

Ćwiczenie 14

Układ kaskadowy silnika indukcyjnego pierścieniowego na stałą moc

14.1. Program ćwiczenia

1. Poznanie struktury układu pomiarowego, budowy i właściwości napędowych kaskady zaworowo-maszynowej typu $P = \text{const}$.
2. Wyznaczenie charakterystyk biegu jałowego $\omega = f(I_w)$, $I_t = f(\omega)$, $U_t = f(\omega)$.
3. Wyznaczenie charakterystyk mechanicznych $\omega = f(M_o)$.
4. Wyznaczenie współczynnika mocy $\cos \varphi = f(M_o)$ i sprawności $\eta = f(M_o)$ układu kaskadowego.

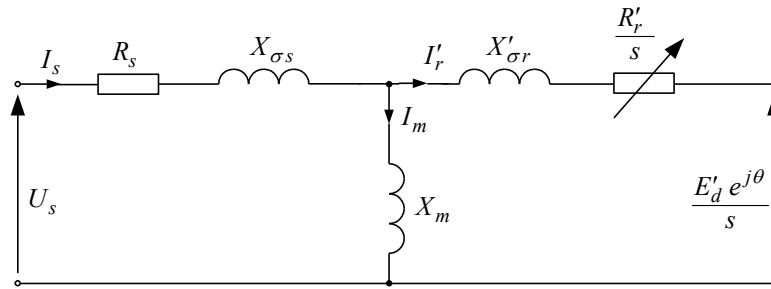
14.2. Wiadomości teoretyczne

14.2.1. Zasada regulacji prędkości kątowej w układzie kaskadowym

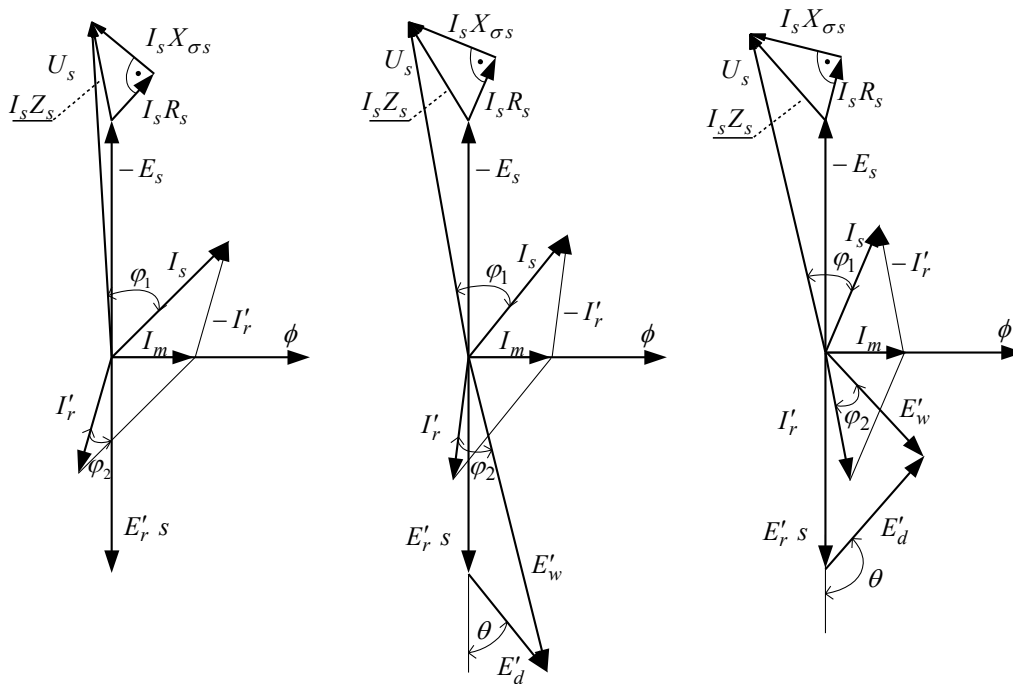
Prędkość silnika indukcyjnego pierścieniowego można regulować przez zmianę poślizgu w tzw. układach kaskadowych. Jest to sposób podobny do regulacji prędkości za pomocą dodatkowej rezystancji w obwodzie wirnika. W obu sposobach regulacji wpływa się na zmianę prądu I_r w obwodzie wirnika, przy czym różnica polega na tym, że w układach kaskadowych moc poślizgu nie jest tracona na dodatkowej rezystancji, a oddawana w postaci mocy elektrycznej do sieci w przypadku kaskady stałego momentu $M = \text{const}$ lub mocy mechanicznej oddawanej na wał silnika indukcyjnego w przypadku kaskady stałej mocy $P = \text{const}$.

