

Ćwiczenie 13

Układ napędowy z silnikiem indukcyjnym i falownikiem napięcia

3.1. Program ćwiczenia

1. Zapoznanie się ze sterowaniem prędkością silnika klatkowego przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego.
2. Poznanie podstawowych zależności określających silnik klatkowy sterowany częstotliwościowo.
3. Wyznaczenie charakterystyk silnika klatkowego zasilanego z falownika napięcia.
4. Poznanie przebiegów napięcia i prądu wyjściowego z falownika napięcia.

13.2. Wiadomości teoretyczne

Prędkość kątowna silnika indukcyjnego klatkowego zależy od częstotliwości f_s napięcia U_s zasilającego uzwojenia stojana, liczby par biegunów p oraz poślizgu s

$$\omega = \frac{2\pi f_s}{p} (1-s). \quad (13.1)$$

Z zależności tej wynika, że prędkość kątowna silnika klatkowego zależy od zmiany:

- liczby par biegunów,
- wartości poślizgu w wyniku regulacji napięcia zasilającego,
- częstotliwości napięcia zasilającego.

Najbardziej efektywnym sposobem jest regulacja prędkości przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego, przy czym następuje tu również jednoczesna regulacja amplitudy napięcia lub prądu zasilającego silnik.

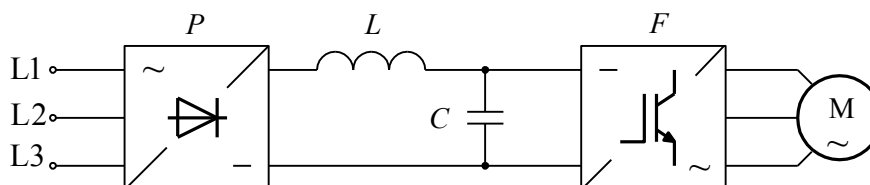
Sterowanie częstotliwościowe silników klatkowych umożliwiając statyczne przemienniki częstotliwości, zwane popularnie falownikami. Szybki rozwój zarówno przyrządów półprzewodnikowych, jak i cyfrowych układów sterowania umożliwił realizację przemienników częstotliwości o bardzo dobrych parametrach regulacyjnych i eksploatacyjnych. W rezultacie napędy z silnikami indukcyjnymi klatkowymi spełniają wszystkie wymagania, jakie dotychczas spełniały jedynie napędy prądu stałego, a jednocześnie przewyższają je niezawodnością, gabarytami i odpornością na warunki pracy oraz niższą ceną. Układy napędowe z silnikami klatkowymi sterowanymi częstotliwościowo umożliwiają także rozszerzenie zakresu regulacji prędkości kątowej w stopniu niemożliwym do uzyskania w napędach prądu stałego.

Przemienniki częstotliwości stosowane w napędach z silnikami indukcyjnymi różnią się budową i sposobami sterowania w zależności od wymagań układu napędowego.

Ze względu na budowę przemienniki częstotliwości dzielone są na:

- a) przemienniki bezpośrednie (cyklokonwertory),
- b) przemienniki pośrednie:
 - z falownikiem prądu i regulowanym prądem obwodu pośredniego,
 - z falownikiem napięcia i regulowanym napięciem obwodu pośredniego,
 - z falownikiem napięcia z modulacją szerokości impulsów wyjściowych MSI i stałą wartością napięcia obwodu pośredniego.

Najczęściej stosowane w praktyce są przemienniki częstotliwości z modulacją szerokości impulsów wyjściowych, zwane falownikami MSI. Przykładowy schemat blokowy falownika MSI przedstawiono na rysunku 13.1.



Rys. 13.1. Schemat blokowy falownika napięcia z modulacją szerokości impulsów wyjściowych

W zależności od wymagań układu napędowego stosowane są różne metody sterowania przemienników częstotliwości, od których zależą parametry statyczne i dynamiczne zasilanego silnika klatkowego, a tym samym jakość regulacji układu napędowego. Aby uzyskać stałą wartość przeciążalności momentem silnika w całym zakresie regulacji częstotliwościowej, a także ograniczenie strat poślizgowych, dąży się do utrzymania stałej wartości strumienia stojana lub wirnika. Zadanie to może być zrealizowane za pomocą tzw. metod sterowania skalarnego lub wektorowego.

