

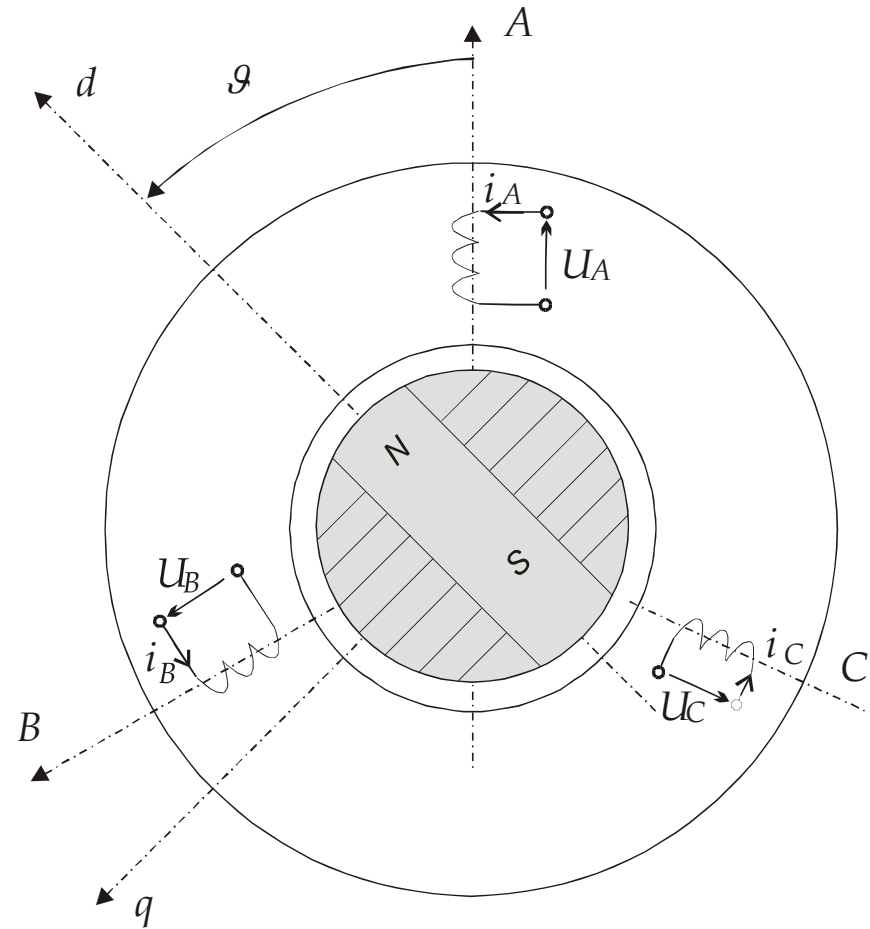
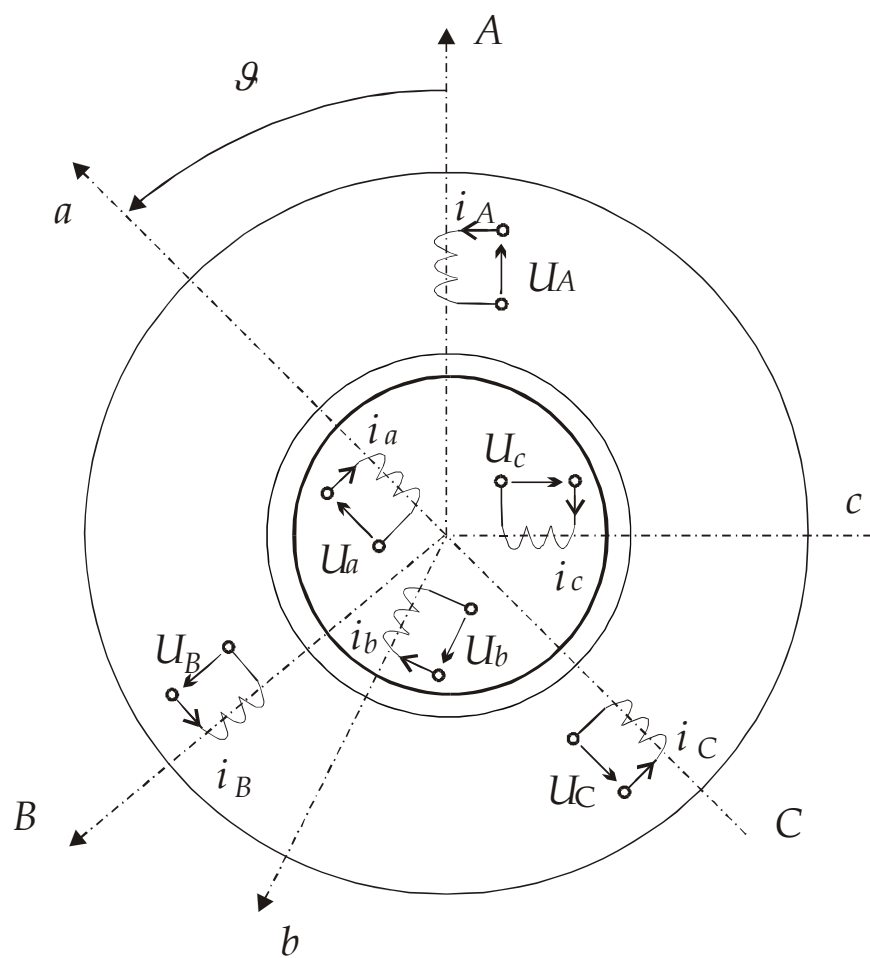
8. Układy regulacyjne z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych

8.1 Zasada regulacji częstotliwościowej silnika PMSM,
strategie sterowania

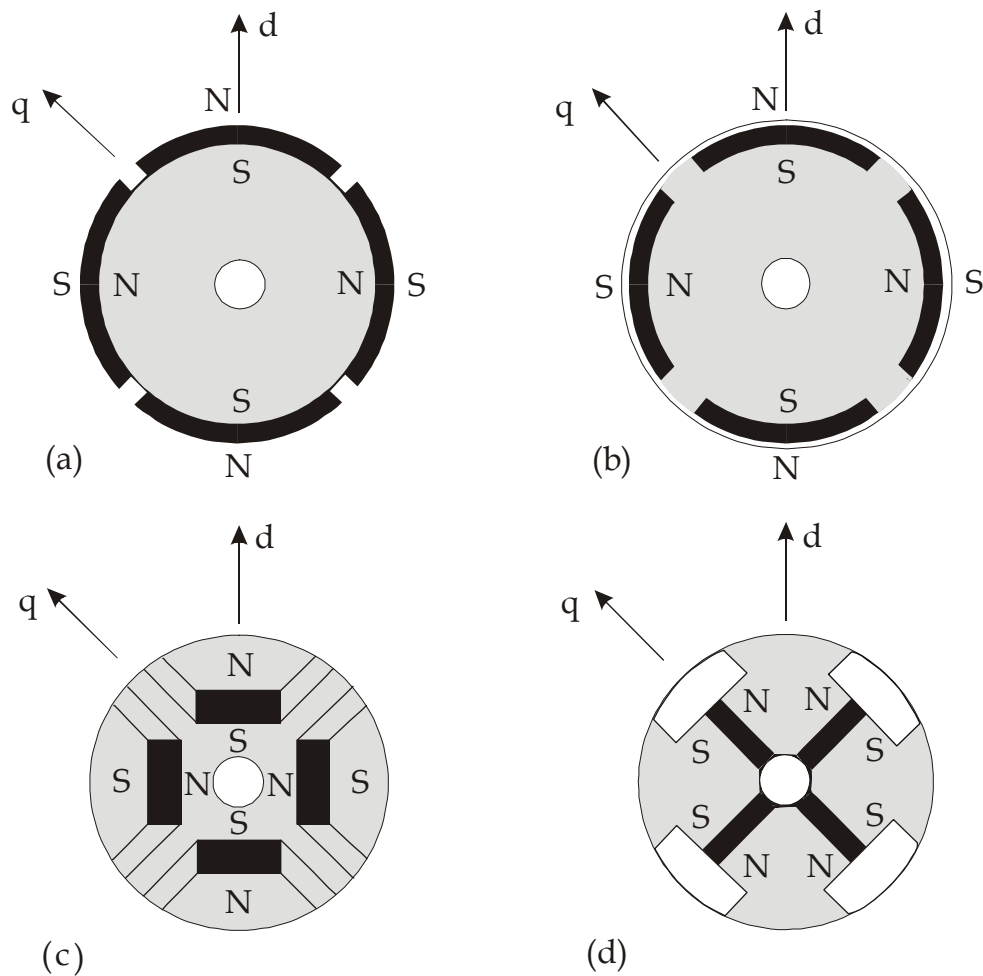
8.2 Model matematyczny i schemat blokowy




