

XLV SESJA STUDENCKICH KÓŁ NAUKOWYCH

KOŁO NAUKOWE „MAGNESIK”



Bezczujnikowe sterowanie SPMSM

]

Wykonał: Miłosz Handzel

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Wiesław Jażdżyński, prof. n. AGH

PMSM (Rys. 1) kontra IM (Rys. 2)

We współczesnym przemyśle silniki z magnesami trwałymi (PMSM - Permanent Magnet Synchronus Machine) wypierają coraz częściej silniki indukcyjne. Umożliwiają one precyzyjną regulację prędkości jak i położenia wału silnika.



Rys. 1. Przykłady silników PMSM



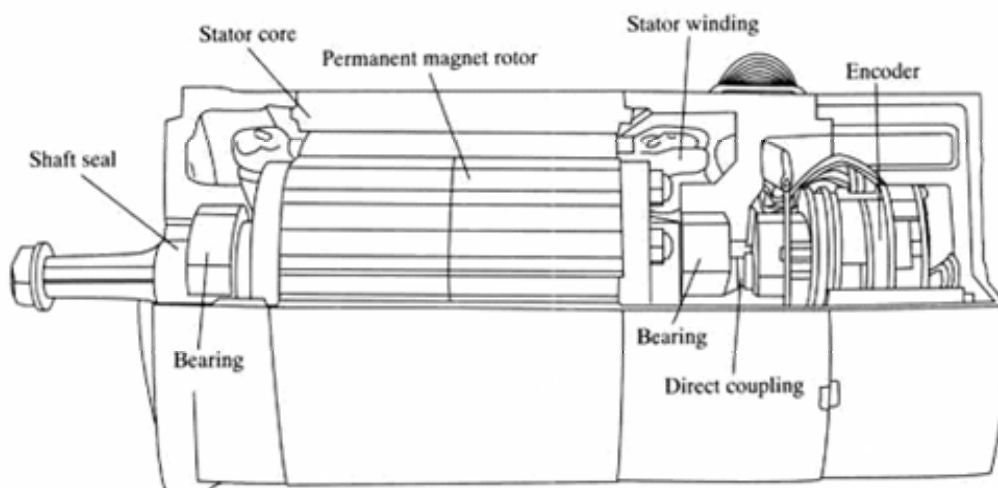
Rys. 2. Silnik indukcyjny

Dodatkowymi zaletami tych silników są:

- wysoka efektywność,
- wysoka gęstość mocy,
- wysoki moment w stosunku do prądu.

