

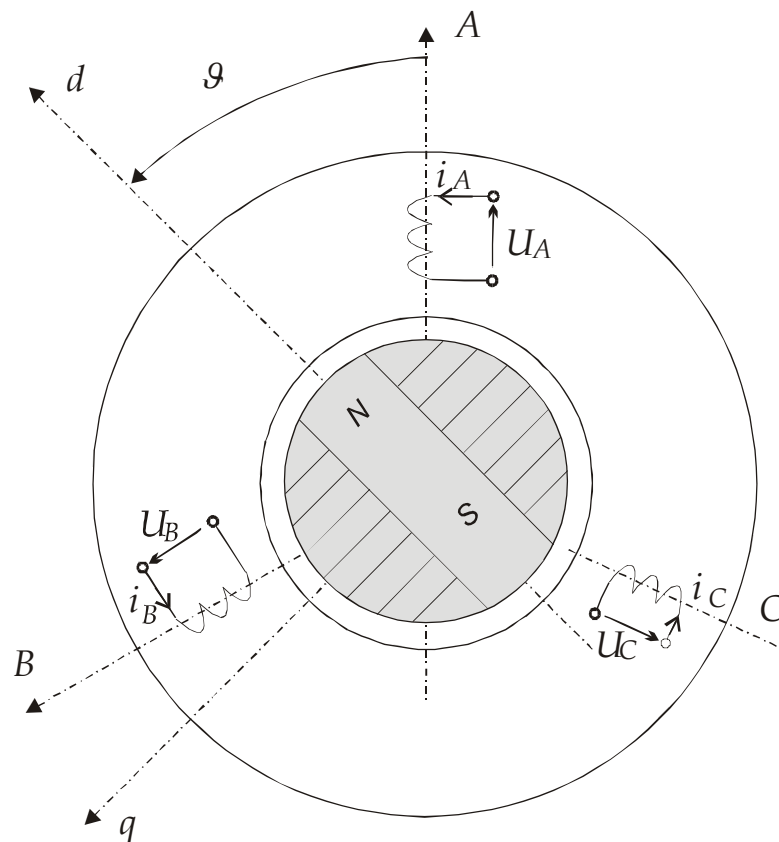
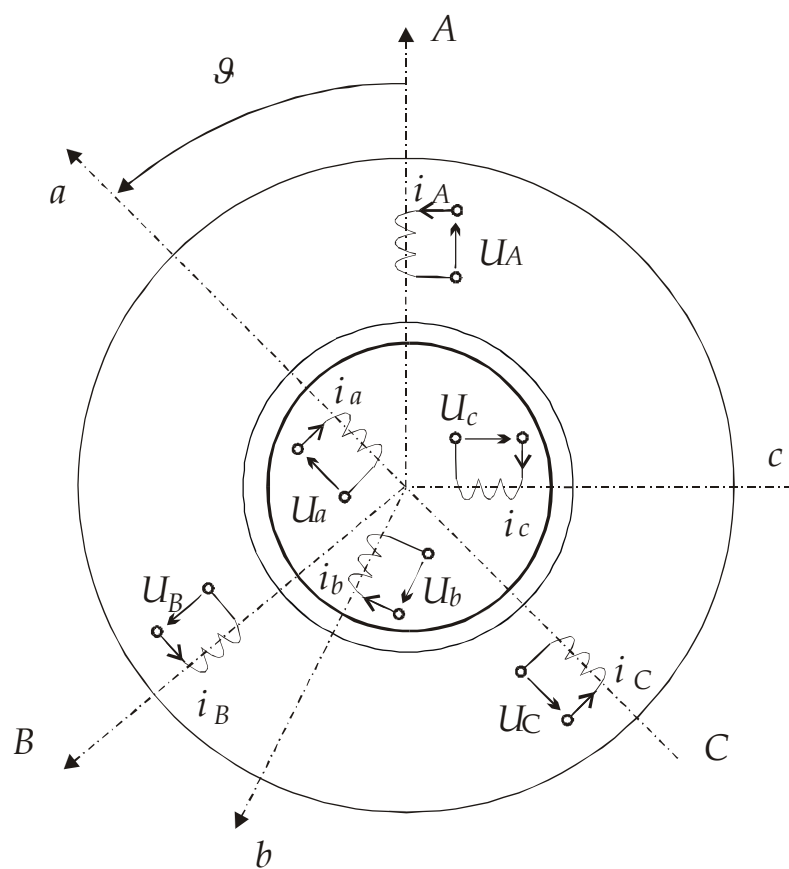
8. Układy regulacyjne z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych – cz.1