8.3 Układ regulacji wektorowej PMSM

Układ uzwojeń maszyny prądu przemiennego: a) maszyna z trójfazowym symetrycznym uzwojeniem stojana i wirnika (silnik indukcyjny), b) silnik synchroniczny o magnesach trwałych

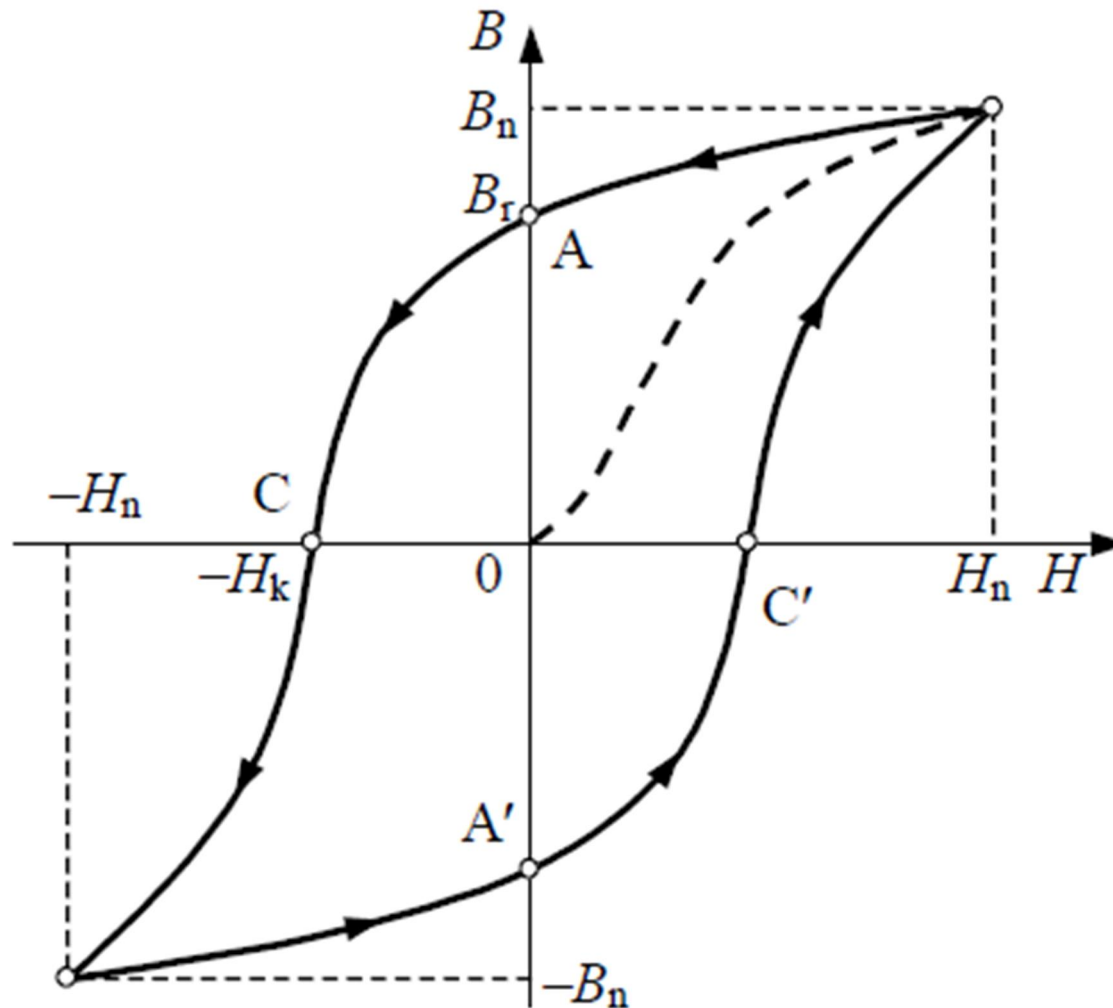


Schematy przekrojów wirnika PMSM; usytuowanie magnesów: a) i b) powierzchniowe, c) i d) zagłębione