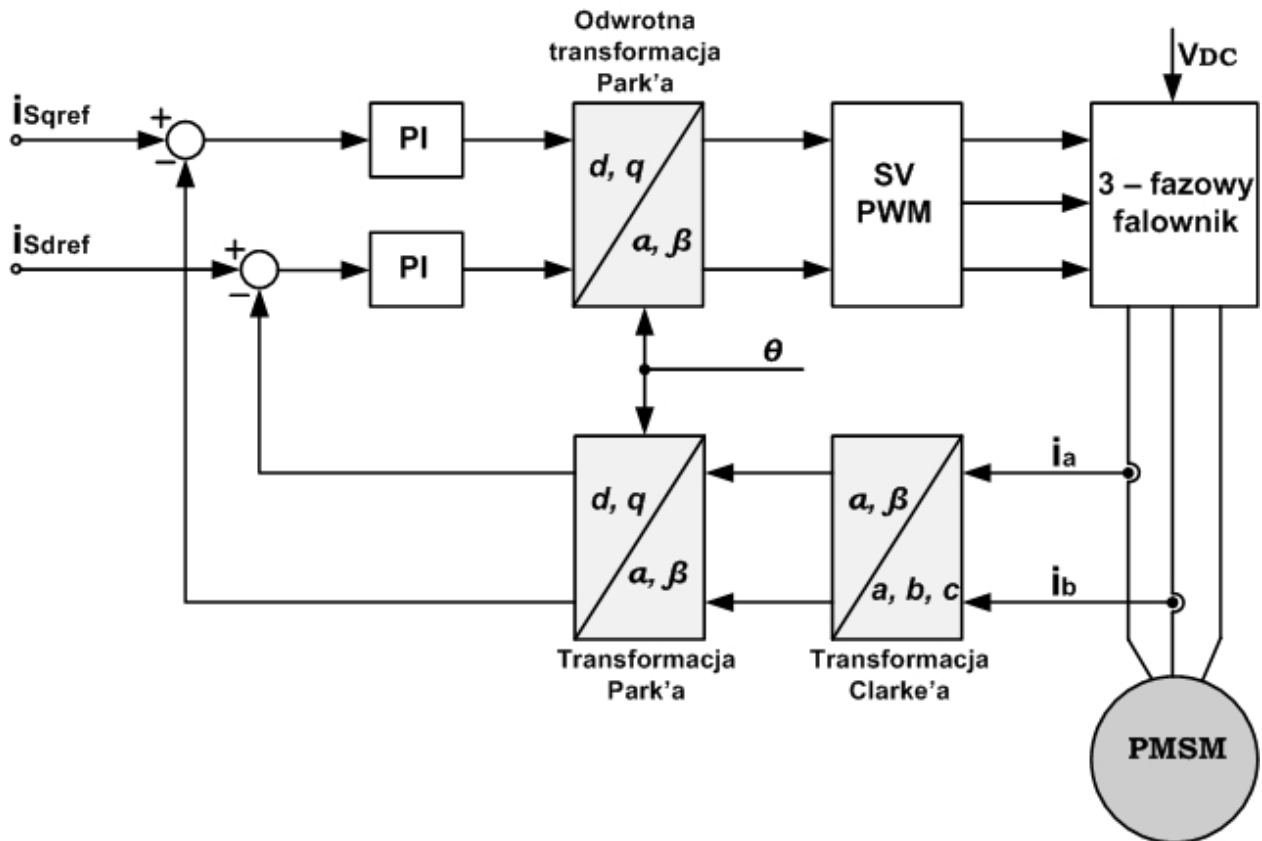
Wadą tych silników jest wymagana znajomość położenia wału dla układu sterowania co sprawia iż silniki te są wyposażone w enkodery, które zwiększają koszty produkcji oraz zmniejszają niezawodność pracy.

Rys. 3 przedstawia poglądową budowę silnika PMSM.



Rys. 3. Budowa silnika PMSM

Poniższy schemat blokowy (Rys. 4) przedstawia układ regulacji (FOC) silnika PMSM. Dla transformacji oraz odwrotnej transformacji Park'a wymagana jest znajomość położenia wału silnika.



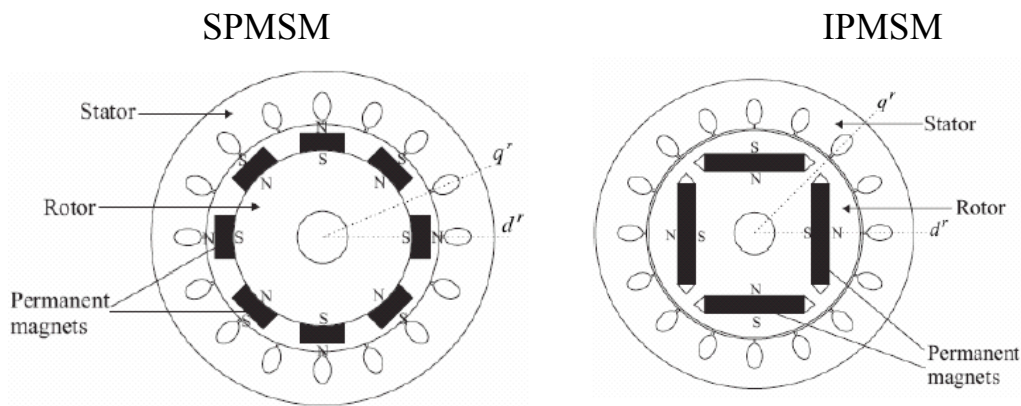
Rys. 4. Schemat układu regulacji silnika indukcyjnego

Bezczujnikowe sterowanie SPMSM

Metody:

1. Estymacja położenia na podstawie napięć stojana,
2. Estymacja położenia na podstawie siły elektromotorycznej rotacji (SEM)
3. Estymacja położenia za pomocą obserwatorów (np. Kalmana, Luenbergera)
4. Estymacja oparta na różnicy indukcyjności w osi d i q
5. Analiza sygnałów wysoko częstotliwościowych „wstrzykiwanych” do maszyny
6. Estymatory wykorzystujące sztuczną inteligencję

