

Ćwiczenie 15

Układ kaskadowy silnika indukcyjnego pierścieniowego na stały moment

15.1. Program ćwiczenia

1. Zapoznanie się z budową i działaniem układu napędowego kaskady zaworowej stałego momentu.
2. Wyznaczanie charakterystyk mechanicznych układu otwartego i zamkniętego regulacji prędkości kątowej.
3. Wyznaczanie charakterystyki regulacyjnej kaskady.
4. Wyznaczenie wskaźników energetycznych kaskady zaworowej stałego momentu.

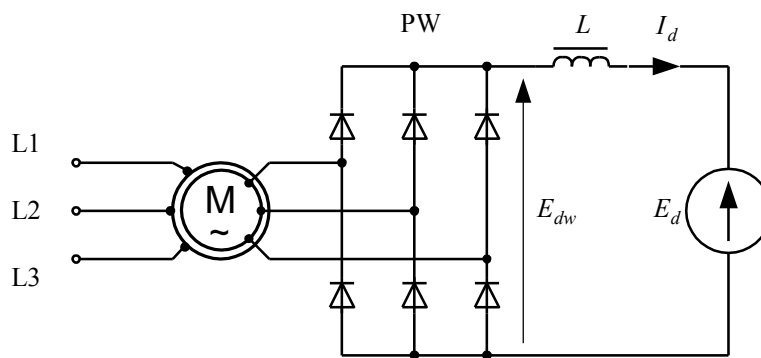
15.2. Wiadomości teoretyczne

15.2.1. Zasada działania

Jednym ze sposobów regulacji momentu silnika indukcyjnego pierścieniowego, a tym samym jego prędkości kątowej, jest wprowadzenie dodatkowego źródła napięcia sinusoidalnego do obwodu wirnika. Źródło dodatkowego napięcia trójfazowego powinno stwarzać możliwość regulacji wartości amplitudy, częstotliwości, a także fazy w stosunku do napięcia wirnika silnika.

Prostszym rozwiązaniem, ograniczającym jednak możliwości regulacyjne silnika, jest zastosowanie prostownika niesterowanego w obwodzie wirnika i wprowadzenie do obwodu pośredniego prądu stałego dodatkowego, regulowanego źródła napięcia stałego E_d . Schemat ideowy takiego układu przedstawiono na rysunku 15.1.

Prostownik wirnikowy PW łączy galwanicznie dwa obwody: obwód prądu przemiennego wirnika, w którym działa SEM E_{r0s} oraz obwód prądu stałego z napięciem E_{dw} , równym wyprostowanemu napięciu wirnika i z dodatkowym napięciem E_d . W rezultacie tego połączenia istnieje ścisła zależność pomiędzy prądem wirnika I_r oraz prądem obwodu pośredniego I_d . Prąd I_d płynie pod wpływem różnicy napięć – wyprostowanego napięcia obwodu wirnika E_{dw} i dodatkowego napięcia E_d . Prąd I_d płynie do źródła o napięciu E_d , które jest wtedy odbiornikiem mocy poślizgu silnika. W najprostszym rozwiązaniu odbiornikiem tym może być akumulator lub maszyna prądu stałego. W praktycznych rozwiązaniach odbiornikiem mocy poślizgu jest prostownik sterowany pracujący w zakresie pracy falownikowej. Zastosowanie w obwodzie wirnika silnika pierścieniowego prostownika niesterowanego powoduje, że nie jest możliwe dostarczanie energii ze źródła E_d do silnika, lecz jedynie przekazywanie mocy poślizgu przez prostownik sterowany z powrotem do sieci zasilającej.