Metody skalarne zalicza się do metod pośredniego sterowania strumieniem silnika indukcyjnego. Sterowanie to można zrealizować w dwojaki sposób. Jeden polega na odpowiednim sterowaniu amplitudą i częstotliwością napięcia stojana, a drugi na stero-

waniu amplitudą prądu stojana i częstotliwością wirnika $f_r = sf_s$, co zapewnia, przy zachowaniu stałości strumienia skojarzonego stojana, liniowość części roboczej charakterystyk elektromechanicznych silnika niezależnie od częstotliwości zasilania stojana f_s .

Stosowane natomiast obecnie metody wektorowe można podzielić w następujący sposób:

1 – metoda polowo zorientowana, która polega na niezależnym sterowaniu składowymi wektora prądu stojana zorientowanymi względem pola tak, aby strumień zachowywał stałą amplitudę i położenie względem wektora prądu;

2 – metoda bezpośredniego sterowania momentem silnika (tzw. sterowanie DTC).

Sterowania polowo zorientowane i DTC zapewniają doskonałe właściwości dynamiczne i są stosowane w napędach indywidualnych o wysokich wymaganiach dotyczących dynamiki procesów przejściowych w układach napędowych.

Ze względów praktycznych w układach napędowych o mniejszych wymaganiach najczęściej stosowanymi metodami sterowania wartością strumienia są metody skalarne. Najprostszą z nich jest metoda polegająca na odpowiedniej regulacji amplitudy i częstotliwości napięcia zasilającego uzwojenia stojana. W metodzie tej zależność momentu krytycznego od zmian stosunku napięcia do częstotliwości może być określona na podstawie schematu zastępczego silnika dla napięcia sinusoidalnego lub pierwszej harmonicznej napięcia odkształconego (rys. 13.2).

Moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego klatkowego może być wyznaczony z zależności

$$M_e = \frac{P_e}{\omega_{0s}}, \tag{13.2}$$

w której:

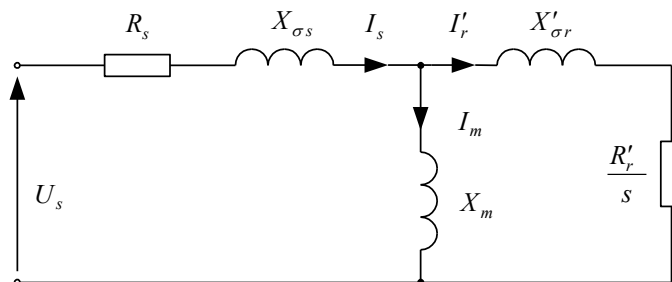
P_e – moc elektromagnetyczna przenoszona do wirnika

$$P_e = m_1 \frac{R'_r I_r'^2}{s}, \tag{13.3}$$

$m_1 = 3$ – liczba faz uzwojenia stojana,

$\omega_{0s} = 2\pi f_s$ – pulsacja synchroniczna stojana,

s – poślizg silnika.



Rys. 13.2. Schemat zastępczy silnika dla pierwszej harmonicznej napięcia zasilającego

Po podstawieniu zależności (13.3) do wzoru (13.2) otrzymuje się

$$M_e = \frac{3R'_r I_r'^2}{\omega_{0s} s}. \quad (13.4)$$

Wartość prądu wirnika I_r' , po pominięciu gałęzi magnesującej silnika, jest określana następująco:

$$I_r' = \frac{U_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2}}. \quad (13.5)$$

Po podstawieniu powyższej zależności do wzoru (13.4) otrzymuje się

$$M_e = \frac{3pU_s^2}{\omega_{0s} s} \frac{R'_r}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2}, \quad (13.6)$$

gdzie p – liczba par biegunów silnika.

Po wyznaczeniu pochodnej $\frac{dM_e}{ds}$ i przyrównaniu jej do zera wyznacza się zależność określającą poślizg krytyczny s_k silnika

$$s_k = \pm \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2}}, \quad (13.7)$$

przy czym: znak „+” dotyczy pracy silnikowej, znak „-” – pracy prądnicowej.

Po podstawieniu zależności (13.7) określającej poślizg krytyczny s_k do wzoru (13.6) otrzymuje się wyrażenie na moment krytyczny silnika

$$M_k = \frac{3pU_s^2}{2\omega_{0s} \left[\pm R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2} \right]}. \quad (13.8)$$

Z powyższych zależności wynika, że:

➤ maksymalny moment silnika indukcyjnego przy stałej wartości częstotliwości i stałych parametrach obwodu jest proporcjonalny do kwadratu wartości napięcia zasilającego,

➤ moment M_k nie zależy od wartości rezystancji wirnika,

➤ poślizg krytyczny s_k silnika zależy od stosunku $\frac{R'_r}{X_{\sigma s} + X'_{\sigma r}}$.

