

Porównanie falownikowych napędów pompy hydraulicznej w układzie sterowania objętościowego

Streszczenie. Przedstawiono wyniki analizy falownikowego napędu pompy hydraulicznej w układzie sterowania objętościowego z zastosowaniem typowych silników, tj. indukcyjnego klatkowego (IM), bezszczotkowego prądu stałego (BLDC) oraz synchronicznego ze wzbudzeniem od magnesów trwałych (PMSM). W analizie uwzględniono metody sterowania prędkością kątową silników: skalarną ($\omega/\omega_{ref} = \text{const}$, silnik IM) polowo-zorientowaną (FOC, silniki IM i PMSM) oraz układ z regulatorem PI (silnik BLDC). Celem analizy było porównanie wymienionych silników i metod sterowania pod kątem ich zastosowania do napędu hydraulicznej stacji zasilającej z pompą o stałej wydajności. Badania laboratoryjne przeprowadzono dla napędów z silnikami o mocy ok. 2,5 kW.

Abstract. The problems of inverter-fed drive control of hydraulic pump in volumetric control system with use typical motors, i.e.: cage induction (IM), brushless dc (BLDC) and synchronous permanent magnet (PMSM) have been analysed. Angular velocity in closed-loop systems for each one were analysed, including the following methods: the scalar one ($\omega/\omega_{ref} = \text{const}$, IM motor), the field-oriented control (IM and PMSM) and control system with PI controller (BLDC). The aim of the analysis was to compare the motors and control methods in terms of their effective application to the hydraulic drive of the power station with a fixed-capacity pump. The tests were carried out for the drives with motors of rated power 2,5 kW. (**Comparison of inverter hydraulic pump drives in the volumetric control system**)

Słowa kluczowe: elektryczny silnik prądu przemiennego (IM, BLDC, PMSM), sterowanie napędu elektrycznego, pompa hydrauliczna.

Keywords: electric AC motor (IM, BLDC, PMSM), electrical drive control, hydraulic pump.

Wstęp

Układ hydrauliczny dokonuje zamiany mocy silnika napędowego pompy na moc hydrauliczną (ciśnienie i przepływ czynnika roboczego), a następnie ponownie na moc mechaniczną silnika hydrostatycznego lub siłownika. Transformacje mocy, w tym sprawność elementów układu napędowego, poważnie obniżają sumaryczny bilans energetyczny układu hydraulicznego. Bilans ten zależy głównie od zastosowanej metody sterowania elementami wykonawczymi, parametrów zastosowanych regulatorów itd. [1, 2, 5, 8, 9].

Jednym z popularniejszych sposobów sterowania siłą (lub momentem) w układzie hydraulicznym jest zastosowanie zaworu dławiącego, redukującego ciśnienie w instalacji hydraulicznej. Z kolei sterowanie prędkością hydraulicznego elementu wykonawczego (silnika lub siłownika) odbywa się poprzez sterowanie przepływem czynnika roboczego. Zmianę przepływu można uzyskać poprzez zmianę wydajności jednostkowej (objętości geometrycznej) pompy lub zmianę jej prędkości obrotowej (sterowanie objętościowe) oraz poprzez dławienie przepływu (sterowanie dławieniowe) [5, 8]. Między momentem a ciśnieniem oraz między prędkością obrotową pompy a prędkością hydraulicznego elementu wykonawczego zachodzą jednoznaczne, w przybliżeniu proporcjonalne relacje. Wymienione zależności można wykorzystać do odpowiedniego sterowania momentem lub prędkością kątową silnika elektrycznego, napędzającego pompę hydrauliczną. Umożliwi to wyeliminowanie elementów dławiących lub kosztownych pomp o zmiennej objętości geometrycznej. Metoda sterowania będzie efektywna, jeśli układ regulacji prędkości silnika elektrycznego charakteryzował się będzie odpowiednią dynamiką, dużą przeciążalnością momentem i wysoką sprawnością.

Do napędu pomp hydraulicznych zwykle są stosowane silniki indukcyjne (IM) [5, 8]. Coraz powszechniej stosuje się również silniki ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, tj. silniki bezszczotkowe prądu stałego (BLDC) [2, 6, 8, 9, 10] oraz silniki synchroniczne (PMSM) [1, 8, 9].

Napęd pompy hydraulicznej w sterowaniu objętościowym pracuje w szerokim zakresie prędkości i momentu obciążenia na wale silnika. Dolny zakres

prędkości określa niska sprawność objętościowa pompy (stosunek wydajności rzeczywistej do teoretycznej), natomiast górny – jej graniczna prędkość obrotowa. Napęd pompy w całym roboczym zakresie prędkości kątowej powinien więc cechować się dobrą dynamiką, odpornością na znaczne przeciążenia momentem oraz wysoką sprawnością [5, 8].