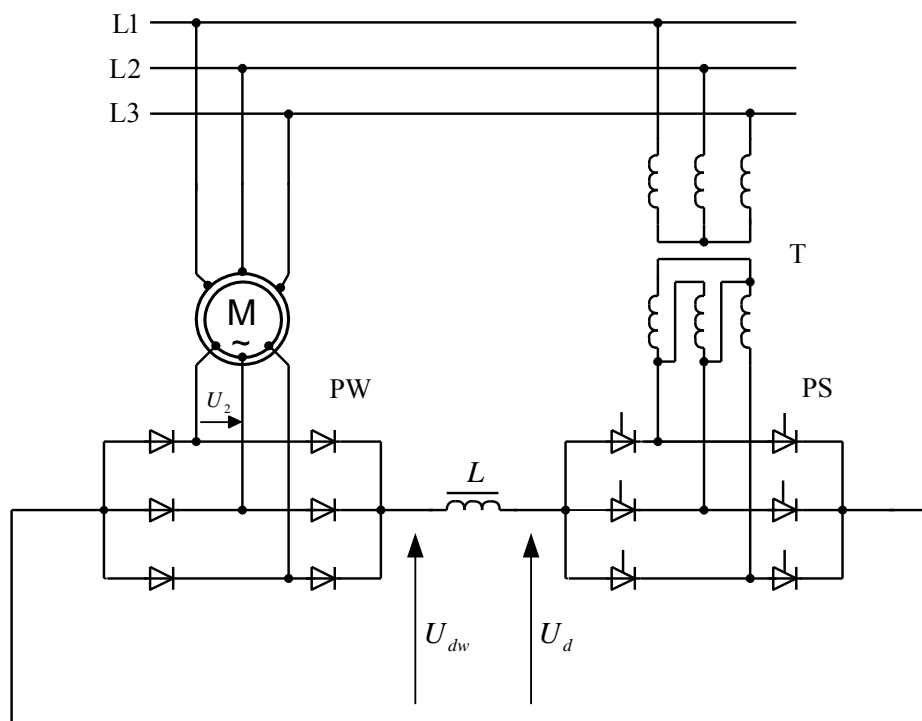


Rys. 15.1. Schemat ideowy układu regulacji prędkości silnika indukcyjnego pierścieniowego z dodatkowym napięciem E_d w obwodzie wyprostowanego prądu wirnika

Tego typu rozwiązania noszą nazwę kaskadowych układów napędowych stałego momentu. Kaskadowe układy napędowe mają wiele odmian konstrukcyjnych, z których najbardziej rozpowszechnionymi są kaskady podstawowe oraz kaskady skompensowane stałego momentu. Na rysunku 15.2 przedstawiono schemat ideowy kaskady podstawowej stałego momentu.

Napięcie dodatkowe U_d ($U_d = E_d - \Delta U_{ps}$) w układzie pokazanym na rysunku 15.2 uzyskuje się z prostownika sterowanego PS, pracującego w zakresie pracy falownikowej. Prostownik sterowany zasilany jest z sieci przez transformator dopasowujący T, którego zadaniem jest dopasowanie napięcia strony wtórnej transformatora do napięcia równego napięciu wirnika.

Maksymalna wartość napięcia wirnika wynika z przyjętego zakresu regulacji prędkości kątowej kaskady. Kaskady praktycznie nie pracują w pełnym zakresie regulacji prędkości. Najczęściej zakres ten wynosi 3:1 lub 2:1.



Rys. 15.2. Układ kaskady podstawowej stałego momentu

Przekładnię transformatora dopasowującego przy zastosowaniu przekształtników o identycznej liczbie pulsów $m_p = 6$ można określić wzorem

$$g = \frac{U_1 \cos \alpha_{\min}}{U_{rN} s_{\max}}, \quad (15.1)$$

w którym:

U_1 – napięcie zasilające transformator dopasowujący,

U_{rN} – napięcie znamionowe wirnika,

s_{\max} – maksymalny poślizg silnika przy minimalnym kącie wysterowania tyrystorów α_{\min} .

Jak wynika ze wzoru (15.1), dzięki odpowiednio dobranemu napięciu wirnika silnika indukcyjnego pierścieniowego możliwe jest zrezygnowanie z transformatora dopasowującego. Dotyczy to zwłaszcza silników niskonapięciowych.

