

OPRACOWAŁ: PIOTR SERKIES ZAKŁAD NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO, MECHATRONIKI I AUTOMATYKI
PRZEMYSŁOWEJ



POLITECHNIKA WROCLAWSKA
WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
INSTYTUT MASZYN, NAPĘDÓW I
POMIARÓW ELEKTRYCZNYCH



Układ napędowy z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych (PMSM)

Opracował: dr inż. Piotr Serkies

Wrocław 2011

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest:

- Zapoznanie się z budową i zasadą sterowania silnika synchronicznego z magnesami trwałymi
- Dobór nastaw regulatorów prądu i prędkości
- Eksperymentalna weryfikacja uzyskanych wyników

2. Zakres ćwiczenia

- Budowa modelu symulacyjnego.
- Dobór nastaw regulatorów.
- Badania symulacyjne.
- Badania eksperymentalne.

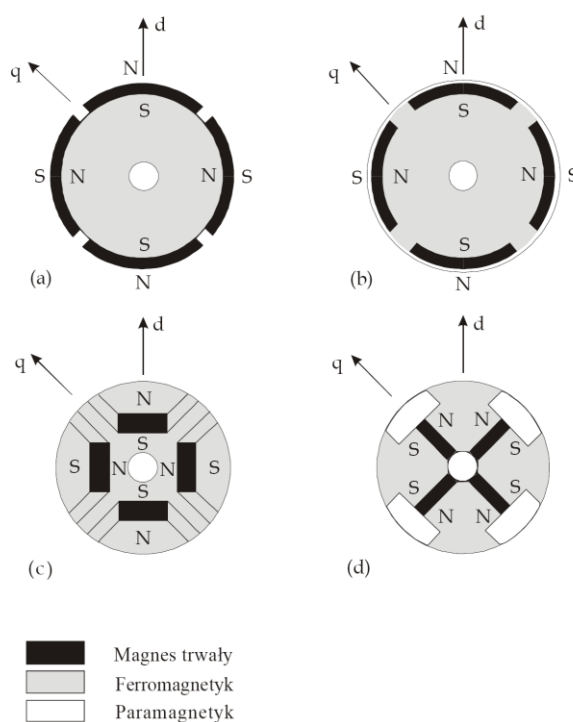
3. Literatura

- [1] materiały z wykładu Podstawy Automatyki
- [2] materiały z wykładu Napęd mechatroniczny
- [5] El-Sharkawi M. A., Fundamentals of electric al drivers, Brooks/Cole, 2000
- [1] Nalepa R., Orłowska-Kowalska T., Szabat K., Assessment of PMSM torque linearity for advanced tuning of high performance electric drives, 14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010
- [2] Michał Janaszek, Optymalizacja statyczna Sterowania silnika synchronicznego o magnesach trwałych, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 214, 2002
- [3] Dokumentacja falownika MSD 3200 firmy MOOG.
- [4] Nalepa R., Mink F., Beineke S., Bahr A., Influence of magnetic saturation of non-salient pole permanent magnets synchronous motors on performance of a servo drive, EPE '09. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009.

1. WPROWADZENIE

W przypadku nowoczesnych rozwiązań napędowych coraz częściej stosowane są silniki synchroniczne o magnesach trwałych (Permanent Magnet Synchronous Motor). W porównaniu z silnikami indukcyjnymi klatkowymi, silniki synchroniczne o magnesach trwałych zasilane z trójfazowych falowników tranzystorowych charakteryzują się większą sprawnością, większym współczynnikiem mocy i większym stosunkiem „moc/ciężar”. Negatywna cecha tych silników jest ich wysoka cena. Jednak pomimo tego ich wykorzystanie w napędach przemysłowych szybko wzrasta. Napędy falownikowe z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych są aktualnie przedmiotem badań i rozwoju w wielu ośrodkach, w szczególności zagranicznych.