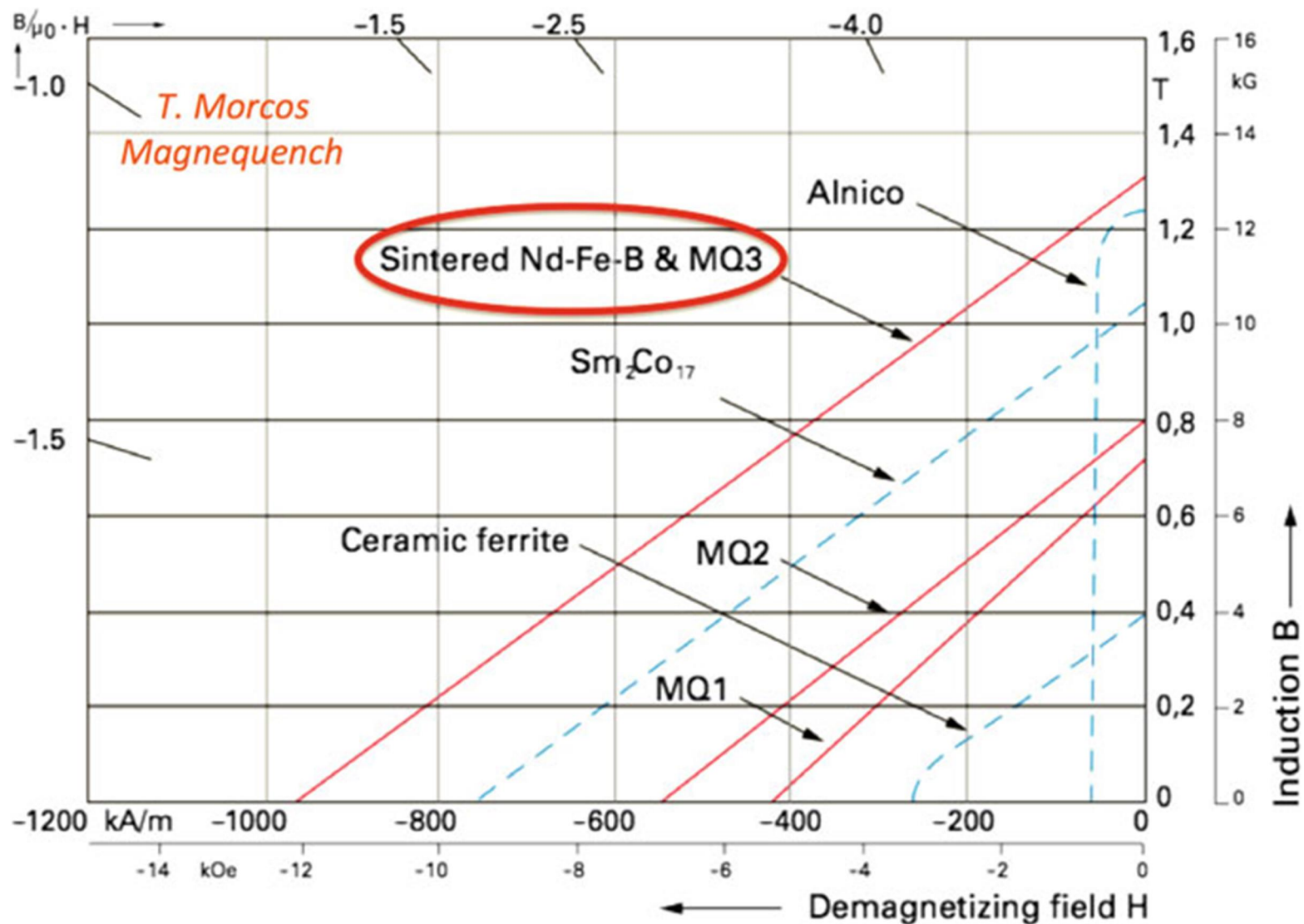
-  Magnes trwały
-  Ferromagnetyk
-  Paramagnetyk

Przykładowa charakterystyka magnesowania



B_r indukcja szcztatkowa
(pozostałość magnetyczna)

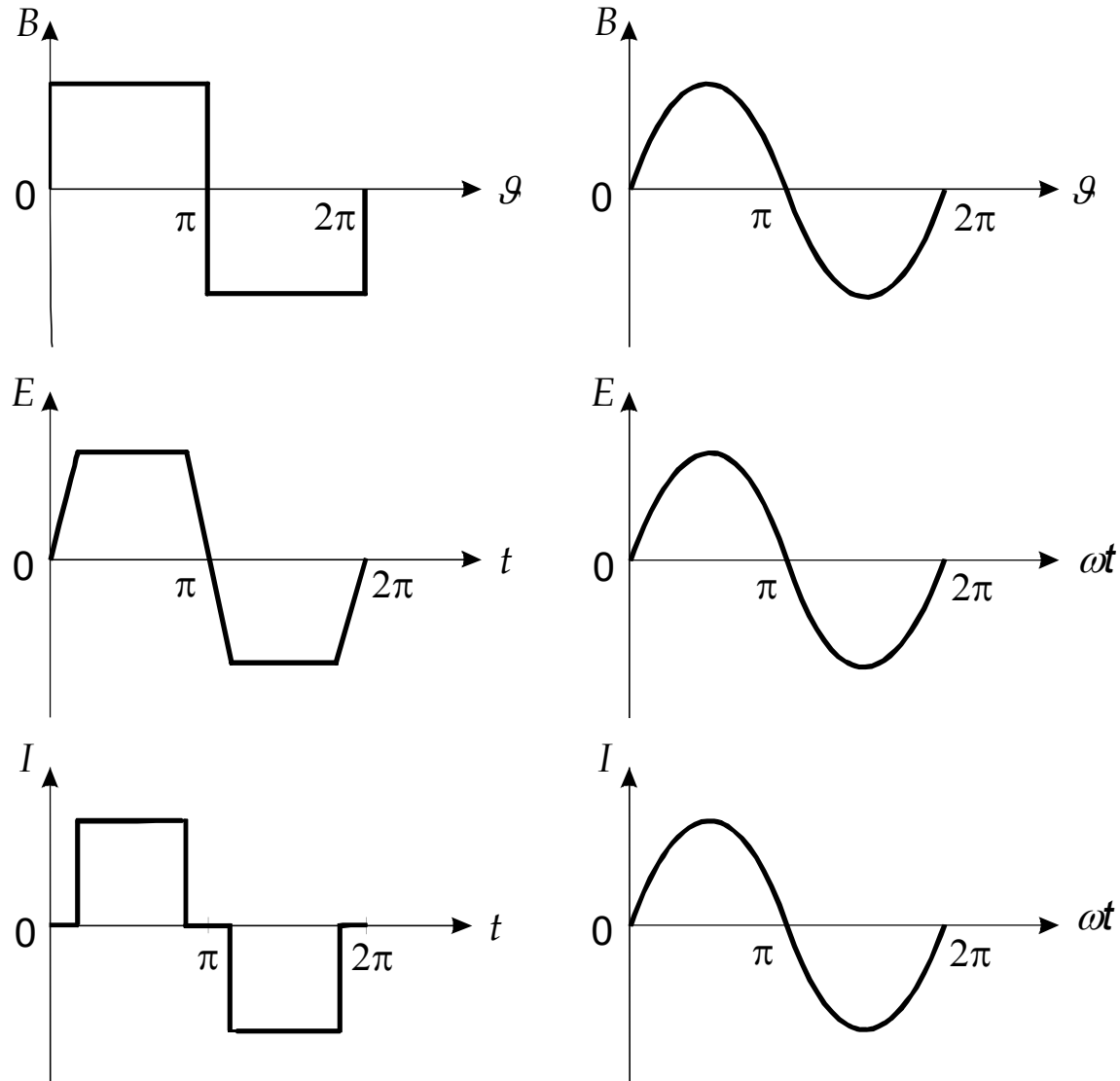
H_k natężenie koercji
(natężenia powściągającego),



Rys. 1 Drugi kwadrant charakterystyki magnesowania B – H (indukcja magnetyczna – natężenie pola magnetycznego) dla kilku stosowanych materiałów magnetycznych w maszynach elektrycznych PMSM

NdFeB – Neodym-Żelazo- Bor, Sm₂Co₁₇ – Samar-Kobalt

Przebieg: indukcji, SEM i prądu jednej fazy silnika o magnesach trwałych: a) z trapezoidalną SEM – BLDCM, b) z sinusoidalną SEM – PMSM