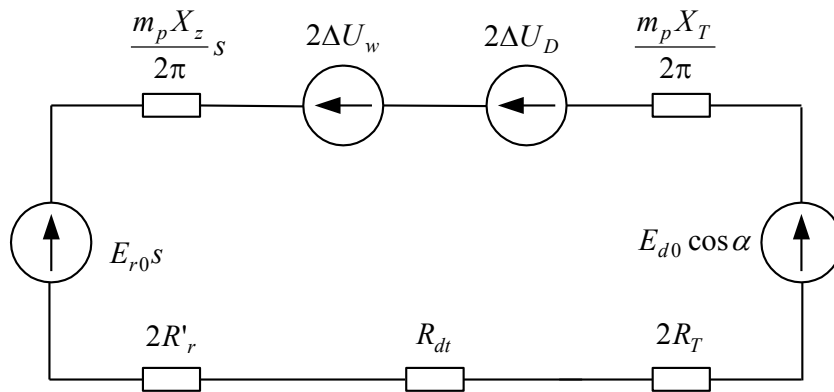
W obwodzie pośrednim prądu stałego zastosowany jest dławik o dużej indukcyjności L , który zapewnia ciągłość prądu w obwodzie oraz ograniczenie wyższych harmonicznych prądu. Dławik ten ogranicza również wartości prądów zwarciovych przy kątach wysterowania $\alpha < 90^\circ$ przekształtnika PS. Zbyt duża indukcyjność dławika powoduje jednak wzrost stałej czasowej układu napędowego, a także

zwiększenie strat w samym dławiku. Przyjmuje się, że wartość indukcyjności dławika powinna wynosić: $L = 4 \div 5 L_2$, gdzie L_2 – indukcyjność dwóch faz wirnika silnika pierścieniowego.

Moc poślizgu P_s silnika pierścieniowego przekazywana jest do sieci zasilającej przez prostownik niesterowany, pośredni obwód prądu stałego, przekształtnik PS i transformator T.

15.2.2. Charakterystyki mechaniczne tyrystorowej kaskady stałego momentu

Na rysunku 15.3. przedstawiono schemat zastępczy tyrystorowej kaskady stałego momentu, w którym wszystkie parametry silnika i transformatora dopasowującego zostały sprowadzone do obwodu prądu stałego.



Rys. 15.3. Schemat zastępczy obwodu prądu stałego kaskady tyrystorowej stałego momentu

Wartość prądu I_d w obwodzie pośrednim można określić z zależności

$$I_d = \frac{E_{r0} s - E_{d0} \cos \alpha - 2(\Delta U_{PW} + \Delta U_D)}{R_z}, \quad (15.2)$$

w której:

$$R_z = \frac{m_p X_z}{2\pi} s + \frac{m_p X_T}{2\pi} + 2(R'_r + R_T) + R_{dt}, \quad (15.3)$$

$E_{r0} = 1,35 E'_{r0}$ – dla prostownika PW,

$E_{d0} = 1,35 E_{2T}$ – dla przekształtnika PS,

E'_{r0}, E_{2T} – siła elektromotoryczna wirnika oraz napięcie fazowe uzwojenia wtórnego transformatora,

$\Delta U_{PW}, \Delta U_D$ – spadki napięcia na zaworach prostownika sterowanego i niesterowanego,
 R'_r, R_T, X_z, X_T – odpowiednio rezystancje i reaktancje faz silnika oraz transformatora, sprowadzone do obwodu wirnika.

Dla prędkości silnika $\omega = 0$ ($s = 1$) średnia wartość napięcia na wyjściu prostownika PW

$$E_{d\max} = 1,35 E'_{r0} = E_{r0}, \quad (15.4)$$

natomiast przy dowolnej prędkości silnika

$$E_{d0} = s \cdot 1,35 E'_{r0} = s \cdot E_{r0}. \quad (15.5)$$

Jeżeli napięcie E_d będzie równe napięciu E_{d0} , to prąd w obwodzie pośrednim $I_d = 0$. Także prąd wirnika silnika $I_r = 0$ i silnik nie rozwinie momentu. Stan ten odpowiada idealnemu biegowi jałowemu silnika.