Zasada regulacji prędkości w klasycznym, maszynowym układzie kaskadowym polegała na wprowadzeniu do obwodu wirnika dodatkowej siły elektromotorycznej E_d

o częstotliwości równej częstotliwości SEM wirnika E'_r i o zmiennej amplitudzie oraz fazie [1]–[4]. Na rysunku 14.1 przedstawiono schemat zastępczy silnika pierścieniowego z dodatkową SEM E_d przesuniętą względem SEM wirnika E'_r o kąt θ . Odpowiednie wykresy wektorowe dla różnych wartości E_d i θ przedstawiono na rysunku 14.2.



Rys. 14.1. Schemat zastępczy silnika indukcyjnego pierścieniowego z dodatkową siłą elektromotoryczną E_d w obwodzie wirnika



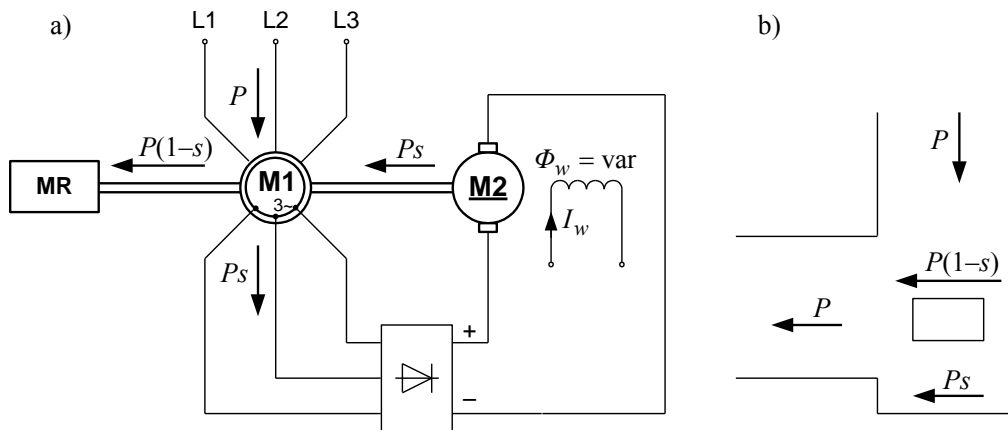
Rys. 14.2. Wykresy wektorowe silnika pierścieniowego przy różnych SEM E_d w obwodzie wirnika:
a) $E_d = 0$, b) $E_d > 0$, $\theta < \pi/2$, c) $E_d > 0$, $\theta > \pi/2$

Jeżeli kąt $\Theta < \frac{\pi}{2}$ (rys. 14.2b), to wprowadzenie E_d do obwodu wirnika powoduje wzrost wypadkowej SEM E_w . Przy założeniu stałej wartości impedancji wirnika ze wzrostem E_w zwiększy się prąd wirnika I'_r , a tym samym moment rozwijany przez silnik, co doprowadzi do wzrostu prędkości kątowej układu.

Przy małych kątach Θ i $E_w > E'_{r,s}$ równowaga momentu elektromagnetycznego i oporowego nastąpi przy ujemnym poślizgu, tj. przy prędkościach nadsynchronicznych. Jeżeli kąt $\Theta < \frac{\pi}{2}$ (rys. 14.2c), to wypadkowa SEM E_w zmniejszy się, prąd I'_r i moment zmaleją, co doprowadzi do zmniejszenia prędkości kątowej silnika. Przy odpowiednio dobranej wielkości dodatkowej SEM E_w i kąta Θ można układ napędowy zatrzymać i przeprowadzić jego nawrót.

We współczesnych kaskadach jednotwornikową przetwornicę maszynową zastąpiono prostownikiem sterowanym lub niesterowanym, co znacznie obniżyło koszt układu i umożliwiło powszechniejsze zastosowanie układów kaskadowych.