W pracy przedstawiono wyniki analizy zastosowania podstawowych typów silników, tj. IM, BLDC i PMSM do napędu pompy w hydraulicznym układzie sterowania objętościowego. Do analizy wybrano podstawowe metody sterowania prędkością kątową silników, tj.: skalarną ($\omega/\omega_{ref} = \text{const}$, silnik IM), polowo-zorientowaną pośrednią (IFOC – kąt wektora pola wyznaczany na podstawie poślizgu i prędkości elektrycznej, silnik IM) oraz bezpośrednią (FOC – kąt mierzony, silnik PMSM) [7, 8]. Silnik BLDC analizowano w klasycznym układzie regulacji z regulatorem PI. Badania laboratoryjne przeprowadzono w układzie napędowym z silnikami o mocy ok. 2,5 kW.

Stanowisko badawcze napędu pompy

W procesie projektowania napędu falownikowego uwzględnia się następujące jego elementy: pomiar wielkości fizycznych, identyfikację parametryczną lub nieparametryczną modelu matematycznego oraz wybór metody sterowania i dobór nastaw regulatorów. W przypadku sterowania objętościowego z falownikowym napędem pompy hydraulicznej, często zachodzi konieczność specjalnego doboru struktury i parametrów układu sterowania, umożliwiającego osiągnięcie możliwie najszybszych zmian prędkości kątowej lub momentu silnika w warunkach znacznego przeciążenia momentem. Efekt ten można osiągnąć poprzez odpowiedni dobór metody sterowania i wartości parametrów regulatorów na podstawie wyników identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego napędu.

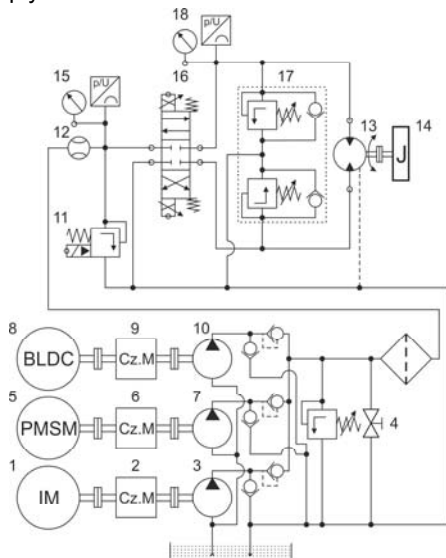
W syntezie struktur napędów falownikowych przyjęto typowe modele matematyczne silników, powszechnie publikowane, np. w [3, 4, 6]. Wartości parametrów modeli matematycznych silników wyznaczono na podstawie minimalizacji (metodą Box'a) błędu średniokwadratowego amplitudy prądu stojana I oraz prędkości kątowej ω

$$(1) \quad F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\omega(i) - \hat{\omega}(i))^2 + \frac{w}{N} \sum_{i=1}^N (I(i) - \hat{I}(i))^2$$

przy czym: N – liczba pomiarów; w – współczynnik wagowy (w badaniach przyjęto $w=10$); symbol „^” oznacza rozwiązanie modelu matematycznego silnika. Modele matematyczne oraz metody i wyniki identyfikacji parametrycznej obszernie przedstawiają prace [3, 6, 8, 9].

W procesie identyfikacji wyznaczano współczynniki modeli matematycznych silników, poza rezystancją stojana, którą określono za pomocą bezpośredniego pomiaru. Identyfikacji parametrów dokonano na podstawie pomiarów wielkości elektrycznych i mechanicznych podczas rozruchu silników, przy czym oprócz wielkości wejściowych (napięcia stojana) i wyjściowych (prądy fazowe, prędkość kątową, położenie kątowe wału), dodatkowo mierzono moment obciążenia na wale silników.

Weryfikację laboratoryjną metod identyfikacji i sterowania dokonano na stanowisku badawczym, którego schemat ideowy ilustruje rys. 1. Silnik indukcyjny IM napędza pompę zębatą 3 o objętości geometrycznej $6 \text{ cm}^3/\text{obrót}$, natomiast silniki PMSM i BLDC pompy tłoczkowe 7 i 10 o objętości geometrycznej $4,9 \text{ cm}^3/\text{obrót}$ – poprzez sprzęgła i układy pomiaru momentu 2, 6 i 9. Sterowanie przepływem lub ciśnieniem może odbywać się poprzez zmianę prędkości obrotowej silników lub odpowiednie sterowanie proporcjonalnym zaworem regulacyjnym 16. Obciążeniem układu jest silnik hydrauliczny 13, o objętości geometrycznej $4,9 \text{ cm}^3/\text{obrót}$, współpracujący z układem antykawitacyjno-przeciążeniowym 17, połączonym mechanicznie z masą 14 ($J=0,1 \text{ kgm}^2$), poprzez sprzęgło rozłączne. Pomiar parametrów hydraulicznych układu jest dokonywany za pomocą przetworników ciśnienia 15 i 18 oraz przepływomierza 12.



Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska badawczego

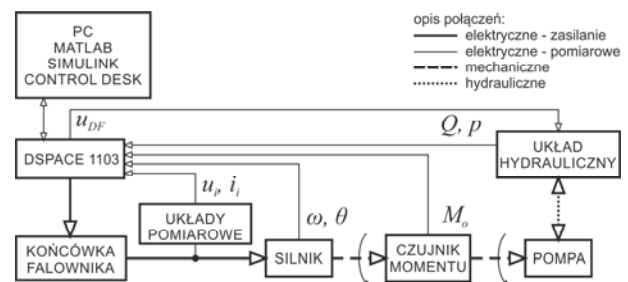
W tabeli 1 zamieszczono podstawowe parametry badanych silników elektrycznych.

Tabela 1. Parametry silników elektrycznych.

Typ silnika	IM	BLDC	PMSM
Producent	Lenze	Parker	Parker
P_N [kW]	2,6	2,5	2,5
n_N [obr/min]	2300 (80Hz)	3000	3000
n_{MAX} [obr/min]	8000	4200	4200
M_N [Nm]	10,8	7,8	7,8
I_N [A]	5,5	9,5	9,5

Stanowisko wyposażono w mikroprocesorowe układy pomiarowe: prędkości i położenia wału silników (silnik IM – resolver, silnik BLDC – enkoder i czujniki Halla, silnik PMSM – resolver z procesorem DSP Blackfin i układem AD2S1205), napięć i prądów stojana (przetworniki typu LEM, odpowiednio napięciowe i prądowe), momentu obrotowego na wałach (przetworniki DataFlex), prędkości obrotowej i położenia wału silnika oraz siłownika hydraulicznego (enkodery), natężenia przepływu (przepływomierz turbinkowy) i ciśnienia.

Ogólny schemat blokowy układu sterowania silnikami zamieszczono na rys. 2. W układzie tym dokonywany jest pomiar prądów i napięć fazowych stojana (u_i [V] i i_i [A] dla i -tej fazy), momentu na wale M_o [Nm], prędkości kątowej ω [rad/s], położenia wirnika θ [rad], przepływu Q [l/min], ciśnienie w instalacji p [bar]. Otwarciem proporcjonalnego zaworu dławiącego steruje sygnał u_{DF} . Maksymalna moc obciążenia silników, przy zmianie prędkości obrotowej: silnika IM w zakresie $300 \div 2300$ [obr/min] wynosi $0,5 \div 5,3$ [kW], natomiast silników BLDC i PMSM w zakresie $300 \div 3000$ [obr/min] zmienia się w granicach $0,5 \div 5,8$ [kW].



Rys. 2. Schemat blokowy układu sterowania silnikami

Układ sterowania wraz z algorytmem modulacji zaimplementowano w programach Matlab 2010a i Simulink. Zmiana wartości wielkości wejściowych układu sterowania silnikiem oraz akwizycja danych pomiarowych realizowana była z poziomu aplikacji ControlDesk 3.7, przy pomocy karty kontrolno-pomiarowej dSpace 1103, z częstotliwością próbkowania 40 [kHz].

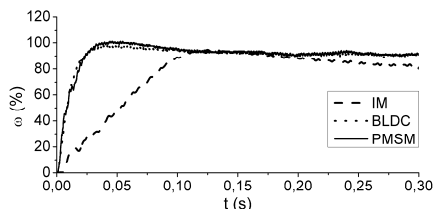
Sterowanie prędkością kątową silników w układzie otwartym poprzez zmiany napięcia stojana

Ważnym elementem podejmowania decyzji w projektowaniu napędu elektrycznego i hydraulicznego jest poznanie charakterystyk elektrycznych i mechanicznych układu falownik-silnik w otwartym układzie sterowania. W układzie otwartym jest wyeliminowany wpływ regulatorów i struktury układu sterowania na ww. charakterystyki. Zasilanie silników w układzie otwartym, np. pełnym napięciem przekształtnika ($v=560$ [V], tj. 100% wypełnienia impulsów), pozwala na ocenę i porównanie stanów nieustalonych i ustalonych prędkości kątowej, ich przeciążalności momentem oraz sprawności.