Podział silników synchronicznych o magnesach trwałych dokonywany jest na podstawie budowy wirnika. Rozróżnia się dwa rodzaje wirników o magnesach naklejanych na wirnik (rys. 1.a,b) oraz z magnesami zagłębionymi (rys. 1c,d). W zależności od konstrukcji wirnika uzyskuje się różne właściwości elektromagnetyczne i ruchowe.



Rys. 1. Typy konstrukcyjne wirników silników synchronicznych o magnesach trwałych: a),b) magnesy naklejane na wirnik, c),d) magnesy zagłębione w wirniku.

2. MODEL MATEMATYCZNY SILNIKA SYNCHRONICZNEGO O MAGNESACH TRWAŁYCH

2.1. Liniowy model silnika PMSM

Model zapisany został w układzie współrzędnych $d-q$ (układ związany z wirnikiem). W przypadku definiowania modelu silnika synchronicznego o magnesach trwałych przyjmuje się następujące założenia:

- Rozpatruje się trójfazowy silnik synchroniczny o magnesach trwałych o symetrycznej budowie,
- Silnik ma sinusoidalny rozkład strumienia od magnesów trwałych oraz

sinusoidalny przebieg sił elektromotorycznych przy stałej prędkości kątowej,

- Zakłada się liniowość charakterystyki magnesowania,
- Zakłada się niezmienność indukcyjności w osi q oraz równość indukcyjności w obu osiach.

Przy takich założeniach model można opisać z wykorzystaniem prostokątnego układu współrzędnych $d-q$, układ ten związany jest z wirnikiem i wiruje z prędkością mechaniczną. Równania napięciowe oraz momentowe mają następującą postać:

$$\begin{aligned} V_d &= R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - X_q I_q \\ V_q &= R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + L_q \Omega_e I_d + \Omega_m K_e \\ \Omega_e &= \Omega_m \frac{p_p}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: R_s [Ω] – rezystancja stojana, L_d, L_q [H] – indukcyjności w osiach d/q , Ω_e [rad/s] – pulsacja elektryczna, p_p [--] – liczba par biegunów, K_e [$V^{pk}/rad/s$] – stała elektromagnetyczna.

Równanie na moment elektromagnetyczny można wyrazić zależnością:

$$M_e = \frac{3}{2} p_p (\Psi_s \times \mathbf{I}) = \frac{3}{2} p_p |\Psi_s| \cdot |\mathbf{I}| \sin(\delta) \quad (2)$$

gdzie δ kąt pomiędzy wektorami strumienia i prądu.

Równanie (2) można przedstawić w innej formie:

$$M_e = \frac{3}{2} p_p (\Psi_{sd} I_{sq} - \Psi_{sq} I_{sd}) \quad (3)$$

Strumienie w osiach q i d można przedstawić zależnościami:

$$\begin{aligned} \Psi_{sd} &= L_{sd} I_{sd} + \Psi_{PM} \\ \Psi_{sq} &= L_{sq} I_{sq} \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie: Ψ_{PM} – strumień od magnesów trwałych.

Podstawiając równania strumieniowe (4) do równania (3) i porządkując otrzymujemy zależność na moment elektromagnetyczny:

$$M_e = \frac{3}{2} p_p ((L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq} + \Psi_{PM} I_{sq}) \quad (5)$$

Dodatkowo ze względów praktycznych, wprowadza się stałą konstrukcyjną, zwaną stałą momentu k_t (*motor torque constant*). W przypadku silników synchronicznych z magnesami naklejanymi na wirnik indukcyjności w obydwóch osiach są sobie równe $L_d=L_q$:

$$M_e = K_t I_{sq} \quad (6)$$

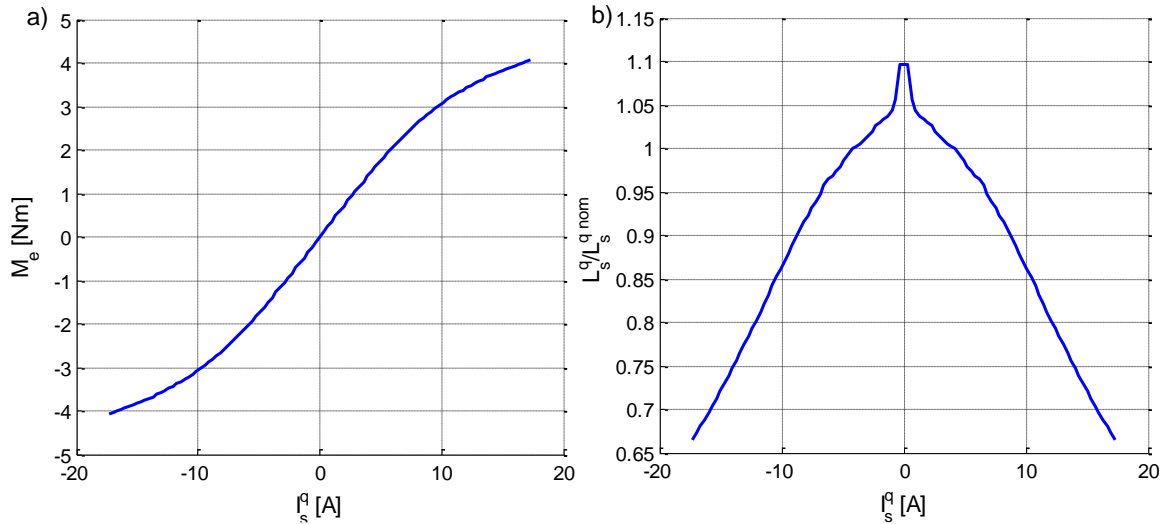
Gdzie: K_t [Nm/A^{RMS}] – stała momentowa

Dodatkowo wprowadza się fikcyjny prąd I_{sdPM} który jest proporcjonalny do strumienia od magnesów trwałych [1].

$$k_t = \frac{3}{2} p_p L_{sd} I_{sdPM} \quad (7)$$

2.2. Nieliniowy model silnika PMSM

W przypadku większości silników synchronicznych o magnesach trwałych stała momentu jest zależna od prądu w osi q w sposób na tyle istotny, że należy to uwzględnić w budowanym modelu (nasycenie magnetyczne). W przypadku oddziaływania prądu stojana następuje osłabienie indukcyjności w osi q . Przykładową charakterystykę zmian k_t w funkcji prądu w osi q przedstawiono na rys 2a, natomiast na rys.2b przedstawiono wpływ prądu I_{sq} na zmianę indukcyjności w osi q .



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki nieliniowe silnika G4x4: a) charakterystyka K_t , b) charakterystyka zmian indukcyjności w osi q .

Równania (1) i (4) przy uwzględnieniu nieliniowości można przedstawić w następujący sposób:

$$\begin{aligned} V_d &= R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_e \tilde{L}_q I_q \\ V_q &= R_s I_q + \tilde{L}_q \frac{dI_q}{dt} + \omega_e \tilde{L}_q I_d + \Omega_m K_e \\ M_e &= \frac{3}{2} p_p \left[(L_d - \tilde{L}_q) I_d I_q + I_q \tilde{K}_t \right] \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie: \tilde{L}_q nieliniowa zależność indukcyjności w osi q od prądu I_{sq} według rys.2b, \tilde{k}_t - nieliniowa funkcja zmian stałej momentu od prądu i_{sq} według rys.2a.