8.1 Zasada regulacji częstotliwościowej silnika PMSM,
strategie sterowania

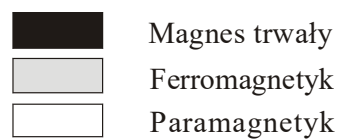
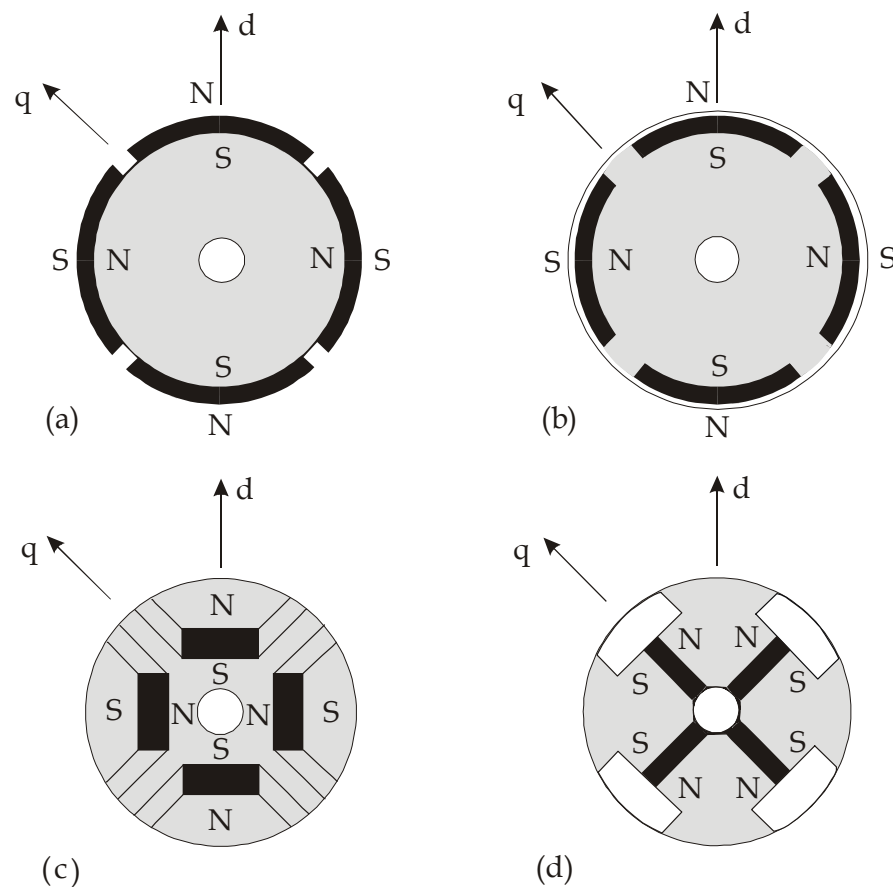
8.2 Model matematyczny i schemat blokowy

8.3 Układ regulacji wektorowej PMSM

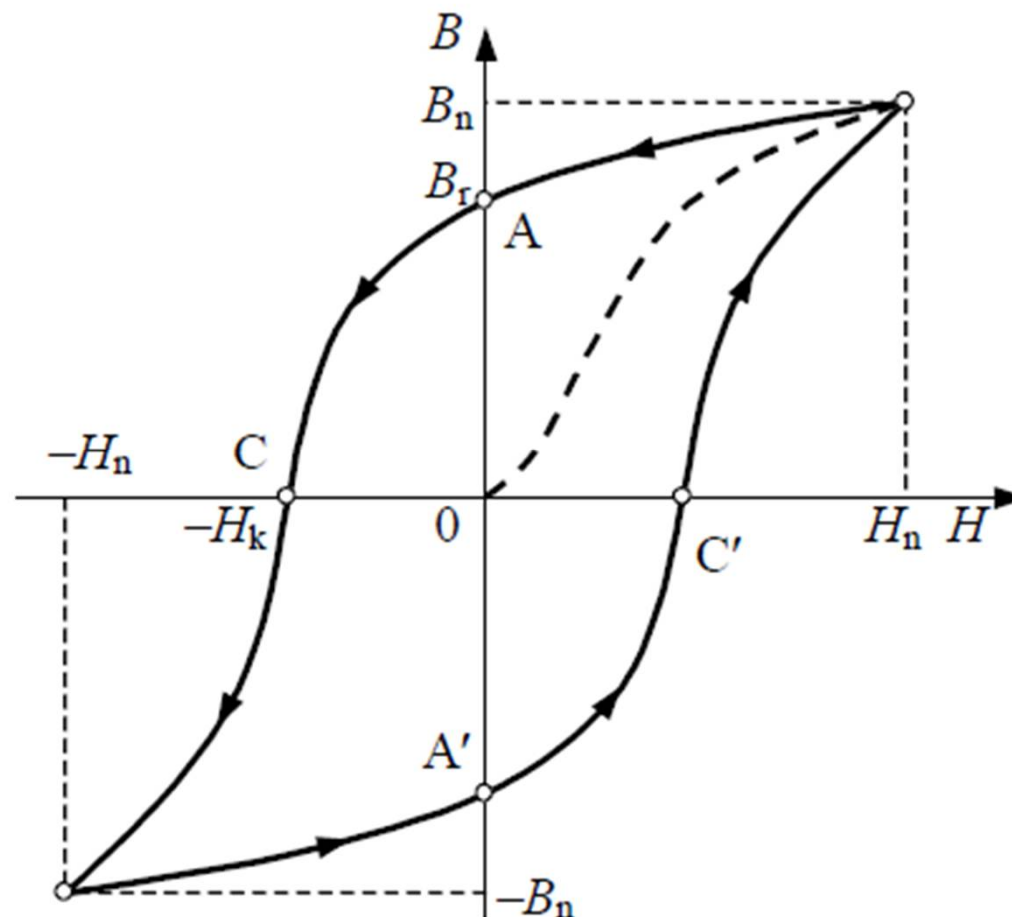
Układ uzwojeń maszyny prądu przemiennego: a) maszyna z trójfazowym symetrycznym uzwojeniem stojana i wirnika (silnik indukcyjny), b) silnik synchroniczny o magnesach trwałych