Większość badań wykonano przy obciążeniu silników pompą hydrauliczną, której przepływ czynnika roboczego był dławiony zaworem proporcjonalnym. Przy stałym ustawieniu zaworu uzyskano moment obciążenia silnika w przybliżeniu proporcjonalny do jego prędkości kątowej. W dalszej części prezentacji wyników badań zapis, że obciążenie było równe wartości nominalnej ($M_o=M_N$ lub 100%) oznacza, że takie obciążenie momentem uzyskano dla prędkości nominalnej silnika. Analogicznie $2M_N$ lub 200% oznacza, że takie obciążenie było również dla prędkości nominalnej.

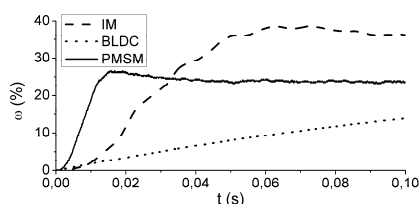
Na rys. 3 przedstawiono porównanie względnych prędkości kątowych (odniesionych do wartości nominalnych) podczas rozruchu silników zasilanych

skokowo, pełnym napięciem (dla silnika IM częstotliwość napięcia stojana $f=80$ [Hz]) z obciążeniem $M_o=2M_N$. Eksperymenty laboratoryjne wykazały, że czas osiągnięcia stanu ustalonego prędkości obrotowej silników PMSM i BLDC jest zbliżony i jest ok. 4-krotnie krótszy od silnika IM, przy czym moment bezwładności napędu z silnikiem IM jest większy o ok. 52% w stosunku do momentów bezwładności silników BLDC i PMSM.



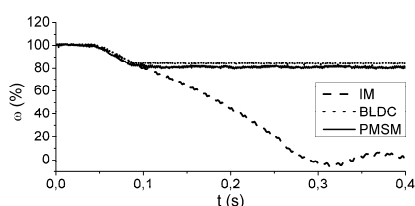
Rys. 3. Przebiegi czasowe prędkości kątowej dla rozruchu silników przy napięciu zasilania $v=100\%$ z obciążeniem $2M_N$

Nieco odmiennie sytuacja wygląda, jeśli silniki zostaną zasilone niską wartością napięcia stojana, np. $v=30\%$ wypełnienia impulsów (dla silnika IM częstotliwość napięcia $f=24$ [Hz], $v=2,875 \cdot f$). Wyniki eksperymentów zamieszczono na rys. 4. Silnik BLDC ma najwolniejszy rozruch, natomiast silnik PMSM wykazuje krótki czas rozruchu i wartość ustaloną prędkości proporcjonalną do wartości napięcia zasilania. W tym przypadku podczas rozruchu silniki były obciążone pompą połączoną ze zlewem z pominięciem zaworu dławiącego (moment obciążenia proporcjonalny do prędkości silnika w zakresie 0-3 [Nm]).

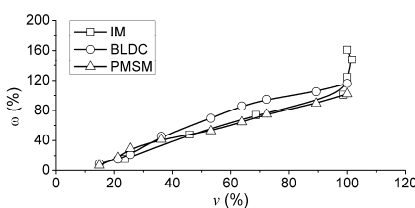


Rys. 4. Przebieg prędkości kątowej silników dla skokowego wymuszenia napięciem stojana $v=30\%$ wypełnienia impulsów

Charakterystyki przeciążalności silników zasilanych napięciem $v=100\%$ ilustruje rys. 5. Silnik IM utyka przy obciążeniu ok. $2,3M_N$ (met. sterowania $v/f=const$).



Rys. 5. Charakterystyki przeciążalności silników dla momentu obciążenia $2,3M_N$ (silnik IM $v/f=const$) i $2,6M_N$ (silniki BLDC i PMSM)



Rys. 6. Charakterystyki statyczne prędkości kątowej silników w funkcji napięcia v stojana

Charakterystyki statyczne prędkości obrotowej silników w funkcji napięcia v zamieszczono na rys. 6. Charakterystyki statyczne silników są prawie liniowe, za

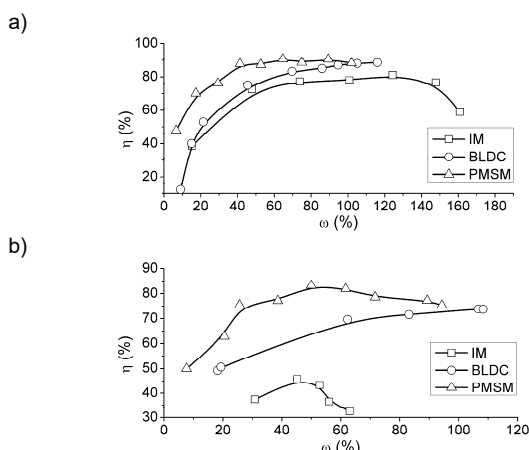
wyjątkiem silnika IM w II strefie regulacji (stała wartość napięcia zasilania).