W kaskadzie zaworowo-maszynowej na stałą moc SEM E'_r jest prostowana za pomocą prostownika niesterowanego i dodawana jest do niej SEM obcowzbudnej pomocniczej maszyny prądu stałego, która pracuje na wspólnym wale z maszyną indukcyjną pierścieniową. Wobec tego moc poślizgu nie jest tracona bezużytecznie, lecz oddawana na wał maszyny jako moc mechaniczna (rys. 14.3).



Rys. 14.3. Kaskada zaworowo-maszynowa $P = \text{const}$: a) schemat ideowy, b) bilans mocy

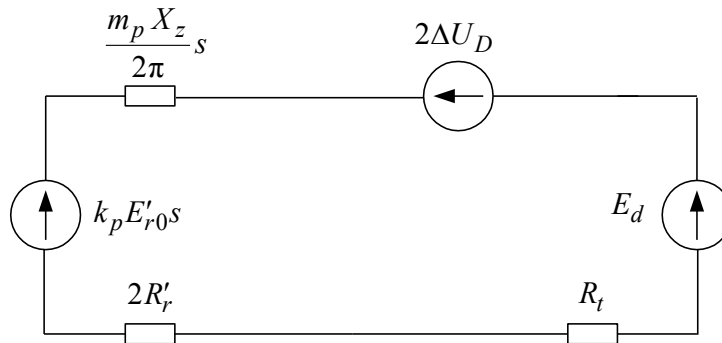
Kaskada na stałą moc jest nazwana tak dlatego, że – przy założeniu pominięcia strat mocy w układzie napędowym – całkowita moc elektryczna pobrana przez silnik indukcyjny z sieci jest zamieniana na moc mechaniczną przekazywaną do maszyny roboczej. Jeśli uwzględni się, że moc mechaniczna na wale silnika indukcyjnego wy-

nosi $P(1 - s)$, a maszyna prądu stałego przekazuje na wał moc mechaniczną równą mocy poślizgu Ps , to spełniony jest zawsze warunek

$$P = P(1 - s) + Ps = P = \text{const.} \quad (14.1)$$

Bilans mocy według tej zależności przedstawiono graficznie na rysunku 14.3b. Za ekonomiczny zakres prędkości kątowej przyjmuje się przedział 1:1,5÷1:2, ze względu na wymagania dotyczące maszyny pomocniczej prądu stałego [4]. Układy kaskadowe typu $P = \text{const}$ stosuje się zatem w napędach wielkich mocy, w których – przy małym zakresie regulacji – zachodzi potrzeba ciągłej zmiany prędkości kątowej. Są to na przykład napędy pomp i wentylatorów, których moment mechaniczny obciążenia zmienia się z kwadratem prędkości kątowej. Moc maszyny pomocniczej dobiera się (na ogół) według kryterium maksymalnej mocy poślizgowej występującej podczas regulacji prędkości kątowej kaskady.

Sterowanie prędkością kaskady zaworowo-maszynowej typu $P = \text{const}$ realizuje się przez zmianę prądu wzbudzenia I_w obcowzbudnej maszyny prądu stałego M2. Regulując wartość prądu I_w , zmienia się wartość strumienia Φ_w , a tym samym siłę elektromotoryczną $E_M = E_d = k_p \Phi_w \omega$, czyli SEM dodatkową w obwodzie prądu stałego. Schemat zastępczy obwodu wirnika silnika indukcyjnego kaskady, z uwzględnieniem prostownika, przedstawiono na rysunku 14.4.



Rys. 14.4. Schemat zastępczy obwodu prądu stałego kaskady zaworowo-maszynowej stałej mocy

Średnią wartość prądu wyprostowanego I_d określa zależność

$$I_d = \frac{k_p E'_r 0 s - E_d - 2\Delta U_D}{R_z}, \quad (14.2)$$

w której:

$$k_p = \sqrt{6} \frac{m_p}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_p} \cong 2,34 \quad (\text{dla } m_p = 6),$$

- m_p – liczba pulsów prostownika,
 E_d – dodatkowa siła elektromotoryczna,
 ΔU_D – spadek napięcia na diodach prostownika,
 R_z – rezystancja zastępcza

$$R_z = \frac{m_p X_z}{2\pi} s + 2R_r' + R_t, \quad (14.3)$$

- R_t – rezystancja twornika maszyny prądu stałego,
 X_z – reaktancja zastępcza silnika sprowadzona do obwodu wirnika

$$X_z = X_{\sigma r} + X_{\sigma s} \frac{1}{g_e^2}, \quad (14.4)$$

- g_e – przekładnia napięciowa silnika indukcyjnego.