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

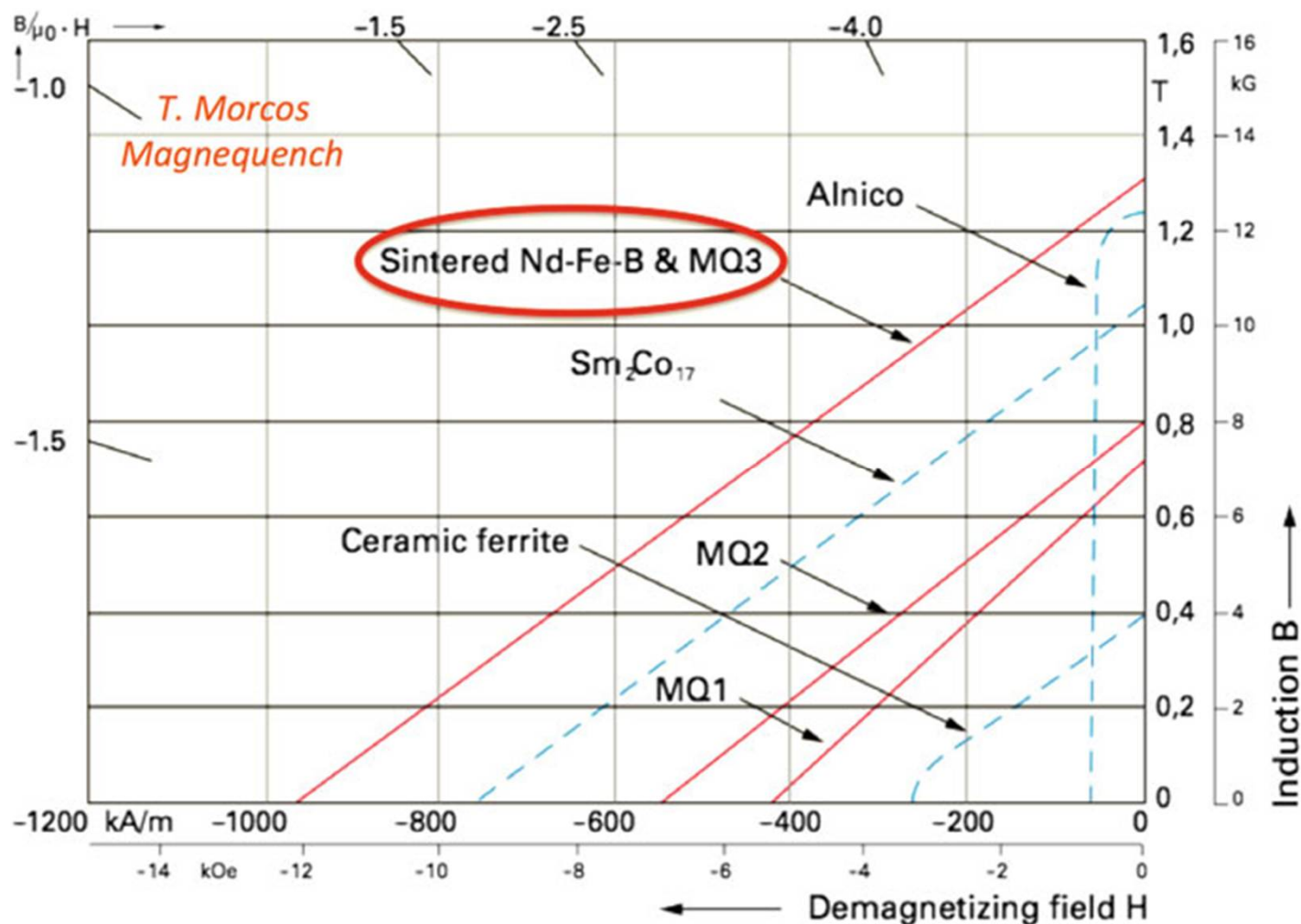


Przykładowa charakterystyka magnesowania



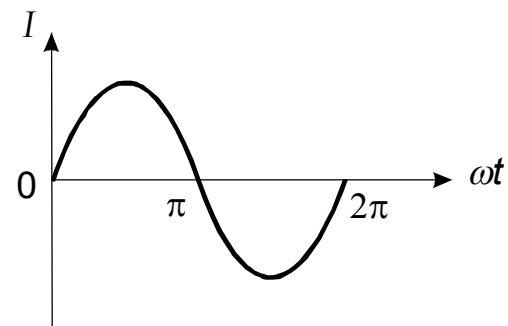
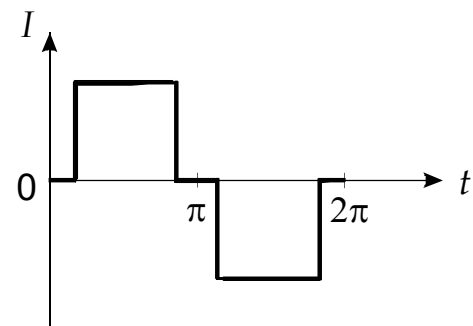
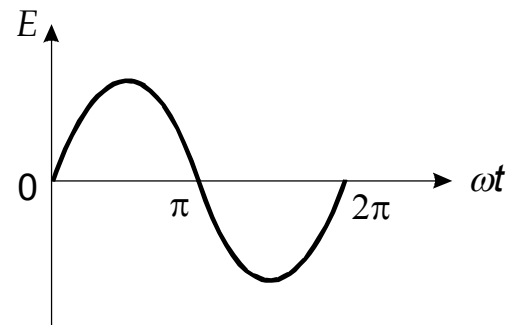
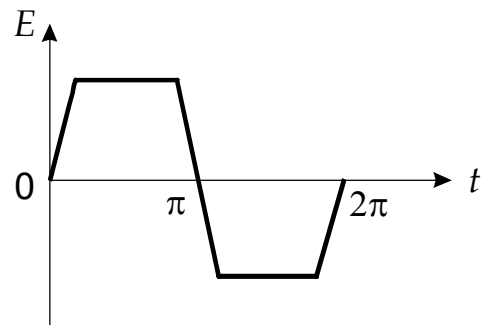
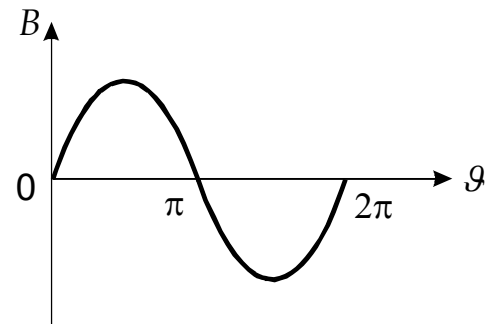
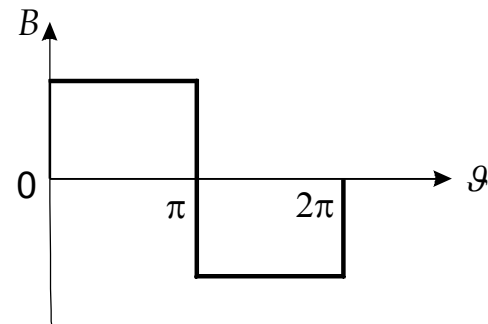
B_r indukcja szczątkowa
(pozostałość magnetyczna)

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, $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ – 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

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

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

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

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

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

Opis matematyczny silnika PMSM

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

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

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

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

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

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 matematyczny silnika PMSM we współrzędnych d-q zmienne stanu - prądy stojana

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}\omega_m i_q + \frac{1}{L_d}u_d$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}\omega_m i_d - \omega_m \Psi_f + \frac{1}{L_q}u_q$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{T_M} \left[\Psi_f i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d i_q - m_{op} \right]$$