Opis wektorowy SIK

$$\mathbf{U}_s^k = R_s \mathbf{I}_s^k + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_s^k}{dt} + j\omega_k \boldsymbol{\Psi}_s^k$$

$$\mathbf{U}_r^k = R_r \mathbf{I}_r^k + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_r^k}{dt} + j(\omega_k - \omega_e) \boldsymbol{\Psi}_r^k$$

$$\boldsymbol{\Psi}_s^k = L_s \mathbf{I}_s^k + L_m \mathbf{I}_r^k$$

$$\boldsymbol{\Psi}_r^k = L_r \mathbf{I}_r^k + L_m \mathbf{I}_s^k$$

$$m = \frac{3}{2} p \operatorname{Im}(\boldsymbol{\Psi}_s^* \mathbf{I}_s)$$

Opis matematyczny silnika PMSM

$$\bar{\mathbf{U}}_{sk} = R_s \bar{\mathbf{I}}_{sk} + \frac{d\bar{\Psi}_{sk}}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_{sk}$$

$$\bar{\Psi}_{sk} = L_s \bar{\mathbf{I}}_{sk} + \bar{\Psi}_f \quad \mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (m_e - m_{op})$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega$$

$$m_e = p \frac{m_s}{2} \text{Im}(\bar{\Psi}_{sk}^* \bar{\mathbf{I}}_{sk})$$

Opis matematyczny silnika PMSM

$$\bar{\mathbf{U}}_{sk} = R_s \bar{\mathbf{I}}_{sk} + \frac{d\bar{\Psi}_{sk}}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_{sk}$$

$$\bar{\Psi}_{sk} = L_s \bar{\mathbf{I}}_{sk} + \bar{\Psi}_f$$

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (m_e - m_{op})$$

$$\frac{d\mathcal{G}}{dt} = \omega$$

$$m_e = p \frac{m_s}{2} \text{Im}(\bar{\Psi}_{sk}^* \bar{\mathbf{I}}_{sk})$$

$$\bar{\mathbf{U}}_s = u_d + ju_q$$

$$\bar{\mathbf{I}}_s = i_d + ji_q$$

$$\bar{\Psi}_s = \psi_d + j\psi_q$$

Opis matematyczny silnika PMSM we współrzędnych d-q zmienne stanu - strumienie skojarzone stojana

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - p\omega_m \psi_q$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + p\omega_m \psi_d$$

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f$$

$$\psi_q = L_q i_q$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left[p \frac{m_s}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) - m_{op} \right]$$

$$\frac{d\Theta}{dt} = \omega$$

Opis wektorowy SIK

wzory na moment elektromagnetyczny

$$m = \frac{3}{2} p \operatorname{Im}(\Psi_s^* \mathbf{I}_s)$$

$$m = \frac{3}{2} p \operatorname{Im}[(\psi_{sx} - j\psi_{sy})(i_{sx} + ji_{sy})]$$

$$m = \frac{3}{2} p \psi_{sx} \cdot i_{sy} = \frac{3}{2} p |\Psi_s| \cdot i_{sy}$$

$$\Psi_s = L_s \mathbf{I}_s + L_M \mathbf{I}_r$$

$$\Psi_r = L_r \mathbf{I}_r + L_M \mathbf{I}_s$$

$$\mathbf{I}_r = \frac{\Psi_r}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} \mathbf{I}_s$$

$$m = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \operatorname{Im}(\Psi_r^* \cdot \mathbf{I}_s)$$

$$\Psi_s = L_{s\sigma} \mathbf{I}_s + \frac{L_m}{L_r} \Psi_r$$

Wzory na moment elektromagnetyczny silnika PMSM

$$m = \frac{3}{2} p \operatorname{Im}(\Psi_s^* \mathbf{I}_s)$$

$$m = p \frac{3}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d)$$

$$m = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d i_q]$$

Wzory na moment elektromagnetyczny silnika PMSM

$$m_e = p \frac{m_s}{2} \operatorname{Im}(\bar{\Psi}_{sk}^* \bar{\mathbf{I}}_{sk})$$

$$m = p \frac{3}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d)$$

$$m = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d i_q]$$

$$I_d = I_s \cos \delta$$

$$I_q = I_s \sin \delta$$

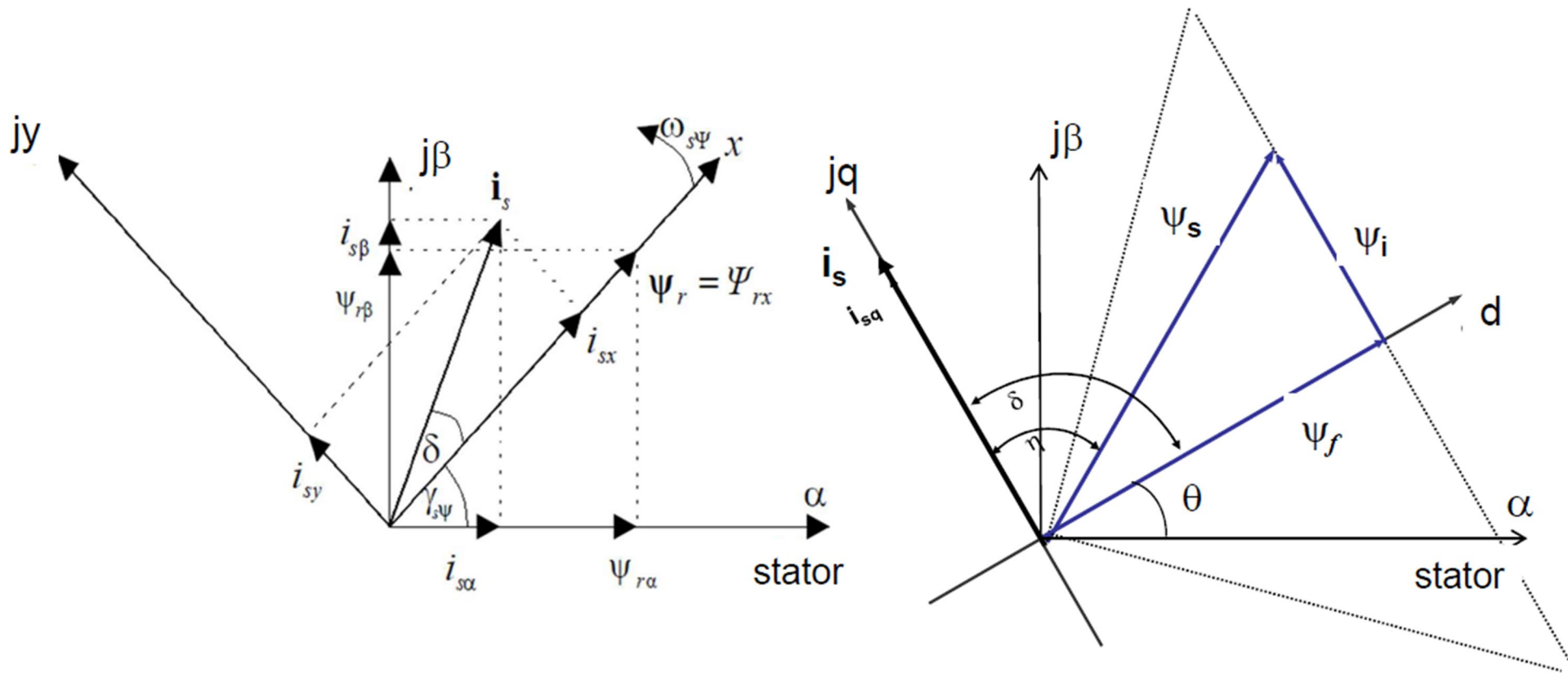
$$M_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left[\Psi_f \cdot I_s \cdot \sin(\delta) + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \cdot I_s^2 \sin(2\delta) \right]$$