Często stosowane są także zależności uproszczone określające poślizg s_k i moment krytyczny M_k , w których pomijana jest rezystancja R_s . Uproszczenie to jest dopuszczalne podczas analizy pracy maszyn o mocy większej niż 10 kW, w których rezystancja R_s wynosi nie więcej niż 10÷12% sumy $X_{\sigma s} + X'_{\sigma r}$. Uwzględniając, że wartość R_s i suma $X_{\sigma s} + X'_{\sigma r}$ są podniesione do kwadratu we wzorach (13.7) i (13.8), można pominąć wpływ R_s^2 na sumę $R_s^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2$. Otrzymuje się wówczas wzory uproszczone na poślizg i moment krytyczny silnika przy sterowaniu częstotliwościowym:

$$s_k \cong \pm \frac{R'_r}{X_{\sigma s} + X'_{\sigma r}} = \pm \frac{R'_r}{\omega_{0s}(L_{\sigma s} + L'_{\sigma r})} \quad (13.9)$$

oraz

$$M_k \cong \frac{3pU_s^2}{2\omega_{0s}(X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})} = \frac{3pU_s^2}{2\omega_{0s}^2(L_{\sigma s} + L'_{\sigma r})}. \quad (13.10)$$

Z zależności (13.9) wynika, że poślizg krytyczny silnika indukcyjnego przy regulacji częstotliwościowej zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do częstotliwości. Na wartość momentu krytycznego, jak to wynika z zależności (13.10), mają natomiast wpływ trzy zmienne: napięcie zasilające U_s , częstotliwość f_s oraz indukcyjności rozproszeń $X_{\sigma s} + X'_{\sigma r}$.

Jeżeli pominiemy rezystancję uzwojeń stojana R_s we wzorze (13.8), to proporcjonalna ($U_s/f_s = \text{const}$) regulacja napięcia zasilającego i częstotliwości zapewni stałość momentu krytycznego silnika M_k (zgodnie z wzorem (13.10)). W rzeczywistości jednak wpływ rezystancji uzwojeń stojana powoduje, że moment krytyczny M_k maleje wraz ze zmniejszaniem częstotliwości napięcia zasilającego. Można to wykazać, biorąc pod uwagę schemat zastępczy silnika indukcyjnego z rysunku 13.2

$$\underline{U}_s = \underline{E}_s + \underline{I}_s (R_s + jX_{\sigma s}), \quad (13.11)$$

przy czym

$$\underline{E}_s = c_s \omega_{0s} \underline{\Psi}_s = c_s \omega_s \omega_{sN} \underline{\Psi}_s, \quad (13.12)$$

gdzie:

ω_s – względna pulsacja synchroniczna stojana,

ω_{sN} – znamionowa pulsacja synchroniczna stojana,

oraz reaktancja rozproszenia uzwojenia stojana dla dowolnej częstotliwości

$$X_{\sigma s} = \omega_{0s} L_{\sigma s} = \omega_s \omega_{sN} L_{\sigma s} = \omega_s X_{\sigma sN}, \quad (13.13)$$

gdzie $X_{\sigma sN} = X_{\sigma s(\omega_{sN})} = \omega_{sN} L_{\sigma s}$.

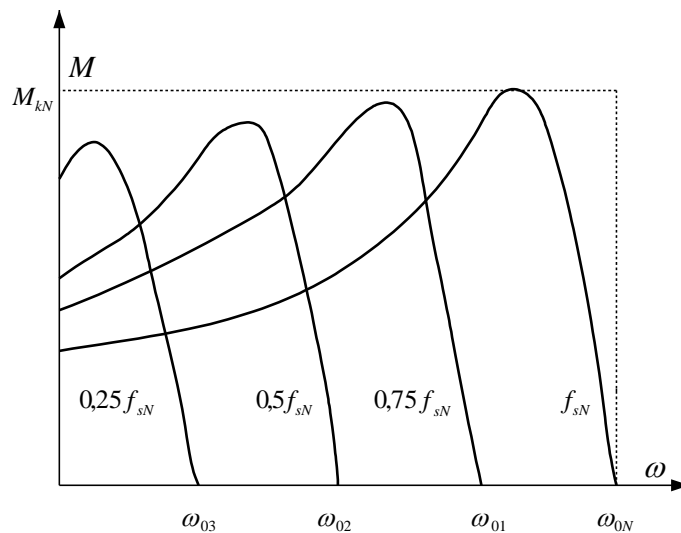
Po podstawieniu (13.12) i (13.13) do równania (13.11) otrzymuje się zależność określającą strumień stojana