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

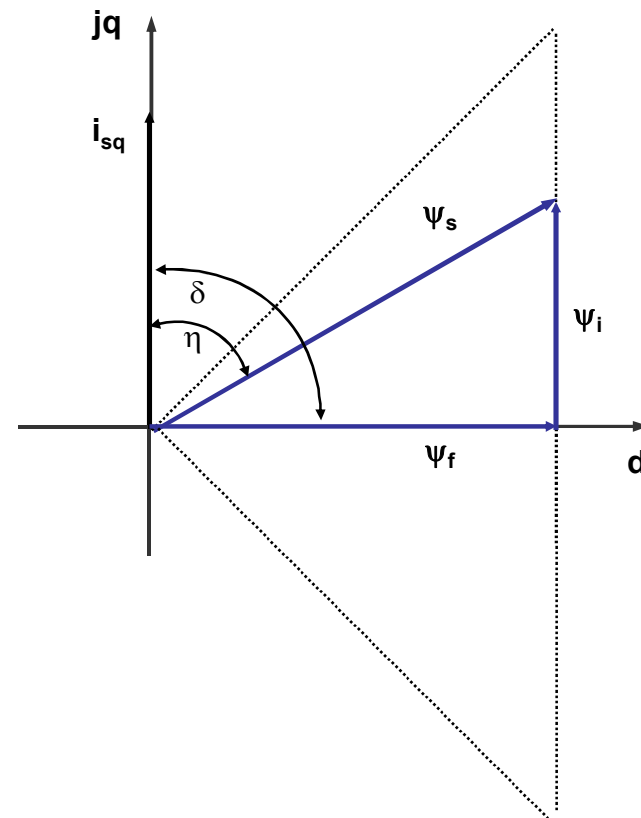
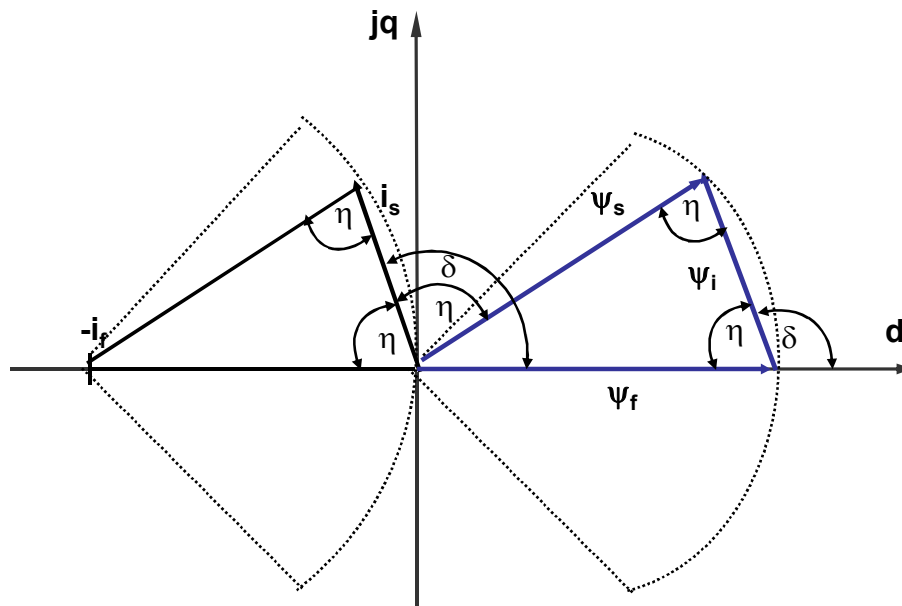
Strategie sterowania PMSM

- 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:

III. $\Psi_s = \text{const.}$

I. $\delta = \pi/2$



Strategie sterowania – zależności matematyczne

I. $\delta = \pi/2$

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

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

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

III. $\Psi_s = \text{const.}$

$$M_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_f \cdot I_s \cdot \sin(\eta)$$