Po założeniu $I_d = 0$ otrzymuje się

$$k_p E_{r0}' s_{0k} = E_M = k_e \Phi_w \omega_{0k}, \quad (14.5)$$

a po uwzględnieniu, że

$$s_{0k} = \frac{\omega_{0s} - \omega_{0k}}{\omega_{0s}} \quad (14.6a)$$

oraz

$$k_e \Phi_w \omega_{0k} = E_{M0}, \quad (14.6b)$$

stosunek prędkości biegu jałowego kaskady do prędkości synchronicznej silnika indukcyjnego

$$\frac{\omega_{0k}}{\omega_{0s}} = \frac{k_p E_{r0}'}{k_p E_{r0}' - E_{M0}} = \frac{k_p E_{r0}'}{k_p E_{r0}' - k_e \Phi_w \omega_{0k}}. \quad (14.7)$$

Prędkość biegu jałowego kaskady jest więc hiperboliczną funkcją strumienia magnetycznego maszyny pomocniczej M2 (rys. 14.5a).

Z przebiegu tej charakterystyki wynika, że w układzie kaskady na stałą moc nie można doprowadzić silnika indukcyjnego do prędkości $\omega = 0$.

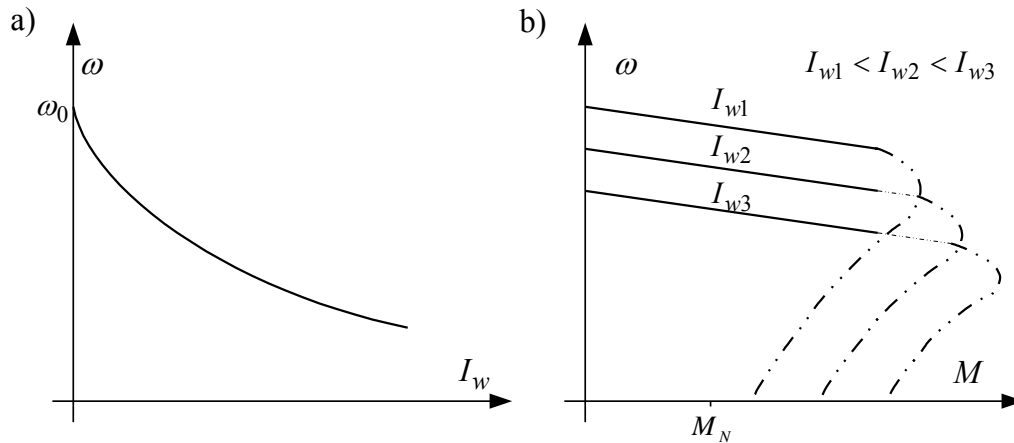
Przykładowe przebiegi charakterystyk mechanicznych układu kaskadowego dla różnych prądów wzbudzenia pokazano na rysunku 14.5b.

Charakterystyki te w zakresie roboczym zachowują swój charakter przebiegu, tj. bocznikowy.

Poślizg idealnego biegu jałowego kaskady można przedstawić w postaci następującej zależności

$$s_{0k} = \frac{E_{M0}}{k_p E'_{r0} + E_{M0}} = \frac{\lambda}{1 + \lambda}, \quad (14.8)$$

przy czym $\lambda = \frac{E_{M0}}{k_p E'_{r0}}$.



Rys. 14.5. Charakterystyki eksploatacyjne kaskady $P = \text{const}$:
a) regulacyjna biegu jałowego, b) charakterystyki mechaniczne

Po przyjęciu dolnej granicy regulacji prędkości $\omega_{0k} = 0,5\omega_{0s}$, czyli $s_{0k} = 0,5$ ($\lambda = 1$), maszyna pomocnicza prądu stałego powinna być zwymiarowana na moc znamionową wynikającą z napięcia: $E_{M0N} = k_p E'_{r0}$, czyli moc silnika pomocniczego powinna być w tym przypadku równa mocy znamionowej silnika głównego. Przy dalszym, nawet niewielkim, zwiększeniu zakresu regulacji bardzo szybko zwiększa się moc znamionowa silnika pomocniczego M2. Wskutek tego w kaskadach zaworowo-maszynowych na stałą moc praca układu odbywa się w zakresie poślizgów idealnego biegu jałowego $s_{0k} \leq 0,5$.