Sprawność silników wyznaczano na podstawie zależności

$$(2) \quad \eta = \frac{P_{mech}}{P} \cdot 100\%$$

gdzie: P – moc czynna pobierana przez silnik z sieci [kW], P_{mech} – moc mechaniczna ($P_{mech}=0,001M_o \cdot \omega$ [kW]).

Charakterystyki sprawności przy obciążeniu momentem M_o równym 100% i 200% zamieszczono na rys. 7 (dla silnika IM zastosowano metodę $v/f=const$). Zgodnie z oczekiwaniami sprawność silnika PMSM w stosunku do pozostałych silników jest najwyższa, przy czym różnice zależą od momentu obciążenia. Dla mniejszego i większego momentu obciążenia w stosunku do wartości znamionowej różnice w sprawności silników się zwiększają.



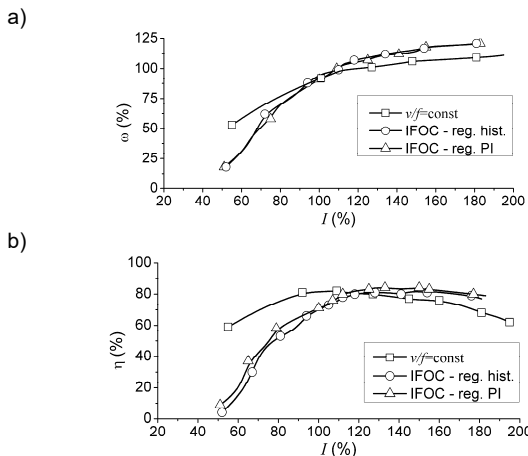
Rys. 7. Charakterystyki sprawności silników przy obciążeniu momentem M_o : a) 100%, b) 200%

Sterowanie prędkością kątową silników w układzie otwartym poprzez zmiany prądu stojana

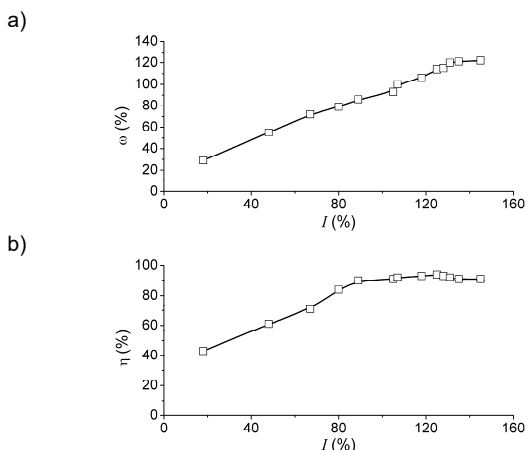
Wyniki badań dotyczą sterowania prędkością kątową silników w układzie regulacji prądu stojana, bez pętli sprzężenia zwrotnego od prędkości kątowej. Wielkością wejściową układów sterowania był prąd stojana i_z (silnik IM – metoda $v/f=const$, silnik BLDC) lub składowe prądu w wirującym układzie współrzędnych i_{dz} i i_{qz} (metoda IFOC – silnik IM oraz bezpośrednia FOC – PMSM). Przeprowadzone eksperymenty laboratoryjne umożliwiły uzyskanie odpowiedzi na pytanie, jak pobudzenie prądem dla różnych metod sterowania wpływa na prędkość kątową i sprawność silników, dla zmiennego momentu obciążenia.

W celu porównania analizowanych metod sterowania prędkością kątową silników wyznaczono charakterystyki statyczne prędkości kątowej i sprawności silnika IM w funkcji amplitudy wektora prądu stojana I , które zestawiono odpowiednio na rys. 8a i rys. 8b. Wartość składowej wzbudzenia prądu w metodzie IFOC wynosiła $i_{dz}=2,4$ [A] (i_z lub i_{qz} zmieniano w zakresie 1-25 [A]). Silnik IM niezależnie od metody sterowania rozwija podobną prędkość. Metody IFOC wykazują zbliżoną sprawność, przy czym dla obciążeń przekraczających wartość znamionową cechują się większą sprawnością niż metoda $v/f=const$.