$$\underline{\Psi}_s = \frac{1}{c_e \omega_{sN}} \left(\frac{U_s}{\omega_s} - I_s \frac{R_s}{\omega_s} - j I_s X_{\sigma sN} \right), \quad (13.14)$$

z której wynika, że przy danym prądzie stojana wartość strumienia jest określona przez stosunek napięcia do aktualnej jego częstotliwości, ale również zależy od spadku napięcia na rezystancji uzwojenia stojana. W zakresie małych prędkości kątowych, a więc niskich częstotliwości, udział tego spadku napięcia będzie rósł i powodował zmniejszenie wartości strumienia stojana, a tym samym momentu krytycznego silnika (patrz (13.8))

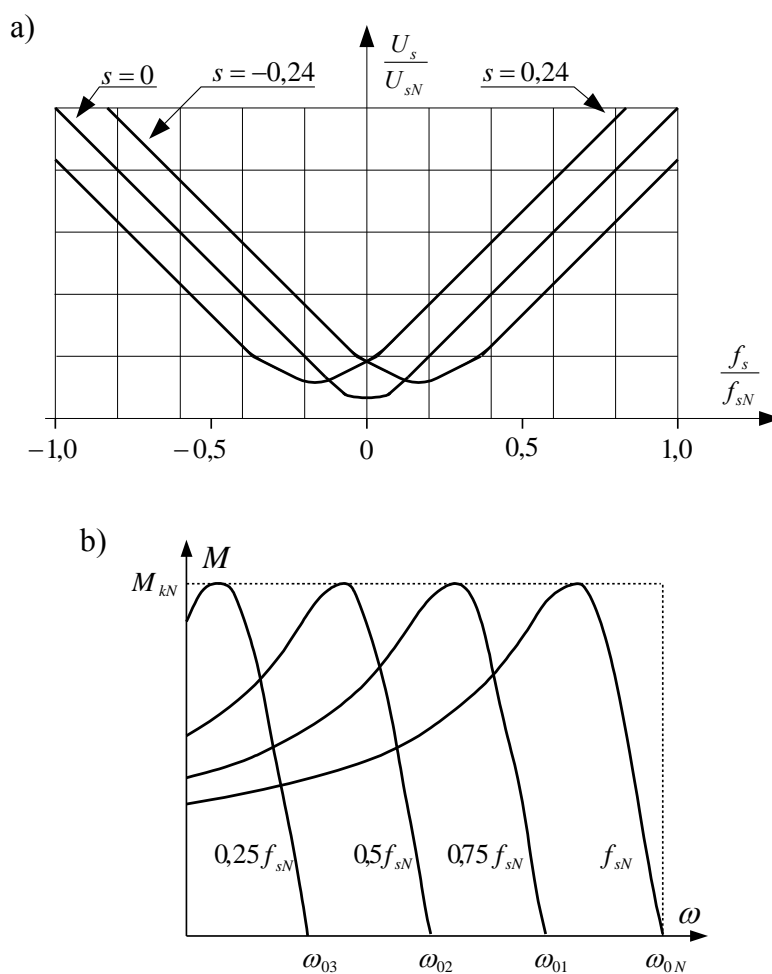
$$M_k = \frac{3pU_s^2}{2\omega_{0s} \left[\pm R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2} \right]} = \frac{3p}{2\omega_{sN}} \frac{U_s^2}{\omega_s^2 \left[\pm \frac{R_s}{\omega_s} + \sqrt{\frac{R_s^2}{\omega_s^2} + (X_{\sigma sN} + X'_{\sigma rN})^2} \right]}, \quad (13.15)$$

co przedstawiono na rysunku 13.3.