14.3. Instrukcja

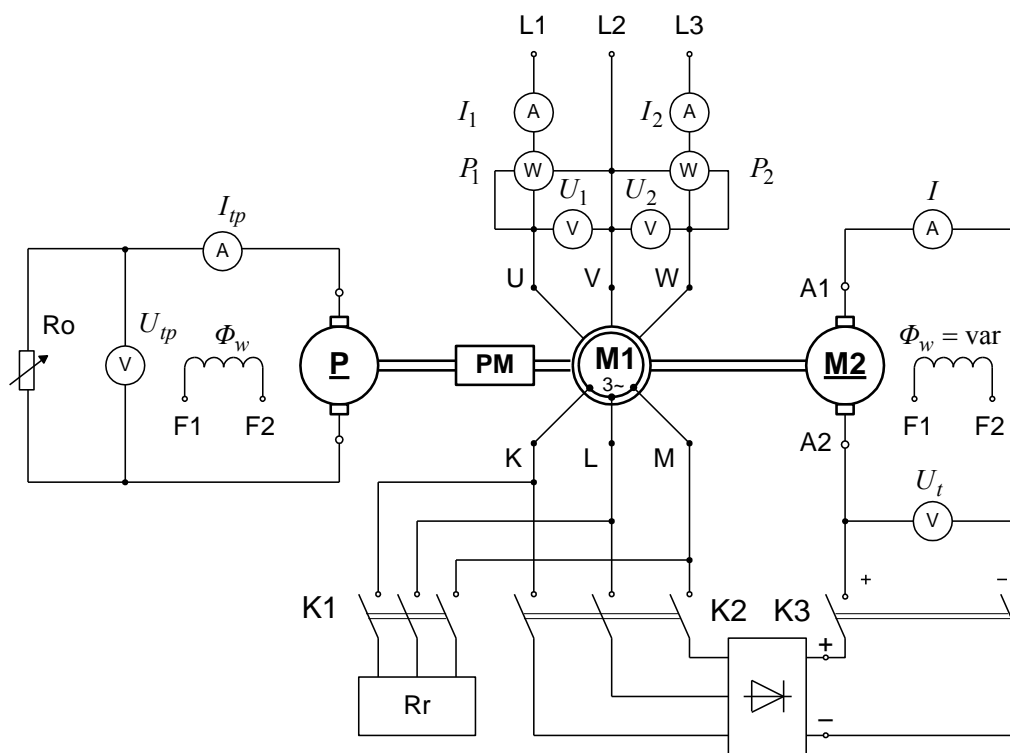
14.3.1. Opis układu pomiarowego

Schemat układu pomiarowego kaskady zaworowo-maszynowej przedstawiono na rysunku 14.6. Od strony stojana silnika indukcyjnego podłączony jest układ do pomiaru mocy, prądów i napięć. Zaciski maszyn, prostownika i styczników przełączających umieszczone są, wraz ze schematem mnemotechnicznym, na płycie czołowej stanowi-

ska laboratoryjnego. Na czas rozruchu wirnika silnika głównego dołączony jest rozrusznik rezystorowy (lub innego typu, pozostałe wyłączniki są otwarte).

Po rozruchu należy sprawdzić biegunowość napięć na wyjściu prostownika i napięcia twornika – ma być ona zgodna, maszyny pracują bowiem na wspólny wał. Następnie, przy prądzie wzbudzenia $I_w = 0$, należy podłączyć twornik maszyny prądu stałego do wyjścia prostownika, do wejścia prostownika zaś uzwojenie wirnika silnika indukcyjnego. W tym stanie kaskada jest gotowa do pracy.

W obwodzie twornika pomocniczej maszyny prądu stałego należy mierzyć prąd i napięcie twornika, w obwodzie wzbudzenia zaś prąd. Obciążenia maszyny roboczej (obcowzbudna maszyna prądu stałego) należy kontrolować, mierząc jej parametry w obwodzie twornika i wzbudzenia.