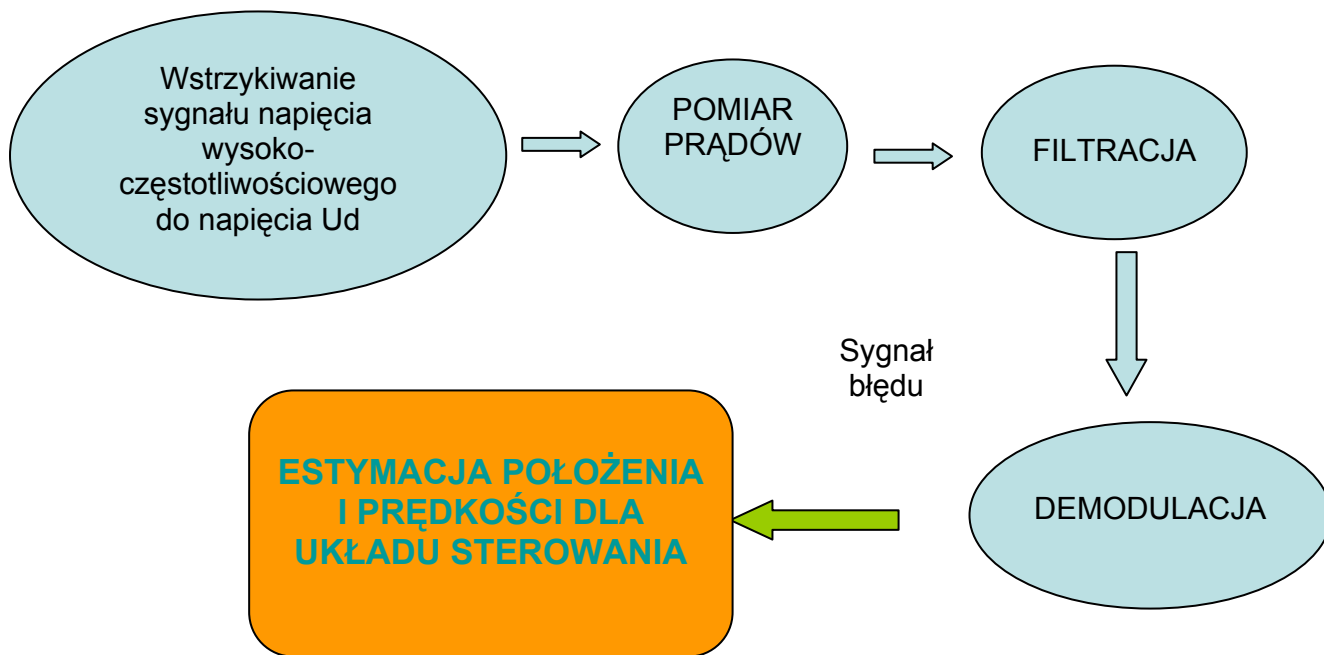
Ze względu na właściwości badanej maszyny (SPMSM – maszyna z magnesami na powierzchni wirnika, Rys. 5) oraz rodzaj pracy (dla małej i zerowej prędkości obrotowej) estymacja położenia i prędkości obrotowej jest dokonywana na podstawie metody analizy sygnałów wysoko częstotliwościowych „wstrzykiwanych” do maszyny.



Rys. 5. Rozmieszczenie magnesów trwałych w silniku SPMSM (magnesy na powierzchni rdzenia wirnika) i IPMSM (magnesy wewnątrz rdzenia wirnika).

Opis metody analizy sygnałów wysoko częstotliwościowych „wstrzykiwanych” do maszyny

Rys. 6 przedstawia diagram opisujący zasadę metody bezczujnikowej estymacji położenia kąowego właściwej dla analizowanej konstrukcji silnika.