Pomijając spadki napięcia na zaworach, można przyjąć, że poślizg idealnego biegu jałowego kaskady

$$s_{0k} E_{d\max} = E_{d0} \cos \alpha, \quad (15.6)$$

skąd

$$s_{0k} = \frac{E_{d0} \cos \alpha}{E_{d\max}}. \quad (15.7)$$

Jeżeli

$$\omega_{0k} = \omega_{0s} (1 - s_{0k}),$$

to prędkość idealnego biegu jałowego kaskady odpowiadająca poślizgowi s_{0k}

$$\omega_{0k} = \omega_{0s} \left(1 - \frac{E_{d0} \cos \alpha}{E_{d\max}} \right), \quad (15.8)$$

gdzie ω_{0s} – prędkość synchroniczna silnika.

Z zależności (15.8) wynika, że po zmianie wartości napięcia E_d przez zmianęysterowania tyrystorów przekształtnika PS można uzyskać różne prędkości idealnego biegu jałowego kaskady.

Dla kąta $\alpha = 90^\circ$ ($E_d = 0$) uzyskuje się największą wartość prędkości silnika kaskady. Wzrostowi kątaysterowania α odpowiada zmniejszanie się prędkości silnika w układzie kaskadowym. Z powyższych zależności wynika również, że maksymalny poślizg silnika w układzie kaskady zależy od napięcia strony wtórnej transformatora dopasowującego U_{T0} .

Moment elektromagnetyczny silnika w układzie kaskady można wyrazić wzorem

$$M_e = \frac{(E'_{r0})^2 R_{z0}}{\omega_0 R_z^2} (s - s_0), \quad (15.9)$$

w którym

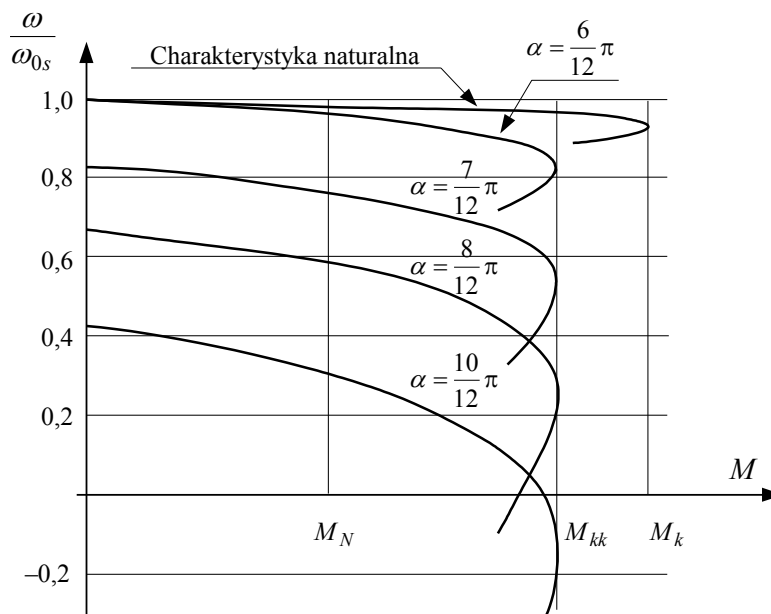
$$R_{z0} = \frac{3X_z}{\pi} s_0 + \frac{3X_T}{\pi} + 2(R_r + R_T) + R_{dl}. \quad (15.10)$$

Moment krytyczny silnika w układzie kaskadowym określony jest wzorem

$$M_{kk} = \frac{3}{\pi} M_k, \quad (15.11)$$

w którym M_k – moment krytyczny silnika.