Rys. 13.3. Charakterystyki mechaniczne silnika klatkowego zasilanego z falownika napięcia przy zachowaniu $U_s/f_s = \text{const}$

Aby uzyskać stałość momentu krytycznego silnika w całym zakresie regulacji częstotliwościowej, należy tak regulować wartość napięcia zasilającego uzwojenie silnika, aby uzyskać stałość strumienia skojarzonego Ψ_s w silniku. Dąży się także do tego, by poślizg ustalony nie przekraczał znamionowego. W tym celu, głównie przy niewielkich prędkościach obrotowych, konieczna jest korekcja napięcia stojana o wartość spadku napięcia ΔU_s na rezystancji R_s . Po uwzględnieniu napięcia korekcyjnego otrzymuje się charakterystyki sterowania napięcie – częstotliwość, przedstawione na rysunku 13.4a i odpowiadające im charakterystyki mechaniczne (rys. 13.4b).

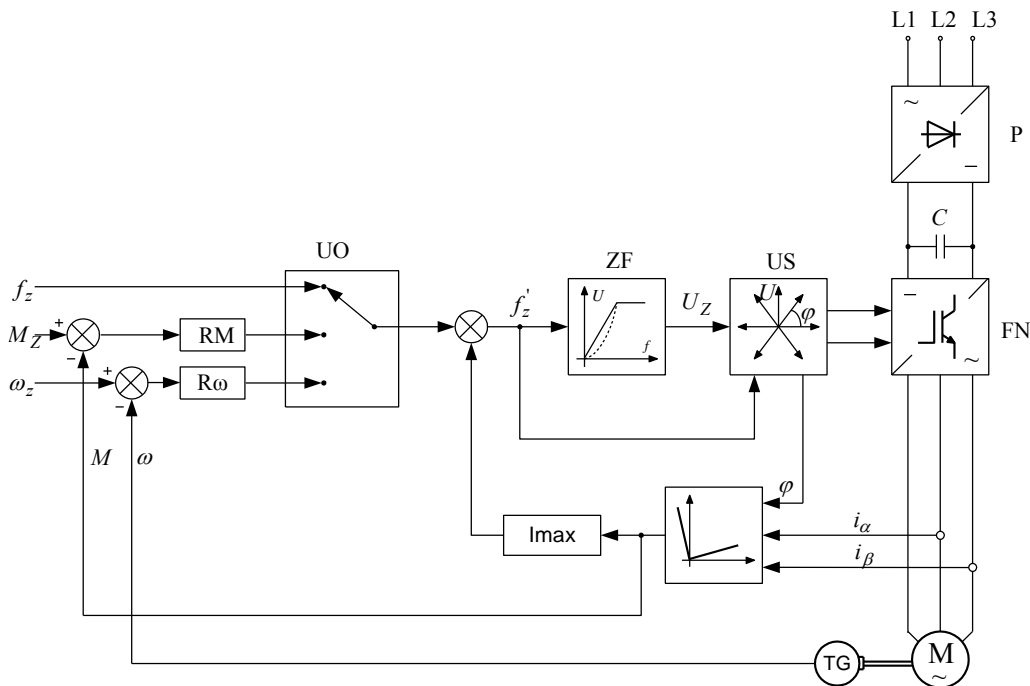


Rys. 13.4. Charakterystyki sterowania przy stałej wartości strumienia skojarzonego Ψ_s dla różnych wartości poślizgu wirnika s (a) i odpowiadające im charakterystyki mechaniczne (b)

W metodzie tej, aby utrzymać stałość strumienia Ψ_s , należy dokonywać odpowiednich przesunięć nieliniowych charakterystyk sterowania w funkcji obciążenia silnika (rys. 13.4a), co komplikuje realizację układu sterowania.

Falowniki napięcia realizujące sterowanie według zasady $U_s/f_s = \text{const}$, pracujące w otwartym układzie regulacji, praktycznie nie są w stanie zapewnić stałej przeciążalności momentem w całym zakresie sterowania częstotliwością, natomiast sterowanie z korekcją spadku napięcia na rezystancji stojana zapewnia utrzymanie stałości strumienia tylko w stanach ustalonych. W rozwiązaniach przemysłowych stosowane są zarówno falowniki realizujące sterowanie według zasady $U_s/f_s = \text{const}$, jak i bardziej rozwinięte technicznie, realizujące sterowanie wektorowe [3].

Schemat blokowy układu sterowania skalarnego realizowanego według zasady $U_s/f_s = \text{const}$ lub z zachowaniem stałej wartości strumienia stojana w całym zakresie regulacji przedstawiono na rysunku 13.5.