dla warunku $\Psi_s = \Psi_f = \text{const.}$

Strategie sterowania – zależności matematyczne

IV. **Maximum Torque Per Amper - MTPA**

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

$$I_d = I_s \cos \delta$$

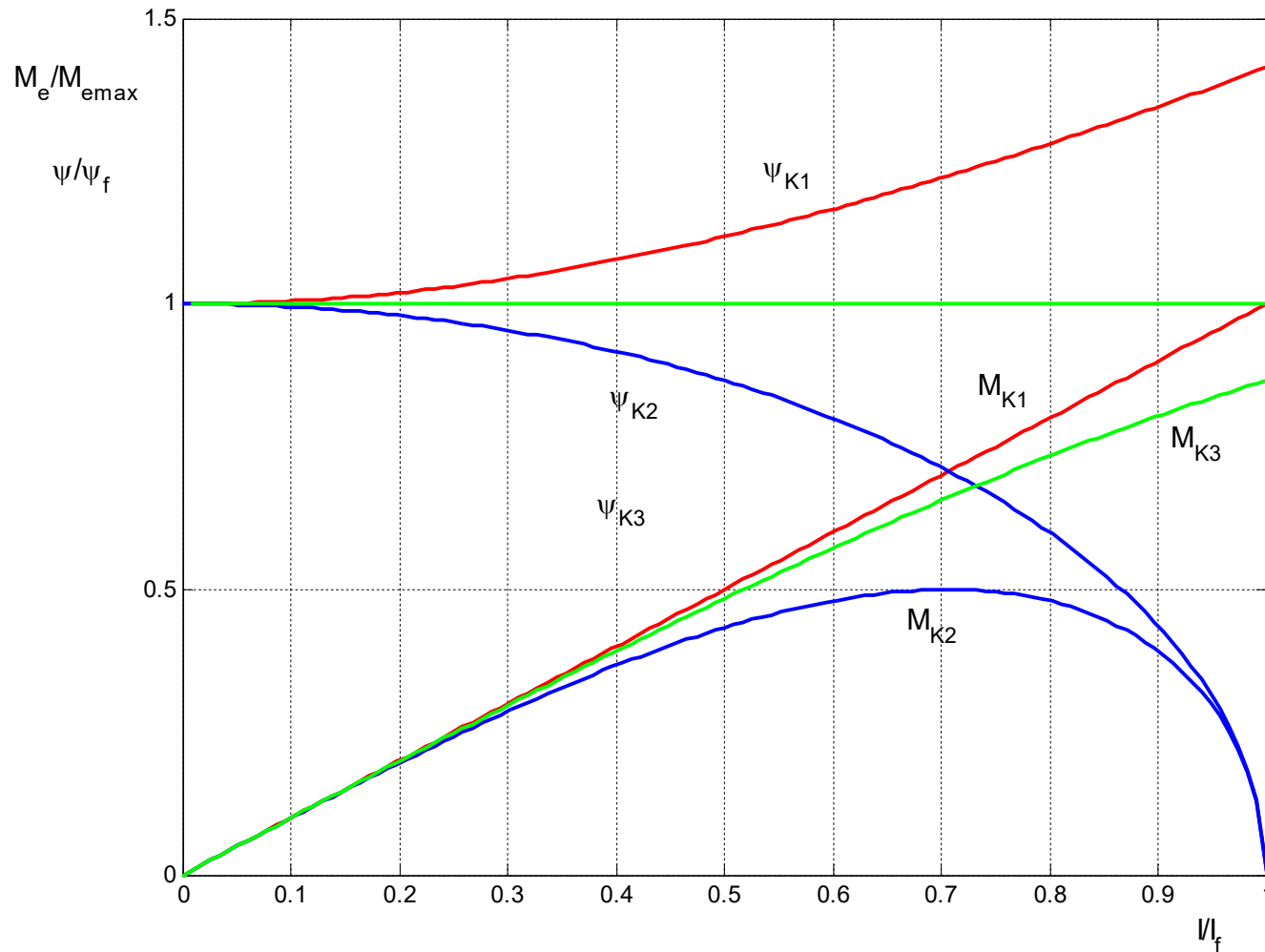
$$I_q = I_s \sin \delta$$