W zależności (15.11) nie uwzględniono oddziaływania wyższych harmonicznych prądu w obwodzie. W wyniku tego oddziaływania moment krytyczny silnika w układzie kaskadowym jest mniejszy niż to wynika z tej zależności. W praktycznych układach obniżenie momentu krytycznego może dochodzić do 17%. Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego pierścieniowego pracującego w układzie kaskady zaworowej przedstawiono na rysunku 15.4.



Rys. 15.4. Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego pierścieniowego w układzie kaskady zaworowej stałego momentu

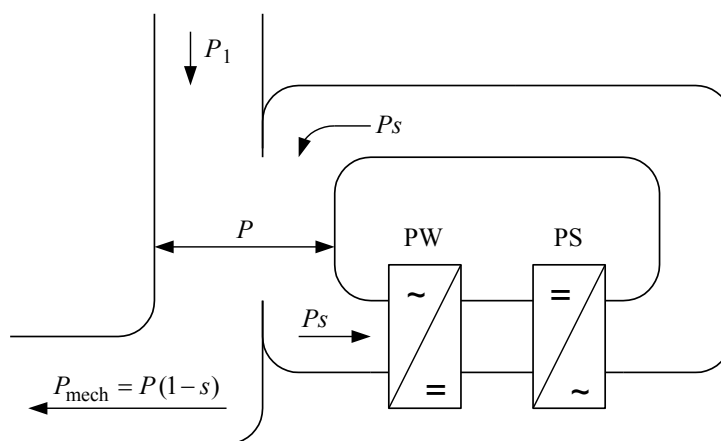
Sztywność charakterystyk mechanicznych silnika indukcyjnego w kaskadzie jest mniejsza niż jego charakterystyki naturalnej i maleje wraz ze zmniejszeniem prędkości. Przyczyną zwiększonego nachylenia są dodatkowe rezystancje dławika i transformatora wprowadzone do obwodu wirnika. Wraz z obniżeniem prędkości rośnie

ponadto udział reaktancji (sX_c), co powoduje dodatkowe pogorszenie sztywności charakterystyk mechanicznych.

15.2.3. Wskaźniki energetyczne układu kaskadowego

Bilans rozplywu mocy czynnej w kaskadzie stałego momentu przedstawiono schematycznie w postaci tzw. wykresu Sankeya na rysunku 15.5.

Moc mechaniczna $P(1 - s)$ jest oddawana na wał maszyny roboczej, natomiast moc poślizgu Ps jest oddawana do sieci.



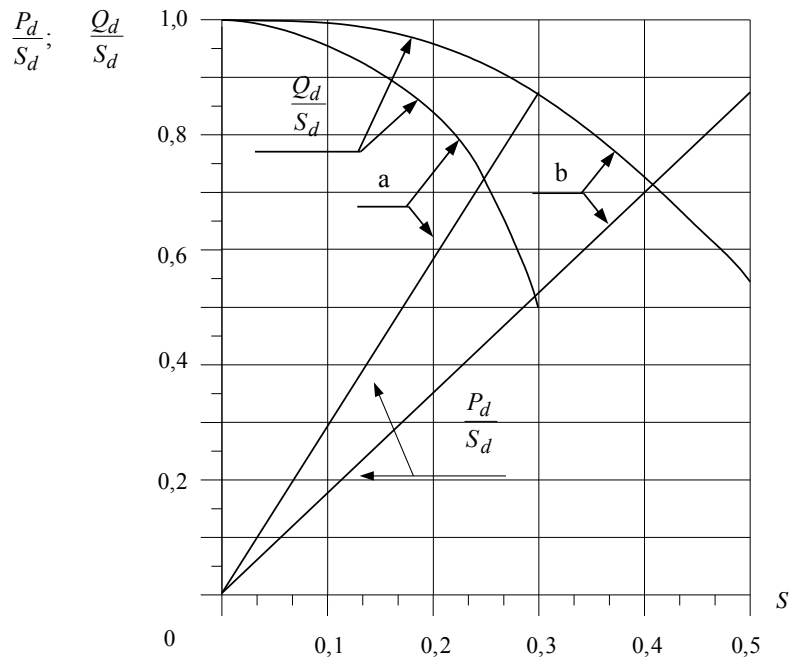
Rys. 15.5. Bilans mocy czynnej w układzie kaskady zaworowej typu $M = \text{const}$