Rys. 6. Schemat postępowania w metodzie „wstrzykiwania” sygnałów wysokoczęstotliwościowych

Matematyczne podstawy omawianej metody

Równania elektryczne opisujące pracę maszyny:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d + pL_d & -\omega_R L_q \\ \omega_R L_d & R_q + pL_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_R \lambda_{pm} \end{bmatrix}$$

Uproszczone równania silnika dla sygnału wysoko-częstotliwościowego:

$$\begin{bmatrix} v_{dh} \\ v_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{dh} + pL_{dh} & 0 \\ 0 & r_{dh} + pL_{qh} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} V_{dh} \\ V_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{dh} & 0 \\ 0 & Z_{qh} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dh} \\ I_{qh} \end{bmatrix}$$

Gdzie:

V_d, V_q, i_d, i_q – napięcia i prądy stojana w układzie współrzędnych dq ,

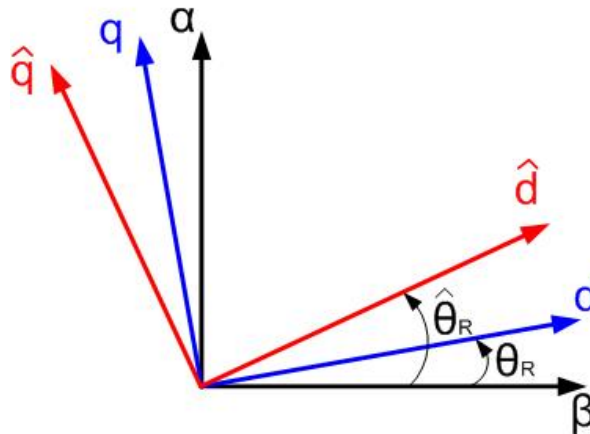
R_d, R_q, L_d, L_q – rezystancje i indukcyjności stojana w układzie współrzędnych dq ,

ω_R – prędkość obrotowa wirnika,

λ_{pm} – strumień pochodzący od magnesu trwałego na wirniku,

Indeks h - oznaczenie dla wielkości wysoko-częstotliwościowych

Następnie powyższe równania transformuje się z układu dq do układu estymowanego $d\hat{q}$ (Rys. 7 kolor czerwony)



Rys. 7. Układy współrzędnych w metodzie.

Macierz transformacyjna:

$$R(\tilde{\theta}_R) = \begin{bmatrix} \cos \tilde{\theta}_R & -\sin \tilde{\theta}_R \\ \sin \tilde{\theta}_R & \cos \tilde{\theta}_R \end{bmatrix}$$

gdzie:

$$\tilde{\theta}_R = \theta_R - \hat{\theta}_R$$

Co w efekcie daje układ równań maszyny:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{dh} \\ \hat{V}_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{avg} + \frac{Z_{diff}}{2} \cos 2\tilde{\theta}_R & \frac{Z_{diff}}{2} \sin 2\tilde{\theta}_R \\ \frac{Z_{diff}}{2} \sin 2\tilde{\theta}_R & Z_{avg} + \frac{Z_{diff}}{2} \cos 2\tilde{\theta}_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_{dh} \\ \hat{I}_{qh} \end{bmatrix}$$

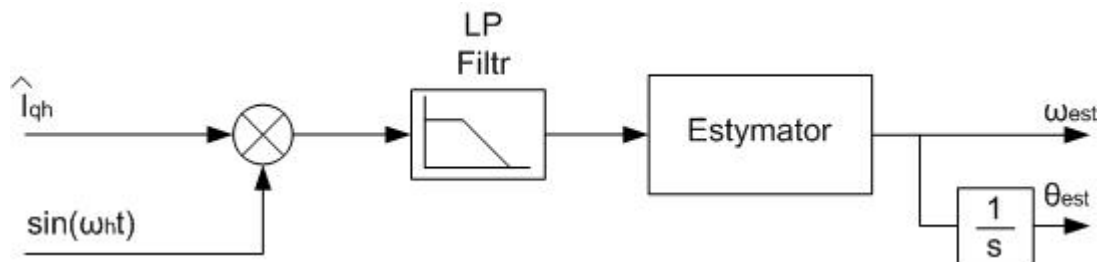
Rozwiązując powyższy układ dla napięć:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{dh} \\ \hat{V}_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_w \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega_h t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

otrzymuje się następujący sygnał prądowy:

$$\hat{I}_{qh} = -\frac{V_w \tilde{\theta}_R}{\omega_h^2 L_{dh} L_{qh}} L_{diff} \sin \omega_h t$$