Strategie sterowania PMSM

- I. Zachowanie stałego kąta mocy $\delta = \pi/2$,
- II. Zachowanie stałego współczynnika mocy $\cos \varphi = 1$,
- III. Zachowanie stałej wartości amplitudy strumienia skojarzonego stojana $\Psi_s = \text{const}$,
- IV. Maksymalizacja stosunku momentu elektromagnetycznego do amplitudy prądu

Wykresy wektorowe dla strategii sterowania:

I. $\delta = \pi/2$



Silnik indukcyjny

Silnik PMSM

Strategie sterowania – zależności matematyczne

I. $\delta = \pi/2$

$$M_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_d \cdot I_s = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_f \cdot I_s$$

$$M_e = \frac{3}{2} \cdot k_m \cdot I_s$$

$$\Psi_s = \sqrt{\Psi_f^2 + (L_q I_q)^2}$$

Strategie sterowania – zależności matematyczne

IV. Maximum Torque Per Amper - MTPA

$$I_d = I_s \cos \delta$$

$$I_q = I_s \sin \delta$$

$$Q_I = \frac{M_e}{I_s}$$

$$M_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left[\Psi_f \cdot I_s \cdot \sin(\delta) + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \cdot I_s^2 \sin(2\delta) \right]$$

$$Q_I = \frac{M_e}{I_s} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left[\Psi_f \cdot \sin(\delta) + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \cdot I_s \sin(2\delta) \right]$$

$$\cos \delta_{op} = \frac{-\Psi_f + \sqrt{\Psi_f^2 + 8(L_d - L_q)^2 I_s^2}}{4(L_d - L_q) I_s}$$

Ilustracja zasady MTPA na wykresie we współrzędnych d-q

Wykres zależności prądów i_d , i_q od momentu elektromagnetycznego silnika

$$i_q = F_m(m_e, i_d)$$

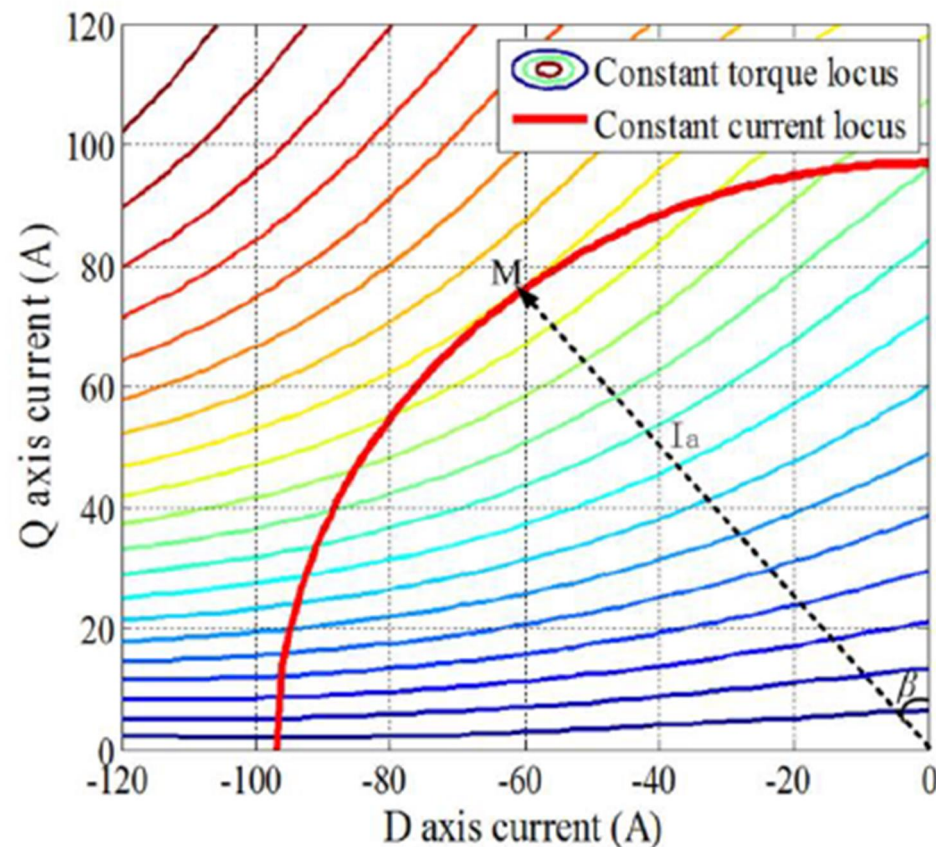
$$m_e = \frac{3}{2}p[\Psi_m i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]$$

$$i_q = \frac{\frac{2}{3}p m_e}{\Psi_m + (L_d - L_q)i_d}$$

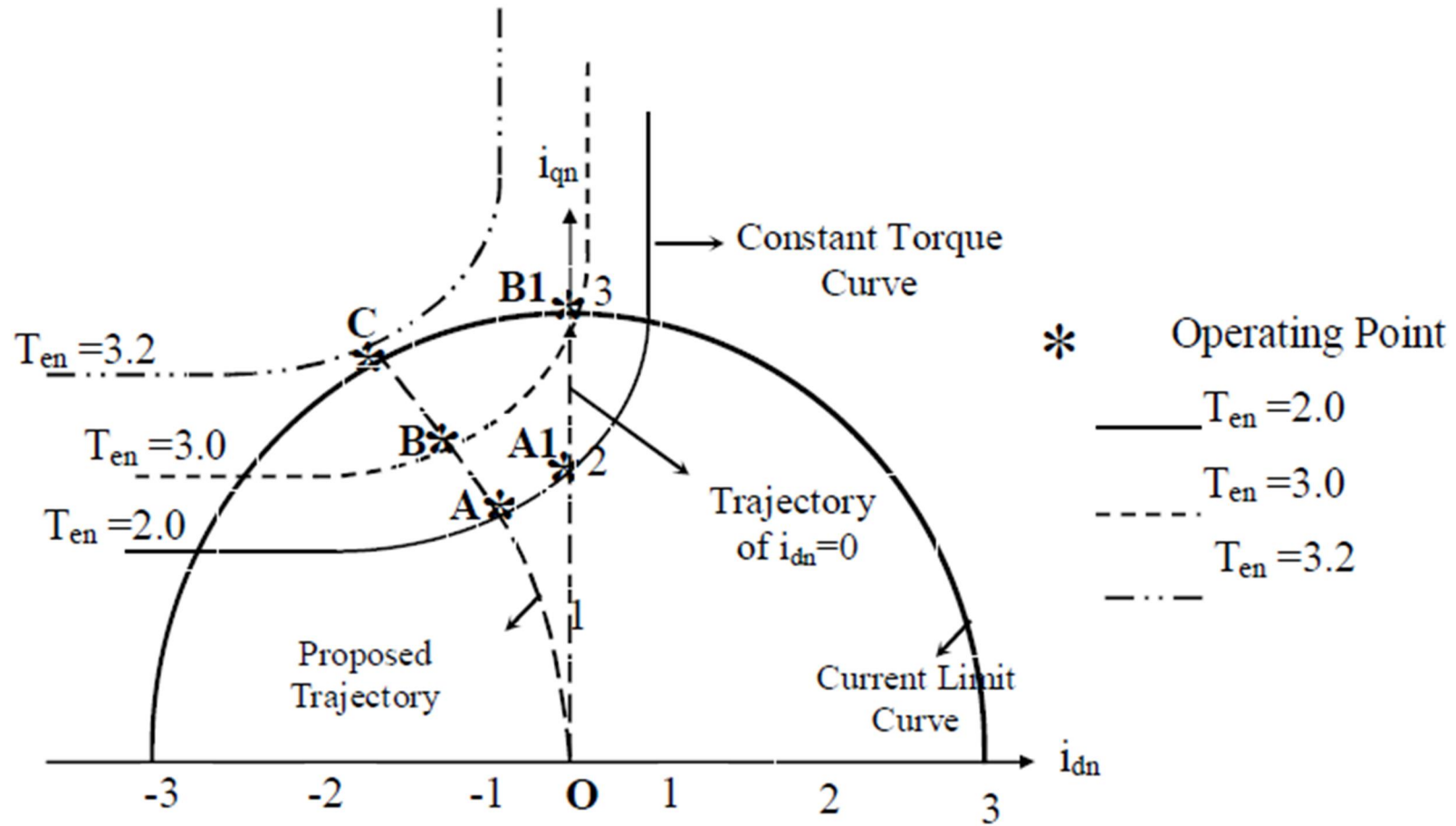
Hiperbola o asymptotach:

$$i_d = \frac{\Psi_m}{L_q - L_d}$$

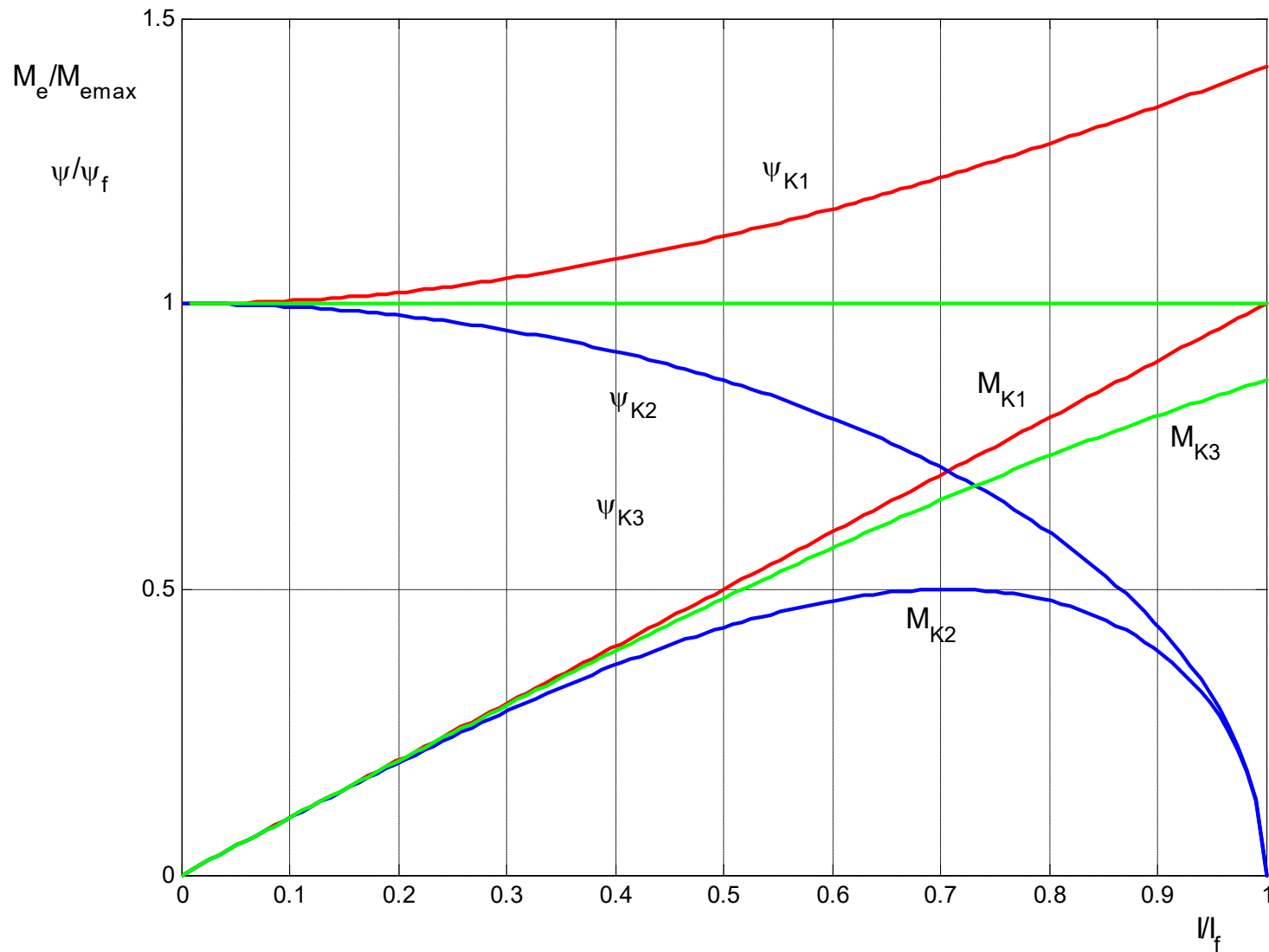
$$i_q = 0$$



Ilustracja zasady MTPA

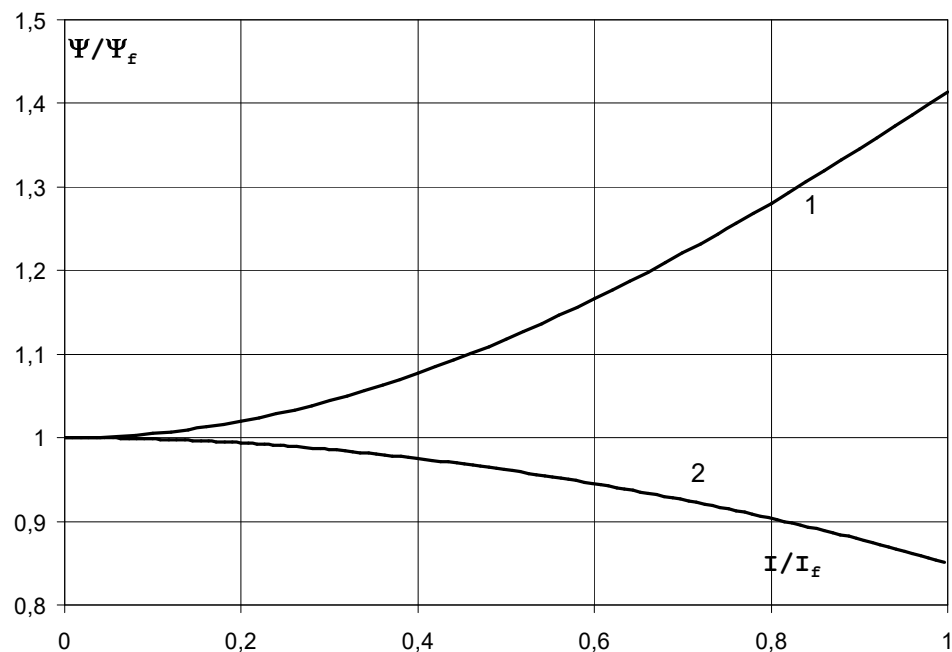
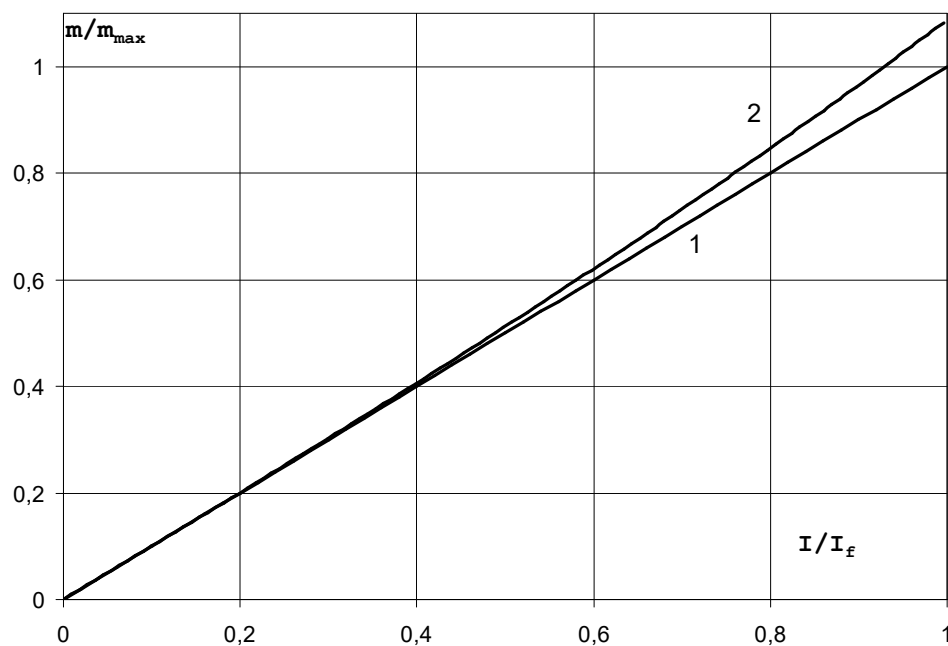