Jak widać w przypadku struktury nieliniowej szczególnie w obszarze osłabiania pola, w którym prąd w osi d jest różny od zera nie można pominąć pierwszego składnika równania na moment elektromagnetyczny. W obszarze stałości momentu widać, że przejściowe

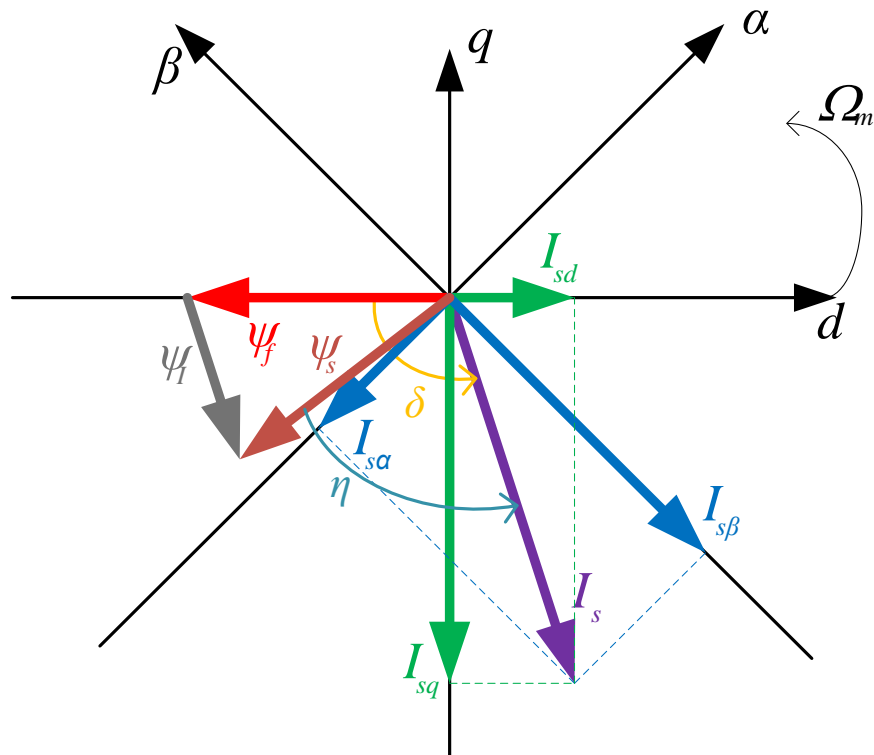
zmiany prądu w osi d również będą wpływać na zmiany momentu elektromagnetycznego.

3. STRUKTURA STEROWANIA

Do sterowania silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi można wykorzystać jedną z następujących strategii:

- 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.