Rys. 13.5. Schemat ideowy sterowania skalarnego falownikiem MSI:

P – prostownik, FN – falownik, UO – układ wyboru opcji, ZF – nieliniowy zadajnik amplitudy napięcia stojana, US – układ sterowania falownikiem, RM – regulator momentu, R ω – regulator prędkości

W układach napędowych z falownikami MSI o sterowaniu skalarnym realizowana jest najczęściej przybliżona stabilizacja prędkości zadanej (bez jej pomiaru i realizacji sprzężenia zwrotnego), przez kompensację spadku napięcia na rezystancji stojana

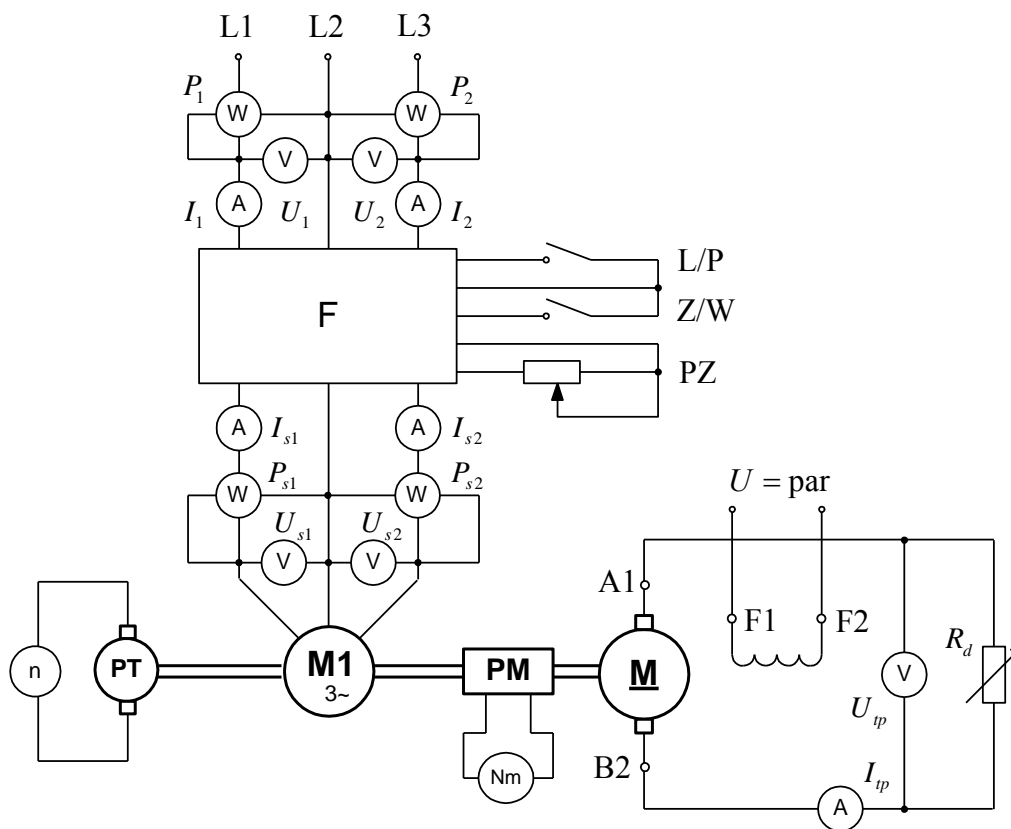
silnika oraz programowe zwiększanie częstotliwości zadanej o Δf , odpowiadającej wzrostowi częstotliwości poślizgu wskutek jego obciążenia.

Możliwa jest także realizacja zamkniętych układów regulacji z wykorzystaniem pomiaru prędkości silnika ω lub rozwijanego momentu M .

13.3. Instrukcja

13.3.1. Opis stanowiska pomiarowego

Schemat ideowy laboratoryjnego układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 13.6.



Rys. 13.6. Schemat układu pomiarowego

Badany silnik indukcyjny klatkowy jest zasilany z falownika napięcia o modulowanej szerokości impulsów wyjściowych. Obciążenie silnika stanowi maszyna prądu stałego hamowana dynamicznie. Energia hamowania wytracana jest w rezystorze R_d . Moment badanego silnika mierzony jest momentomierzem PM, zainstalowanym na wale silnika. Do pomiaru prądu, napięcia i mocy silnika należy użyć przyrządów dostosowanych do pomiaru wielkości odkształconych o zmiennej częstotliwości.