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

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

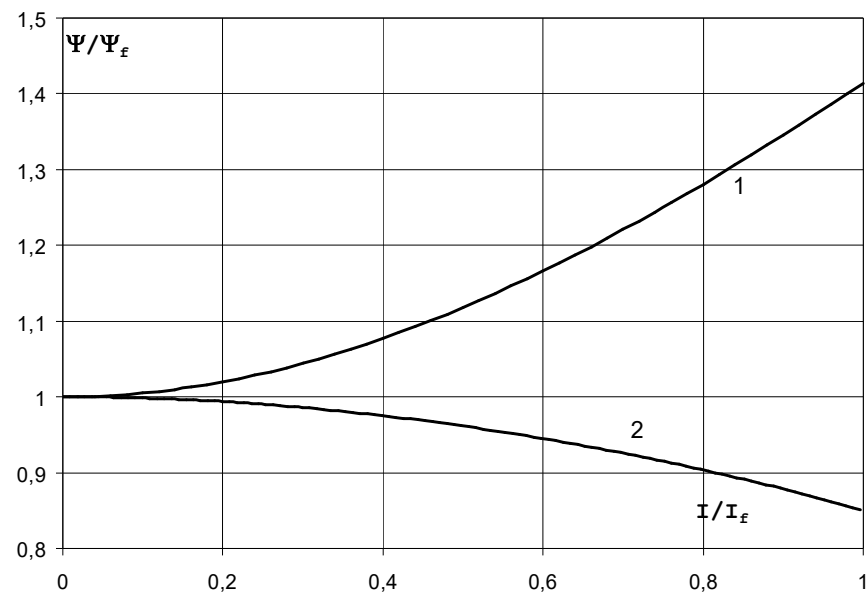
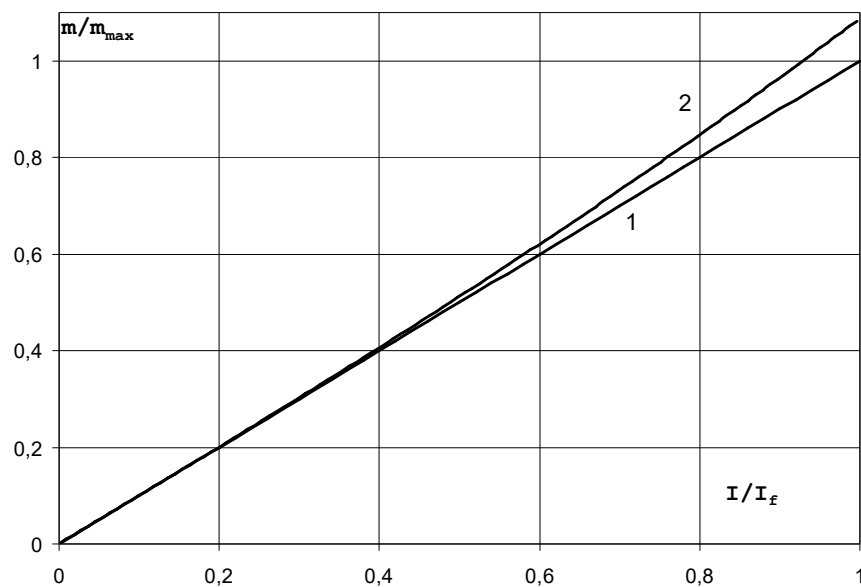
$$\cos \delta_{op} = \frac{-\Psi_f + \sqrt{\Psi_f^2 + 8(L_d - L_q)^2 I_s^2}}{4(L_d - L_q) I_s}$$