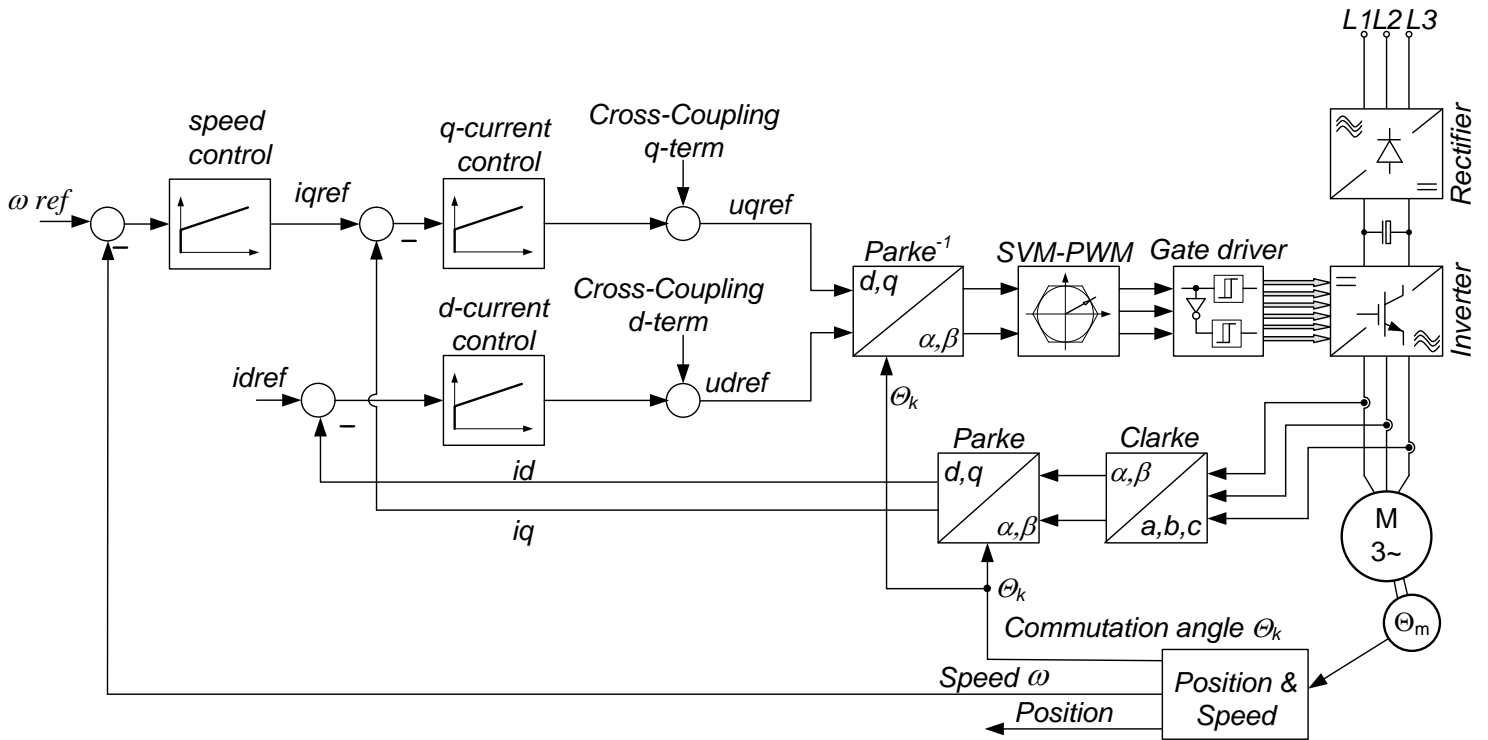
W ćwiczeniu opisana zostanie pierwsza z wymienionych metod sterowania. W przypadku silników synchronicznych, ponieważ strumień wytwarzany jest przez magnes trwały połączony sztywno z wirnikiem, sterowanie orientuje się względem układu współrzędnych wirujących synchronicznie z prędkością mechaniczną, która jest równa prędkości wirowania pola (układ współrzędnych $d-q$). Orjentację taką przedstawiono na rys. 3. Na poniższym rysunku widać, że aby zachować stałą wartość kąta mocy należy tak sterować silnikiem, aby prąd w osi d był równy 0.



Rys. 3. Wykres wektorów przy sterowaniu połowo zorientowanym.

Na rys. 4. przedstawiono pełną strukturę sterowania. Struktura ta jest analogiczna do struktury połowo zorientowanej wykorzystywanej w napędzie indukcyjnym. W strukturze występują dwa niezależne tory sterowania: tor sterowania momentem elektromagnetycznym realizowany jest w osi q , natomiast tor sterowania strumieniem

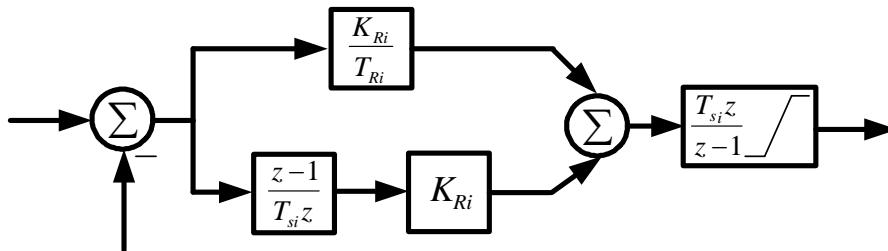
realizowany jest w osi d . Jeśli napęd pracować ma w obszarze stałego momentu prąd w osi d utrzymywany jest na poziomie 0, co wynika ze strategii sterowania.