Identycznie, jak w przypadku silnika IM, wyznaczono charakterystykę statyczną prędkości kątowej w funkcji prądu stojana $\omega=f(I)$ dla silnika BLDC (rys. 9a). Warunki obciążenia silnika BLDC były identyczne, jak w przypadku silnika IM. Wykres sprawności silnika BLDC w stanie ustalonym prędkości kątowej w funkcji prądu stojana ilustruje rys. 9b. Sprawność silnika BLDC osiąga najwyższy poziom dla obciążenia zbliżonego do znamionowego.

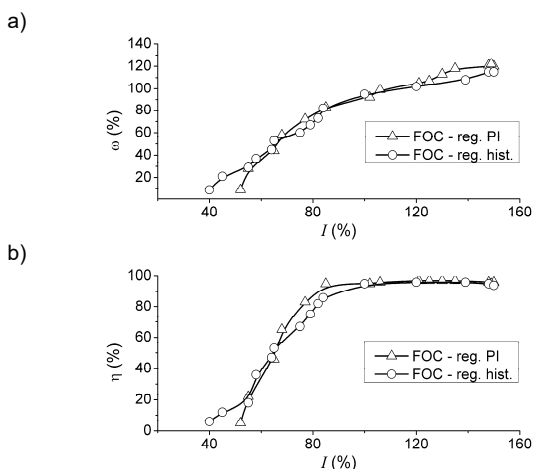


Rys. 8. Charakterystyki statyczne silnika IM funkcji prądu stojana I : a) prędkości, b) sprawności



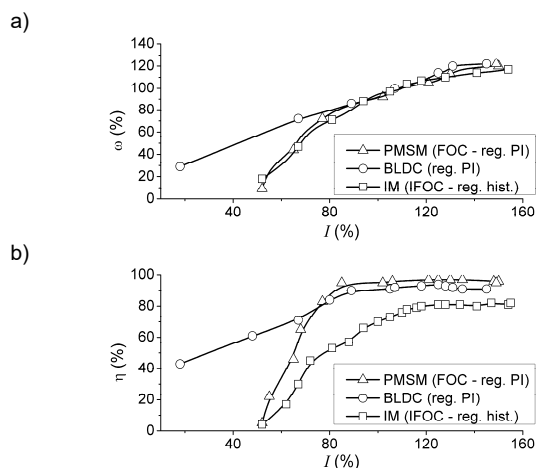
Rys. 9. Charakterystyki statyczne: a) prędkości kątowej silnika BLDC, b) sprawności w funkcji prądu stojana I

Charakterystyki statyczne $\omega=f(I)$ dla silnika PMSM zamieszczono na rys. 10a. W tym przypadku zarówno układ sterowania prędkością kątową z histerezowymi regulatorami prądów fazowych, jak i z regulatorami prądów typu PI, wykazuje porównywalne wartości prędkości kątowej dla danego momentu obciążenia. Również zbliżony kształt dla zastosowanych metod sterowania mają charakterystyki sprawności silnika PMSM w funkcji prądu stojana I , które zamieszczono na rys. 10b (moment obciążenia 100%).



Rys. 10. Charakterystyki statyczne: a) prędkości kątowej silnika PMSM, b) sprawności w funkcji prądu stojana I

Z kolei na rys. 11a przedstawiono porównanie charakterystyk prędkości kątowych analizowanych silników, przy czym dla silnika IM zastosowano metodę sterowania IFOC z regulatorami histerezowymi, a dla silnika PMSM – metodę FOC z regulatorami PI. Z prezentowanych charakterystyk wynika, że silniki o podobnej mocy dla tego samego względnego obciążenia na wale podobnie rozwijają prędkość kątową. Odmienne wygląda problem porównania sprawności silników (rys. 11b). W tym przypadku silniki ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, a szczególnie silnik PMSM, wykazują największą sprawność w zakresie wartości nominalnych obciążenia. Silnik BLDC dla niskich obciążeń ma większą sprawność i pobiera mniejszy prąd.



Rys. 11. Porównanie charakterystyk: a) prędkości kątowych silników, b) sprawności w funkcji prądu stojana I

Regulacja prędkości kątowej silników

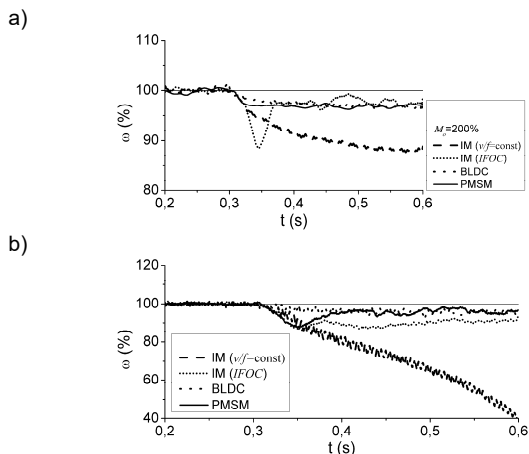
W badaniach układów regulacji prędkości silników uwzględniono metody sterowania: skalarną $v/f=const$ oraz wektorową IFOC oraz FOC z regulatorami histerezowymi. Parametry regulatora prędkości typu PI wyznaczano numerycznie przy minimalizacji błędu średniokwadratowego (3) w metodzie Box'a, między zadanym przebiegiem modelu odniesienia ω_z a odpowiedzią czasową układu regulacji ω . Sposób ten pozwala na kształtowanie dynamiki układów napędowych z różnymi typami silników, przy czym wzorcową charakterystykę czasową modelu odniesienia przyjęto w postaci odpowiedzi skokowej układu drugiego rzędu.