Zależność strumienia i momentu od prądu dla strategii I (K1), II (K2) i III (K3).

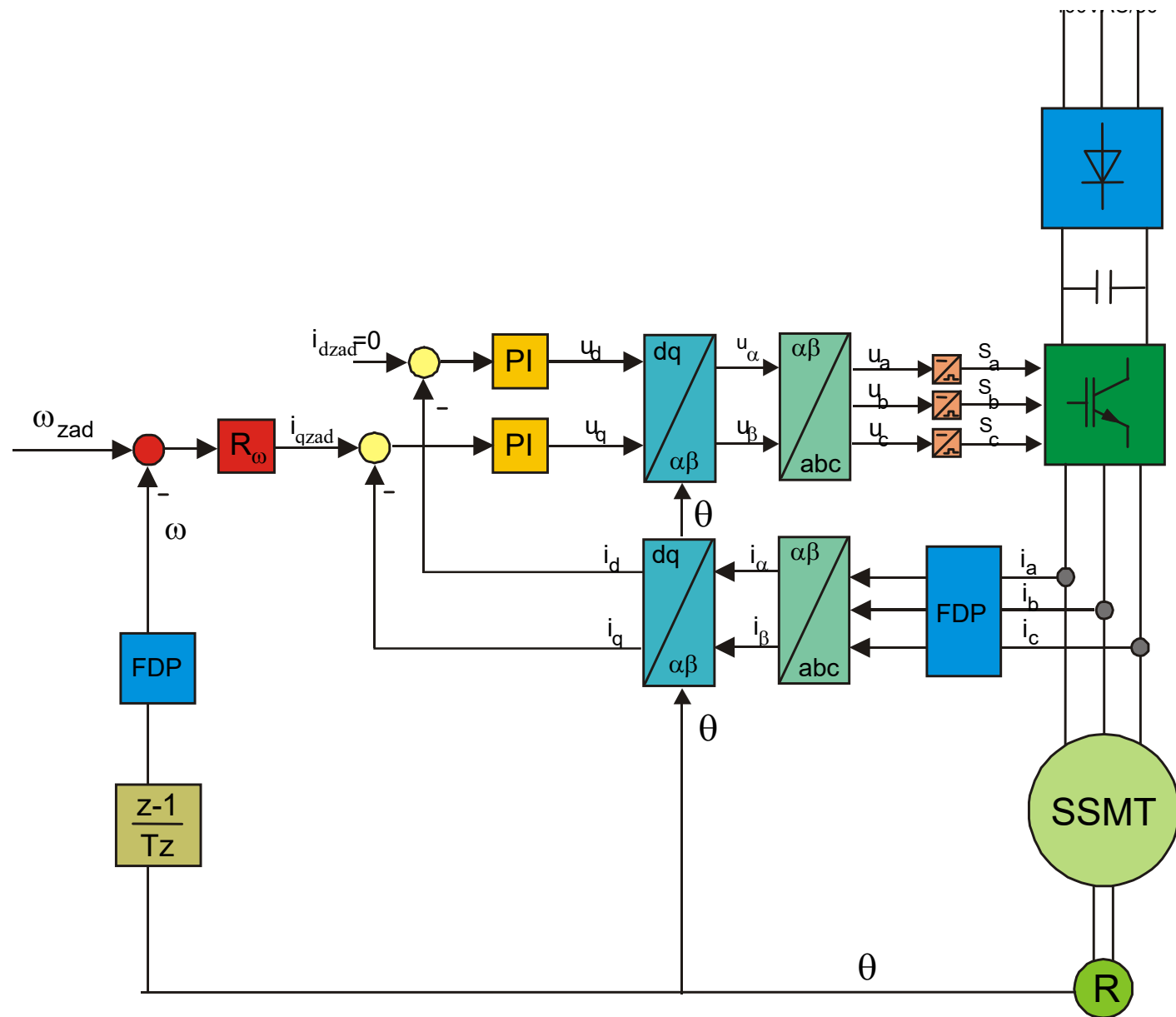


Wykres zależności momentu elektromagnetycznego i strumienia skojarzonego stojana od prądu stojana;