Na podstawie analizy wykresu łatwo można stwierdzić, że moment na wale silnika kaskady przy różnych prędkościach jest stały

$$M = \frac{P(1-s)}{\omega_0(1-s)} = \text{const.} \quad (15.12)$$

Ze względu na indukcyjny charakter odbiornika, jakim jest kaskada, pobór mocy związany jest z przesunięciem fazowym prądu względem napięcia o kąt φ . Obecność w obwodzie wirnika prostownika PW oraz duża indukcyjność dławika powodują odkształcenie prądu wirnika, a tym samym również prądu stojana silnika indukcyjnego. Odkształcenie wprowadza również zespół prostownik sterowany–transformator dopasowujący. Prąd pobierany przez układ kaskadowy jest więc prądem odkształconym, zawierającym wyższe harmoniczne, których wartość jest funkcją kąta załączenia tyristorów α w prostowniku PS i wartości momentu obciążenia M_o . Wypadkowy kąt fazowy układu φ_u zależy od kąta fazowego silnika oraz przekształtnika φ_p . W szczególności kąt fazowy przekształtnika φ_p zależy istotnie od kąta wysterowania

zaworów. W rezultacie układ kaskadowy, a zwłaszcza układ kaskady podstawowej jest źródłem wyższych harmonicznych i charakteryzuje się znacznym poborem mocy biernej. Na rysunku 15.6. przedstawiono przykładowe zależności poboru mocy biernej i czynnej przez układ kaskady podstawowej.



Rys. 15.6. Charakterystyki poboru mocy czynnej i biernej przez układ kaskady stałego momentu dla różnego poślizgu maksymalnego (różnego zakresu regulacji):
a) $s_{\max} = 0,3$, b) $s_{\max} = 0,5$

Dla maksymalnej prędkości kątowej moc bierna pobierana przez przekształtnik PS przyjmuje największą wartość

$$Q_{d \max} = S_d,$$

oraz

$$\frac{P_d}{S_d} = \cos \alpha = \frac{\cos \alpha_{\max}}{s_{0 \max}} s,$$

$$\frac{Q_d}{S_d} = \sin \alpha = \sin \left[\arccos \left(\frac{\alpha_{\max}}{s_{0 \max}} s \right) \right]. \quad (15.13)$$

Silnik indukcyjny pierścieniowy zasilany jest z sieci prądu przemiennego o stałych parametrach. W obwodzie wirnika znajduje się prostownik diodowy PW oraz rezystor rozruchowy R_d , wyłączany łącznikiem W2. Z sieci zasilającej prądu przemiennego zasilany jest także transformator T, współpracujący z przekształtnikiem tyrystorowym PS. Po stronie zasilania silnika i transformatora zainstalowane są mierniki prądu, napięcia i mocy.

Z silnikiem kaskady sprzęgnięta jest mechanicznie prądnica obcowzbudna prądu stałego P, stanowiąca obciążenie układu napędowego. W czasie pracy kaskady prądnica oddaje energię do rezystora obciążenia R_o .

Załączanie kaskady do pracy odbywa się za pomocą wyłącznika W1. Po dokonanym rozruchu wyłącza się łącznik W2, odłączając rezystor rozruchowy.

Wartość napięcia wyjściowego E_d z przekształtnika PS reguluje się przez zmianę nastawy potencjometru regulacyjnego – zadajnika prędkości kątowej.