Rys. 14.6. Schemat pomiarowy układu kaskady zaworowo-maszynowej typu $P = \text{const}$

Do pomiaru momentu obciążenia można wykorzystać przetwornik momentu. Jeśli jest go brak, zastępczo określa się moment elektromagnetyczny silnika głównego (kaskady) według zależności

$$M_e = \frac{P_e}{\omega_0},$$

w której:

P_e – moc pola wirującego

$$P_e = P_1 + P_2 - \Delta P,$$

ω_0 – synchroniczna prędkość kątowna

$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_s,$$

ΔP_{Fe} – straty w żelazie (podane przez prowadzącego),

$\Delta P_s = 3I^2 R_s (75^\circ\text{C})$ – straty w uzwojeniu stojana,

P_1, P_2 – odpowiednie wskazania watomierzy (w układzie Arona) w obwodzie stojana silnika indukcyjnego,

$$\cos \varphi = \frac{P_1 + P_2}{\sqrt{3} UI}.$$

Sprawność układu kaskadowego wyznacza się ze wzoru

$$\eta = \frac{P}{P_w},$$

w którym:

P – moc prądnicy obciążającej,

$P_w = P_1 + P_2$ – moc pobierana z sieci (wskazania watomierzy),

przy czym:

$$P = U_{tp} I_{tp} + I_{tp}^2 R_{tp} + \Delta P_o,$$

$\Delta P_o = \Delta P_{Fe p} + \Delta P_{mp}$ – straty jałowe prądnicy obciążającej,

$\Delta P_{tp} = I_{tp}^2 R_{tp}$ – straty w uzwojeniu twornika prądnicy,

U_{tp}, I_{tp}, R_{tp} – napięcie, prąd i rezystancja twornika prądnicy obciążającej.

14.3.2. Wyznaczenie charakterystyk biegu jałowego

Po rozruchu układu pomiarowego należy, na podstawie pomiarów dla nieobciążonego układu kaskadowego i obliczeń, wykreślić charakterystyki: $\omega = f(I_w)$, $I_t = f(\omega)$, $U_t = f(\omega)$. Wyniki zestawień w tabeli 14.1.

Tabela 14.1

Lp.	I_w	I_t	U_t	ω	Uwagi
	A	A	V	s ⁻¹	

14.3.3. Wyznaczenie charakterystyk mechanicznych $\omega = f(M_o)$

W ćwiczeniu należy wyznaczyć charakterystyki mechaniczne dla kilku wartości prędkości początkowych kaskady ustawionych prądem wzbudzenia w stanie jałowym, np. $\omega = 0,8 \omega_0$, $\omega = 0,6 \omega_0$. Wyniki zestawić w tabeli 14.2.

Tabela 14.2

Lp.	I_1	I_2	I	U_1	U_2	U	P_1	P_2	P_w	ΔP_s	P_e	$\cos \varphi$	M_e	I_{tp}	U_{tp}	ΔP_{rp}	P	η
	A			V			W					-	Nm	A	V	W	-	
Uwagi																		

14.3.4. Wyznaczenie $\cos \varphi$ i sprawności η

Dla przeprowadzonych wyżej pomiarów, dla różnych wartości obciążeń układu napędowego należy wykreślić: $\cos \varphi = f(M_o)$ oraz $\eta = f(M_o)$.

14.4. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy umieścić:

1. Parametry badanego układu pomiarowego.
2. Wykaz aparatury pomiarowej.
3. Schemat układu pomiarowego.
4. Wyznaczone charakterystyki.
5. Omówienie uzyskanych wyników.
6. Własne spostrzeżenia i wnioski.

14.5. Zagadnienia i pytania kontrolne

1. Omówić budowę kaskady typu $P = \text{const}$ i uzasadnić jej nazwę.
2. W jaki sposób reguluje się prędkość kątową kaskady?
3. Omówić sposób przeprowadzenia rozruchu układu kaskadowego.
4. Jaki ma przebieg $\omega = f(I_w)$ przy braku obciążenia kaskady?
5. Podać przykładowe przebiegi charakterystyki mechanicznej kaskady na stałą moc.

Literatura

- [1] Kędzior W., *Podstawy napędu elektrycznego*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980.
- [2] *Laboratorium napędu elektrycznego*, praca zbiorowa pod redakcją H. Bitela, PWN, Warszawa–Poznań, 1977.
- [3] *Laboratorium napędu elektrycznego*, praca zbiorowa pod redakcją W. Kędziora, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1986.
- [4] *Napęd elektryczny*, praca zbiorowa pod redakcją Z. Grunwalda, WNT, Warszawa 1987.