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

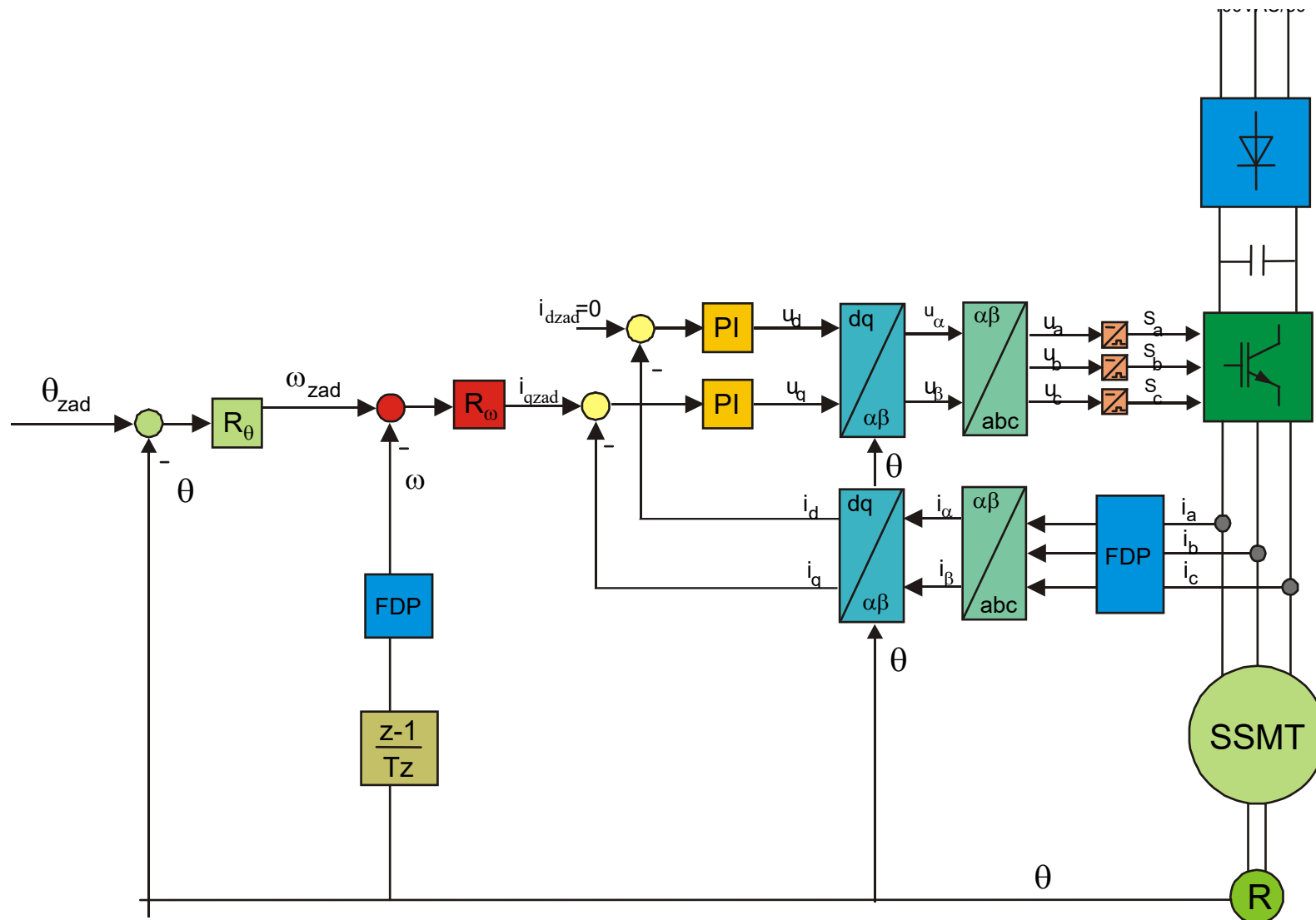


Wykres zależności momentu elektromagnetycznego i
strumienia skojarzonego stojana od prądu stojana;

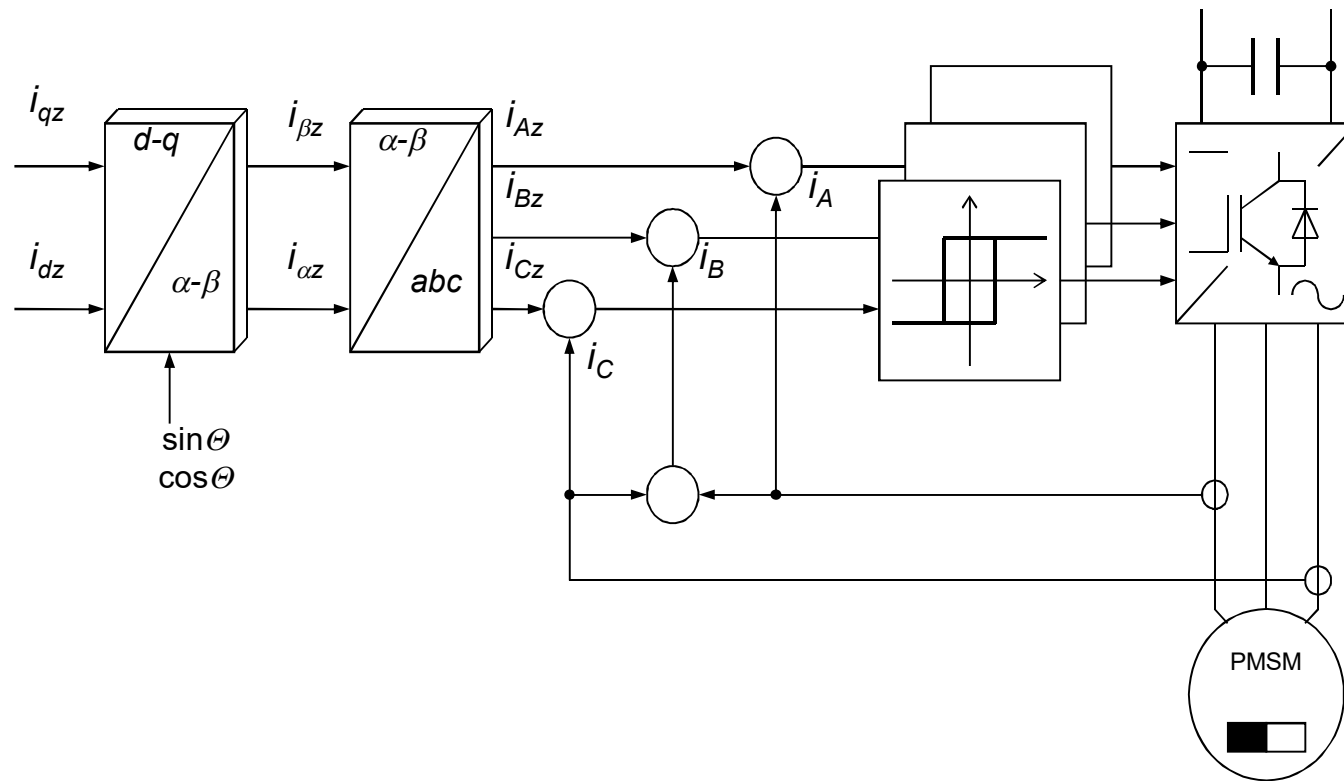
1 - strategia I, 2 – strategia IV dla $L_q/L_d = 5$,



Układ regulacji położenia i prędkości PMSM z dwoma regulatorami prądów typu PI osiach d - q



Układ wektorowej regulacji prądu z regulatorami histerezy prądów fazowych



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