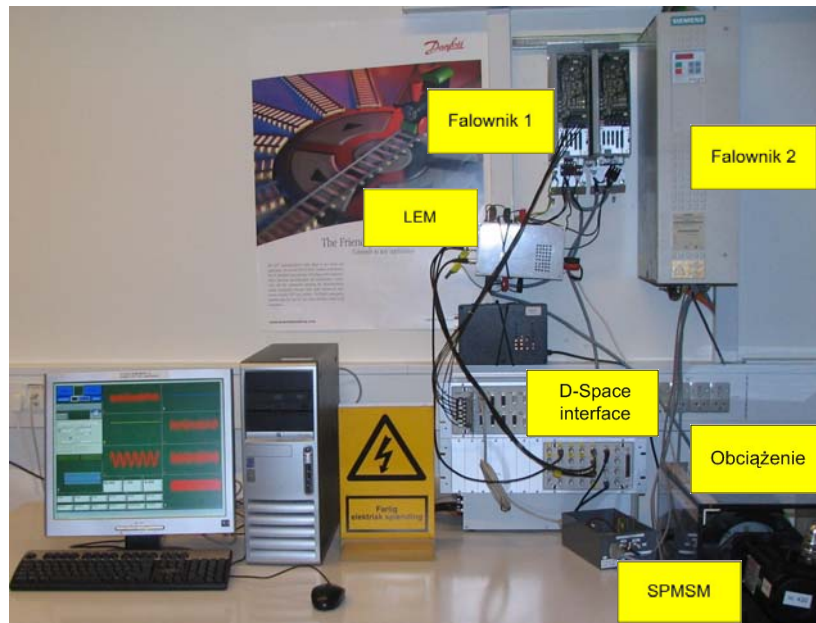
Po demodulacji powyższego sygnału estymuje się położenie i prędkość wirowania wirnika co pokazuje Rys. 8:



Rys. 8. Schemat procedury estymacji kąta obrotu i prędkości

Wyniki eksperymentalne

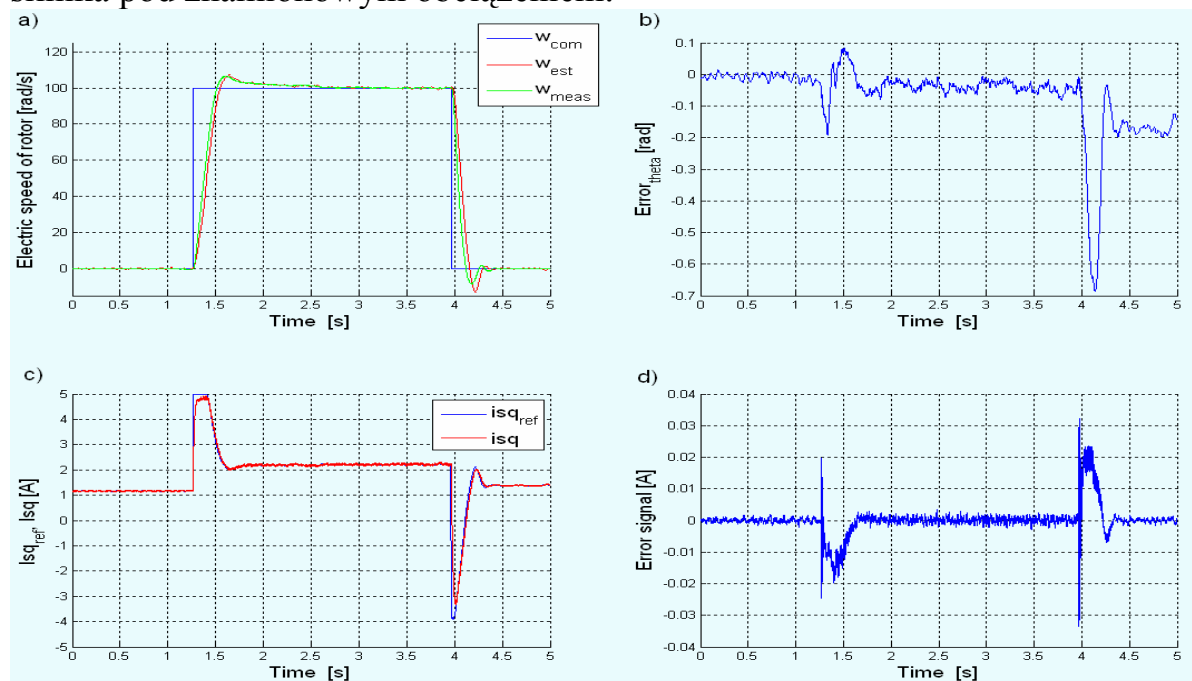
Na Rys. 9 pokazano zdjęcie układu do badań eksperymentalnych.