15.3.2. Wyznaczanie charakterystyki regulacyjnej kaskady

Charakterystykę regulacyjną, jako zależność prędkości kątowej od kąta wysterowania α przekształtnika PS, należy wyznaczyć przy biegu jałowym silnika kaskady. Wyniki pomiarów należy zestawić w tabeli 15.1. Na podstawie pomiarów wykreślić zależność $\omega_{ok} = f(\alpha)$. Ocenic prawidłowy dobór napięcia wtórnego transformatora dopasowującego w porównaniu z wartością napięcia wirnika silnika indukcyjnego.

Tabela 15.1

Lp.	U_{dw}	U_d	α	n	ω	Uwagi
	V	V	°	obr/min	rd/s	

15.3.3. Wyznaczenie charakterystyk mechanicznych i sprawności układu otwartego kaskady zaworowej

Dla układu kaskady pokazanego na rysunku 15.7 należy wyznaczyć charakterystyki mechaniczne, a następnie sprawność i współczynnik mocy dla trzech różnych wartości kąta wysterowania α , odpowiadającego trzem różnym prędkościom biegu jałowego kaskady. Wyniki pomiarów należy zestawić w tabeli 15.2.

Na podstawie wyników pomiarów wykreślić charakterystyki $\omega = f(M)$, $\eta = f(M)$ i $\cos \varphi = f(M)$.

Tabela 15.2

Lp.	U	I_1	P_{1S}	P_{2S}	P_S	P_{1T}	P_{2T}	P_T	n	ω	M	I_{M1}	U_{M1}	η	$\cos \varphi$
	V	A	W	W	W	W	W	W	obr/min	rd/s	Nm	A	V	–	–

15.3.4. Wyznaczanie charakterystyk mechanicznych i sprawności zamkniętego układu sterowania kaskady zaworowej

W zamkniętym układzie regulacji prędkości kątovej należy wyznaczyć charakterystyki mechaniczne, sprawność i współczynnik mocy układu dla trzech wartości zadanej prędkości biegu jałowego silnika kaskady.

Wyniki pomiarów zanotować w tabeli takiej, jak tabela 15.2. Na podstawie pomiarów należy wykreślić charakterystyki $\omega = f(M)$, $\eta = f(M)$ i $\cos \varphi = f(M)$. Porównać uzyskane wyniki dla układu otwartej oraz zamkniętego i omówić je. Porównać charakterystyki mechaniczne kaskady z charakterystyką naturalną silnika indukcyjnego.

15.4. Sprawozdanie

1. W sprawozdaniu należy zamieścić:
2. Parametry maszyn i urządzeń kaskady zaworowej.
3. Wykaz aparatury pomiarowej.
4. Wyznaczone charakterystyki mechaniczne i regulacyjne.
5. Omówienie uzyskanych wyników i ocenę regulacji prędkości w układzie kaskady podstawowej stałego momentu.
6. Własne spostrzeżenia i wnioski.

15.5. Zagadnienia kontrolne

1. Podać zasadę regulacji prędkości kątovej silnika pierścieniowego w układzie kaskady zaworowej stałego momentu.
2. Omówić zasadę pracy przekształtnika sterowanego w układzie kaskady zaworowej.
3. Podać rolę dławika w obwodzie pośrednim prądu stałego kaskady.
4. Omówić cel stosowania transformatora dopasowującego w kaskadzie stałego momentu.
5. Podać i omówić schemat zastępczy kaskady zaworowej na stały moment.

Literatura

- [1] Kędzior W., *Podstawy napędu elektrycznego*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980.
- [2] Koczara W., *Kaskadowe układy napędowe z przekształtnikami tyrystorowymi*, WNT, Warszawa 1978.
- [3] *Laboratorium napędu elektrycznego*, praca zbiorowa pod redakcją H. Bitela, PWN, Warszawa–Poznań 1977.
- [4] Sidorowicz J., Ruda A., Szulc Z., *Laboratorium napędu elektrycznego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996.