zależności. Maksymalny błąd nieliniowości charakterystyki prąd-moment wyniósł poniżej 1,1% momentu znamionowego, natomiast maksymalny błąd dla charakterystyki prędkość-napięcie wyniósł poniżej 1,65% wartości napięcia znamionowego dla prędkości powyżej 180 obr/min (3 obr/s). Poniżej tej prędkości można zaobserwować znaczny błąd nieliniowości, o wartościach powyżej kilku procent wartości napięcia znamionowego.

Eksperymentalna identyfikacja parametrów elektrycznych napędu pozwala na wyznaczenie wartości parametrów, które nie są bezpośrednio podane w dokumentacji technicznej (L_d , L_q) a znajomość ich wartości jest konieczna do prawidłowej implementacji modelu matematycznego napędu PMSM w układzie sterowania. Dodatkowo wyznaczone dwie podstawowe charakterystyki opisujące napęd PMSM (prąd-moment oraz prędkość-napięcie) pozwalają na uwzględnienie ich nieliniowości (np. nieliniowa zależność prędkości od napięcia przy niskich prędkościach obrotowych) w modelu matematycznym napędu wykorzystywanym w układzie sterowania.

Duże różnice pomiędzy wartościami stałych momentowej i elektromotorycznej podane w dokumentacji technicznej napędu w stosunku do ich wartości wyznaczonych eksperymentalnie (sięgające 10%)

potwierdzają, iż celowa jest identyfikacja parametrów elektrycznych danego egzemplarza napędu, w celu implementacji jego dokładnego modelu matematycznego. Wykorzystanie bardziej złożonych modeli matematycznych, uwzględniające zjawiska termiczne (np. wpływ zmiany rezystancji uzwojeń pod wpływem temperatury) lub nieliniowości elementów magnetycznych jest celowe dopiero po identyfikacji podstawowych parametrów elektrycznych.

Niniejsze badania są wstępem do wykorzystania parametrów elektrycznych w algorytmach sterowania napędami bezpośrednimi uwzględniającymi model matematyczny napędu.

Opisane w artykule badania były finansowane w ramach umowy nr 16.16.130.942.

Autorzy: mgr inż. Grzegorz Góra, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: ggora@agh.edu.pl; mgr inż. Piotr Mars, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: mars@agh.edu.pl, dr inż. Konrad Gac, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: kgac@agh.edu.pl, dr hab. inż. Maciej Petko, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: petko@agh.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Jakubiec B., Napęd pojazdu elektrycznego z wielofazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), Nr 12
- [2] Ze Ya A., Than A. A., Design and Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor used in Industrial Robot, *Fourth National Conference on Science and Engineering*, (2014), Mandalay Technological University, Myanmar
- [3] Singh J., Singh B., Singh S.P., Chaurasia R., Sachan S., Performance investigation of Permanent Magnet Synchronous Motor drive using vector controlled technique, *2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, (2012), IEEE.
- [4] Haibing W., Rongxiang Z., Fangbing Ch., Huang Y., Active Disturbance Rejection Control for PMSM Servo System Applied in Industrial Sewing Machines, *International Conference on Electrical and Control Engineering*, (2010), IEEE.
- [5] EMJ-04 Series Servo Motor, <https://www.anaheimautomation.com/manuals/servo/L010976%20-%20EMJ-04%20Servo%20Motor.pdf>, (2019), on-line
- [6] Drabek T., Papciak D.; Obliczenia modelowe silnika elektrycznego samochodu Toyota Prius II generacji, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 3/2016, 111
- [7] Kubo H., Tadano Y.; Parameter estimation of PMSM driven by PWM inverter based on discrete dynamic model, Industrial Electronics Society, *IECON - 42nd Annual Conference of the IEEE*, 2016, 2873-2878
- [8] Vesely I., Marcon P., Szabo Z., Zezulka F., Sajdl O.; Parameter identification of PMSM, *Progress in Electromagnetic Research Symposium*, 2016, 2921-2925
- [9] Sobieraj T., Wybór parametrów dla optymalnej strategii sterowania silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), Nr 3
- [10] Bobek V.; PMSM Electrical Parameters Measurement, Freescale Semiconductor – Application Note, 2013, Nr 02
- [11] Václavek P., Blaha P.; Field weakening in PMSM model based predictive control, *Power and Energy (PECon)*, (2010), Kuala Lumpur