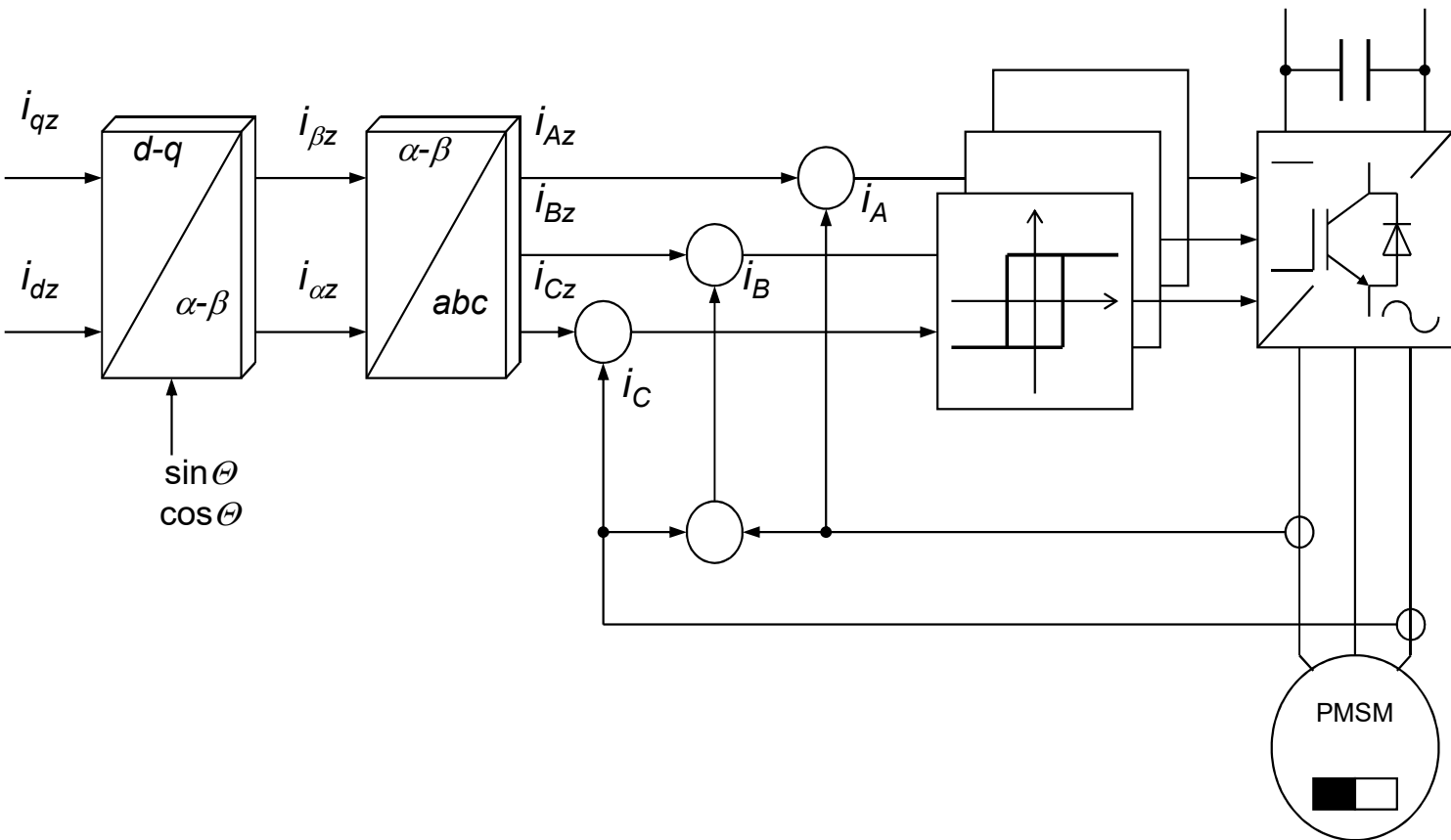
1 - strategia I, 2 – strategia IV dla $L_q/L_d = 5$,



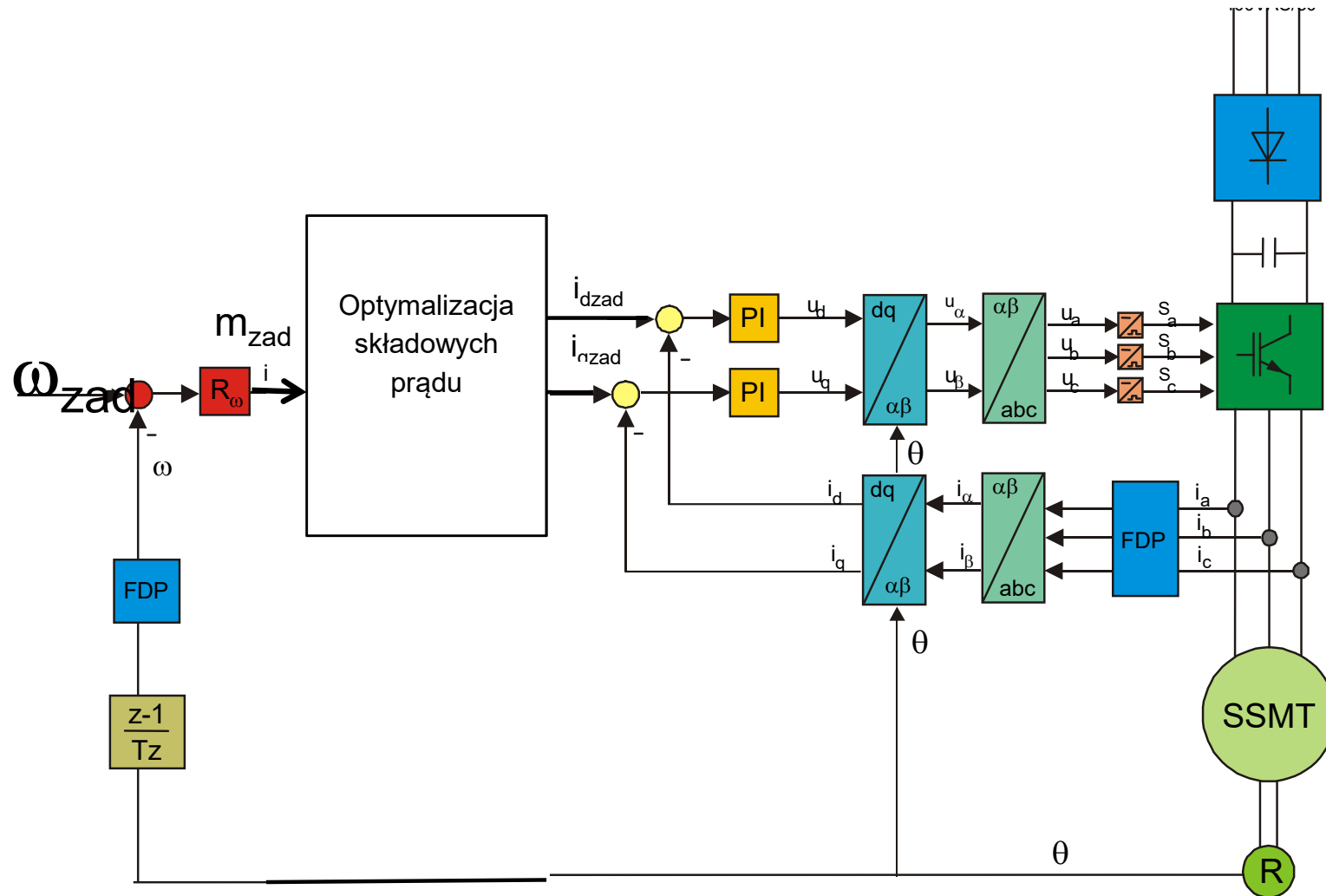
Układ regulacji prędkości PMSM z dwoma regulatorami prądów typu PI osiach d - q *strategia stałego kąta mocy $\delta = \pi/2$*



Układ wektorowej regulacji prądu z regulatorami histerezy prądów fazowych



Układ regulacji prędkości PMSM z dwoma regulatorami prądów typu PI osiach d - q *strategia MTPA (IV)*



Przebieg prędkości zadanej i rzeczywistej oraz prądu rzeczywistego w osiach d i q w układzie regulacji prędkości PMSM z czujnikiem (a) podczas rozruchu i hamowania silnika