$$(3) \quad Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\omega_z(i) - \omega(i))^2$$

Model matematyczny napędu stanowi układ równań różniczkowych, które rozwiązywano metodą Runge-Kutty 4 rzędu (Matlab, *ode45*) wg parametrów uzyskanych z procedury identyfikacji parametrycznej.

Istotną właściwością napędu pompy w sterowaniu objętościowym jest możliwość znacznego przeciążenia silnika elektrycznego momentem obciążenia. W celu oceny odporności silników na udarowe zmiany momentu obciążenia dokonano dla ustalonej (nominalnej) prędkości kątowej zmiany momentu obciążenia z wartości 50% do wartości 200% oraz z wartości 50% do poziomu maksymalnego momentu obciążenia możliwego do uzyskania na stanowisku badawczym, tj. dla silnika IM 230%, a dla silników BLDC i PMSM – 260%. Przebiegi prędkości kątowych silników zamieszczono odpowiednio na rys. 12a i rys. 12b. Silniki w układzie sterowania polowzorowanego wykazują wyższą przeciążalność momentem w porównaniu do metody $v/f=const$ (silnik IM), przy czym najwyższą silniki BLDC i PMSM. Oczywiście

istotne znaczenie mają tu wartości parametrów regulatora prędkości kątowej, szczególnie w II strefie sterowania (silnik IM).



Rys. 12. Charakterystyki przeciążalności silników w układzie regulacji prędkości kątowej dla momentu obciążenia a) $2M_N$, b) $2,3M_N$ (silnik IM) i $2,6M_N$ (silniki BLDC i PMSM)

Sprawność silników można ocenić także na podstawie względnych charakterystyk dynamicznych $\omega(\%)/I(\%)$ podczas rozruchu lub w stanie ustalonym. Dla przypadku nominalnej prędkości kątowej i obciążenia, zależność ta jest bliska wartości 1 (rys. 13a, silnik IM przy obciążeniu nominalnym). Jeżeli natomiast silnik jest obciążony małą wartością momentu obciążenia, to zależność ta przyjmuje wartości ok. 1,5-1,75, gdyż narastanie prędkości przy małej wartości prądu powoduje wzrost wartości ilorazu $\omega(\%)/I(\%)$. W przypadku nagłego skoku obciążenia na wale silników (np. zablokowanie przepływu w instalacji hydraulicznej), wartość prądu stojana znacznie przekracza wartości nominalne przy braku wzrostu prędkości kątowej, co skutkuje spadkiem wartości tego ilorazu do ok. 0,5, a dla silników BLDC i IM (sterowanie $v/f = \text{const}$) nawet do 0,25-0,3. Zatem większa wartość tego ilorazu świadczy o wyższej efektywności silnika. Na rys. 13b zamieszczono przypadek skokowej zmiany momentu obciążenia silników w stanie ustalonym prędkości kątowej z momentu znamionowego do wartości maksymalnej możliwej do uzyskania na stanowisku badawczym, tj. $2,3M_N$ dla silnika IM i $2,6M_N$ dla silników BLDC i PMSM. Dla dużego obciążenia największą wartością ilorazu prąd/prędkość cechuje się silnik PMSM.