Rys. 4. Struktura sterowania silnika PMSM

W zaprezentowanej strukturze można wyróżnić następujące modelowane bloki:

- Regulator prędkości i prądów realizowane są, jako dyskretny przyrostowy regulator PI z ograniczeniem na wyjściu. Przykład budowy takiego regulatora pracującego w torze regulacji prądu pokazano na rys. 5. T_{si} – oznacza okres próbkowania pętli regulacji prądu.



Rys. 5. Struktura regulatora

- Bloki transformacji Clarka i Parka. Są to bloki przejścia ze zmiennych fazowych do układu $\alpha-\beta$ (transformacja Clarka (9)), oraz przejścia z układu współrzędnych $\alpha-\beta$ do układu $d-q$ (transformacja Parka(10)). Transformacja Parka wymaga informacji o położeniu kątowym wirnika maszyny synchronicznej.

$$\begin{cases} i_{\alpha} = \frac{2}{3} \left(i_a + i_b \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \right) \\ i_{\beta} = \frac{2}{3} \left(i_b \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) + i_c \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \right) \end{cases} \quad (9)$$

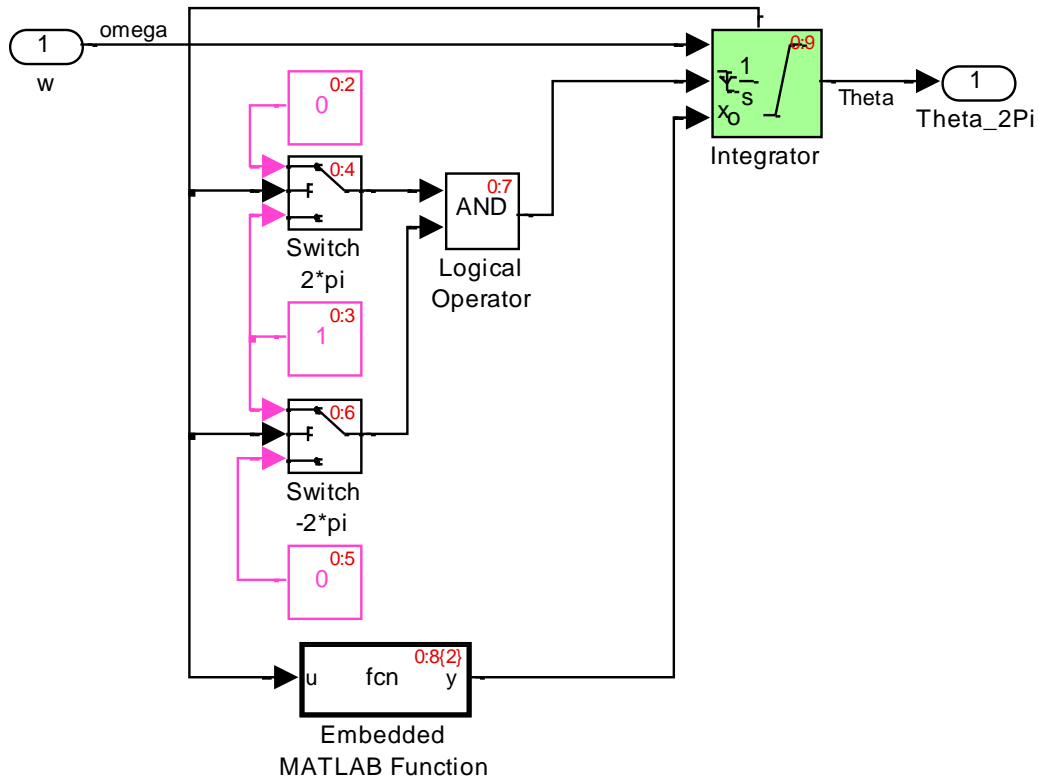
$$\begin{cases} i_d = i_\alpha \cos(\Theta) + i_\beta \sin(\Theta) \\ i_q = -i_\alpha \sin(\Theta) + i_\beta \cos(\Theta) \end{cases} \quad (10)$$