Rys. 9. Schemat układu pomiarowego

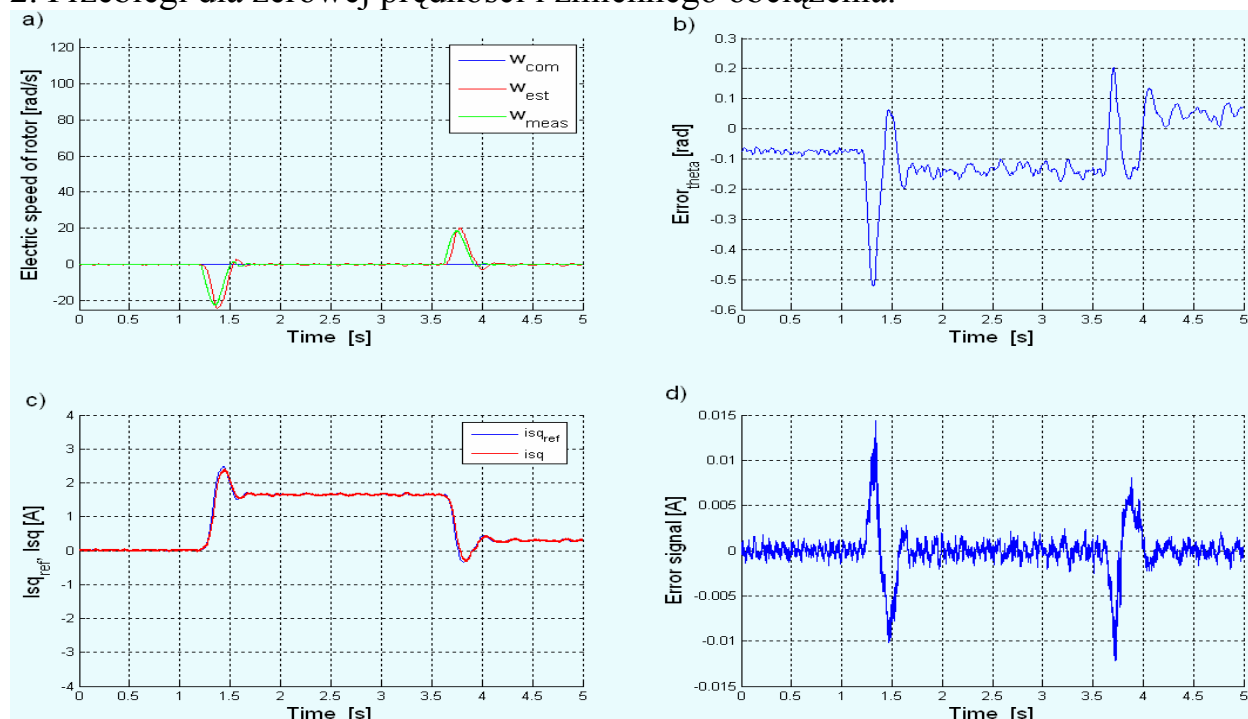
Wyniki badań eksperymentalnych:

1. Przebiegi porównawcze pomiaru i estymacji dla rozruchu i zatrzymania silnika pod znamionowym obciążeniem:



Rys. 10. Wyniki próby rozruchu i hamowania – porównanie pomiaru i estymacji.

2. Przebiegi dla zerowej prędkości i zmiennego obciążenia.



Rys. 11. Wyniki próby dla zerowej prędkości i zmiennego obciążenia. – porównanie pomiaru i estymacji.

Podsumowanie

Popularność i użyteczność silników PMSM w przemyśle wymaga ich niezawodności oraz minimalizacji kosztów produkcji. Bezczylnikowe sterowanie eliminuje potrzebę zastosowania enkodera, co sprawia, iż koszty eksploatacji i produkcji tych silników maleją. Złożoność problemu wymaga kompleksowego podejścia w konstrukcji i analizie własności napędu.