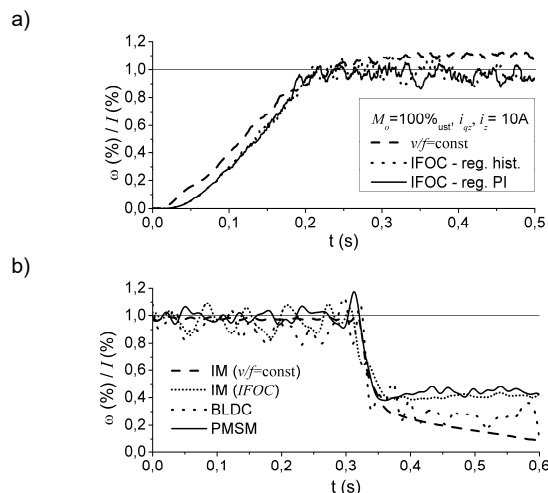
Podsumowanie

W pracy przedstawiono porównanie własności silników IM, PMSM i BLDC, uwzględniając ich zastosowanie do napędu pompy hydraulicznej w układzie sterowania objętościowego. Analizowano wyniki badań sterowania silników w układach otwartych (poprzez zmianę napięcia stojana) oraz w układach regulacji prądu stojana lub prędkości kątowej. Przedstawiona analiza pozwala na stwierdzenie, że w układzie regulacji prędkości kątowej silnik PMSM cechuje się najlepszą dynamiką, niską wrażliwością na zmianę obciążenia oraz wysoką sprawnością. Pewnym mankamentem wyboru tego silnika do napędu pompy jest dość złożona struktura układu regulacji.

Silnik BLDC jako źródło napędu pompy hydraulicznej zapewnia wysoką dynamikę porównywalną z silnikiem PMSM, lecz ma nieco gorszą przeciążalność momentem i sprawność, ale z kolei cechuje się znacznie prostszą strukturą układu sterowania.

Natomiast silnik IM sterowany metodą IFOC cechuje się gorszą sprawnością, ale dość dobrą przeciążalnością

momentem, szczególnie dla obciążeń powyżej wartości nominalnej. Zmiany prędkości kątowej w stanach dynamicznych są wolniejsze w porównaniu do silników BLDC lub PMSM.



Rys. 13. Charakterystyki dynamiczne $\omega(\%)/I(\%)$: a) podczas rozruchu silnika IM, b) przy skokowej zmianie momentu obciążenia silników w stanie ustalonym prędkości kątowej z momentu znamionowego do wartości maksymalnej ($2,3M_N$ dla silnika IM i $2,6M_N$ dla silników BLDC i PMSM)

Autorzy: dr inż. Łukasz Zawarczyński, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Al. Tysiąclecia P.P. 7, 25-314 Kielce, E-mail: l.zawarczyński@tu.kielce.pl; dr inż. Jarosław Wikarek, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Al. Tysiąclecia P.P. 7, 25-314 Kielce, E-mail: j.wikarek@tu.kielce.pl; mgr inż. Adam Dmochowski, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, ul. I. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, E-mail: adam.dmochowski@pshydrauliczna.pl.

LITERATURA

- [1] Alsayed, Y.M., Maamoun, A., Shaltout, A.: High Performance Control of PMSM Drive System Implementation Based on DSP Real-Time Controller, 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering, ITCE 2019, pp. 225-230.
- [2] Arundhathi Shyam, Febin Daya J. L.: A comparative study on the speed response of BLDC motor using conventional PI controller, anti-windup PI controller and fuzzy controller 2013 International Conference on Control Communication and Computing (ICCC), DOI: 10.1109/ICCC.2013.6731626.
- [3] Boldea I., Nasar S. A.: Electric drives. CRC Press LLC, (1999)
- [4] Hanselman D.: Brushless Permanent Magnet Motor Design. Magna Physics Publishing, USA, 2006.
- [5] Jyh Chyang Renn, Wen Jen Hsu, Wei Cheng Liao: Energy Efficient Lathe Turret Design Using Load Sensing Control Scheme, 2014 International Symposium on Computer, Consumer and Control, DOI: 10.1109/IS3C.2014.26.
- [6] Krykowski K., Hetmańczyk J.: Constant Current Models of Brushless DC Motor. Electrical, Control and Communication Engineering, 3/2013, pp. 19-24.
- [7] Sikorski A., Korzeniewski M., Ruszczyk A., Kazmierkowski M.P., Antoniewicz P., Kolomyjski W., Jasinski M.: A comparison of properties of direct torque and flux control methods (DTC-SVM, DTC- δ , DTC-2x2, DTFC-3A) EUROCON 2007 - The International Conference on "Computer as a Tool", DOI: 10.1109/EURCON.2007.4400686.
- [8] Stefański T., Zawarczyński Ł.: Analysis of inverter-fed drive of hydraulic pump in volumetric control system. 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR) 2016, pp. 146-151.
- [9] Stefański T., Zawarczyński Ł.: Identyfikacja parametryczna modeli matematycznych silników ze wzbudzeniem od magnesów trwałych. Przegląd Elektrotechniczny Tom: 88, Zeszyt: 4b, 2012, Strony: 224-229.
- [10] Ulasyar, A., Sheh Zad, H., Zohaib, A.: Intelligent speed controller design for brushless DC motor, 2018 International Conference on Frontiers of Information Technology, FIT 2018, pp. 19-23.