13.3.2. Wyznaczenie charakterystyk napędu przy biegu jałowym

Wyznaczenie charakterystyk sterowania napędu

W układzie pokazanym na rysunku 13.6, przy momencie obciążenia silnika $M_o = 0$, należy zmieniać zadajnikiem PZ częstotliwość wyjściową falownika od 2 do 50 Hz, mierząc napięcie wyjściowe międzyfazowe U_s oraz prąd silnika I_s . Wyniki pomiarów zestawić w tabeli 13.1.

Tabela 13.1

Lp.	f_s	U_s	I_s	n	ω	Uwagi
	Hz	V	A	obr/min	rad/s	

Na podstawie pomiarów wykreślić charakterystyki $U_s = f(f_s)$, $\omega = f(f_s)$ oraz $I_s = f(f_s)$.

Wyznaczenie charakterystyk mechanicznych napędu

Charakterystyki mechaniczne silnika klatkowego zasilanego z falownika należy wyznaczyć dla częstotliwości stojana f_s równej 5 Hz, 30 Hz i 50 Hz, mierząc dodatkowo moc na wejściu i na wyjściu falownika. Wyniki pomiarów zestawić w tabeli 13.2.

Tabela 13.2

Lp.	f_s	U_1	U_2	I_1	I_2	P_1	P_2	P	U_{s1}	U_{s2}	I_{s1}	I_{s2}	P_{s1}	P_{s2}	P_s	M	n	ω	η_c	η_f
	Hz	V	V	A	A	W	W	W	V	V	A	A	W	W	W	Nm	obr/min	rd/s	-	-

$$\eta_c = \frac{P_w}{P} = \frac{M \omega}{P_1 + P_2} \quad \text{– sprawność całego układu napędowego,}$$

$$\eta_f = \frac{P_s}{P} = \frac{P_{s1} + P_{s2}}{P_1 + P_2} \quad \text{– sprawność falownika,}$$

- P_w – moc oddawana przez silnik,
 P – moc pobierana przez układ napędowy z sieci,
 P_s – moc pobierana przez silnik z falownika.

Na podstawie uzyskanych wyników wykreślić charakterystyki:

$$\omega = f(M), \eta_c = f(M) \text{ i } \eta_f = f(M) \text{ dla } f_s = \text{const.}$$

13.3.3. Rejestracja przebiegów

Za pomocą przetworników prądowych i napięciowych LEM należy zarejestrować przebiegi prądu I_s , napięcia U_s międzyfazowego i U_{fs} fazowego, przy częstotliwości wyjściowej falownika odpowiednio 5 Hz, 30 Hz i 50 Hz i jednakowych wartościach prądu obciążenia silnika. Zarejestrować przebiegi prądu I_s i napięcia U_s przy nawrocie silnika. Omówić uzyskane przebiegi.

13.4. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy zamieścić:

1. Schemat blokowy badanego układu napędowego.
2. Parametry maszyn i falownika.
3. Wykaz aparatury pomiarowej.
4. Wyznaczone na podstawie pomiarów i obliczeń charakterystyki.
5. Przebiegi zarejestrowane podczas ćwiczenia.
6. Omówienie uzyskanych wyników pomiarowych.
7. Własne uwagi i wnioski.

13.5. Zagadnienia i pytania kontrolne

1. Omówić przemienniki częstotliwości stosowane do sterowania silników indukcyjnych klatkowych.
2. Jak realizowane jest sterowanie częstotliwościowe w napędach indywidualnych i grupowych?
3. Jakie różnice w charakterystykach mechanicznych wystąpią przy sterowaniu silnika indukcyjnego według zasady $U_s/f_s = \text{const}$ oraz z kompensacją spadku napięcia na rezystancji stojana?

4. Omówić sposób określania sprawności układu napędowego z silnikiem klatkowym zasilanym z falownika.

Literatura

- [1] Kędzior W., *Podstawy napędu elektrycznego*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980.
- [2] *Laboratorium napędu elektrycznego*, praca zbiorowa pod redakcją W. Kędziora, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1986.
- [3] Tunia H., Kaźmierkowski M., *Automatyka napędu przekształtnikowego*, PWN, Warszawa 1987.
- [4] Tunia H., Kaźmierkowski M., *Podstawy automatyki napędu elektrycznego*, PWN, Warszawa–Poznań 1977.