- Bloki odwrotnych transformacji Clarka i Parka. Są to bloki transformacji odwrotnych. Równania (11) przedstawiają transformację odwrotną do transformacji Clarka, natomiast równania (12) przedstawiają transformację odwrotną do transformacji Parka.

$$\begin{cases} i_a = i_\alpha \\ i_b = i_\alpha \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + i_\beta \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ i_c = i_\alpha \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + i_\beta \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} i_\alpha = i_d \cos(\Theta) - i_q \sin(\Theta) \\ i_\beta = i_d \sin(\Theta) + i_q \cos(\Theta) \end{cases} \quad (12)$$

- Modulator wektorowy (SVM-PWM) blok zamieniający sygnały zadanych napięć w osiach α - β na sygnał sterujący pracą kluczy falownika. W badaniach symulacyjnych blok ten zostanie zastąpiony odwrotną transformacją Clarka z dodatkowym szumem i małym opóźnieniem.
- Sterownik bramek układu mocy. Jest to blok realizujący sterowanie kluczami przekształtnika odpowiedzialny za generację czasów martwych dla tranzystorów i dopasowanie napięć. W badaniach symulacyjnych zostanie pominięty.
- Blok position & speed. Najważniejszą funkcją bloku jest wyznaczanie wartości kąta Θ , wykorzystywanego w prostej i odwrotnej transformacji Parka. W praktyce blok ten realizuje rezolwer. Przykład budowy idealnego rezolwera realizującego pomiar kąta położenia wirnika od 0 do 2π przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Struktura bloku Simulinka realizująca idealny rewolwer.

Blok Embedded MATLAB Function pozwala na pisanie funkcji w języku Matlab z poziomu Simulinka. W opisywanym przypadku blok ten realizuje obliczenie wartości początkowej po zerowaniu integratora w zależności od stanu kąta. Przykład takiej funkcji przedstawiony jest na rys. 7.

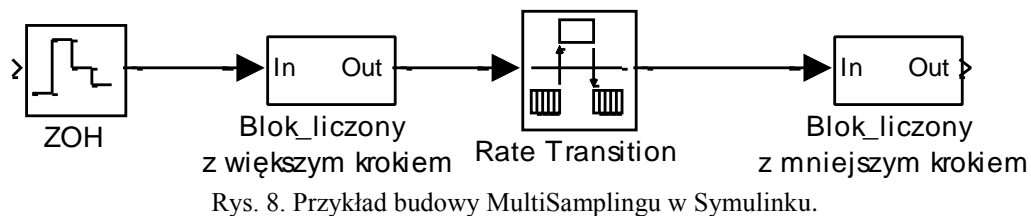
```

1 |function y = fcn(u)
2 | %#eml
3 | y=0;
4 |     if((u >= 0) && (u <= 2*pi)) /* pomiędzy 0...2*Pi */
5 |         y = 0;
6 |     elseif(u > 2*pi) /* > 2*Pi */
7 |         y = 0;
8 |     elseif(u < 0) /* < 0 */
9 |         y = 2*pi;
10 |     end
11 | end
    
```

Rys. 7. Przykładowa realizacja obliczenia wartości początkowej kąta położenia wirnika w rewolwerze.

- W przemysłowych sterownikach wykorzystywane są różne czasy próbkowania w zależności od obwodu regulacji. Obwody regulacji prądu z racji małych stałych czasowych są próbkowane z większą częstotliwością niż obwody regulacji prędkości, gdzie stałe czasowe są większe. W modelu symulacyjnym należy uwzględnić Multi-Sampling. W Simulinku

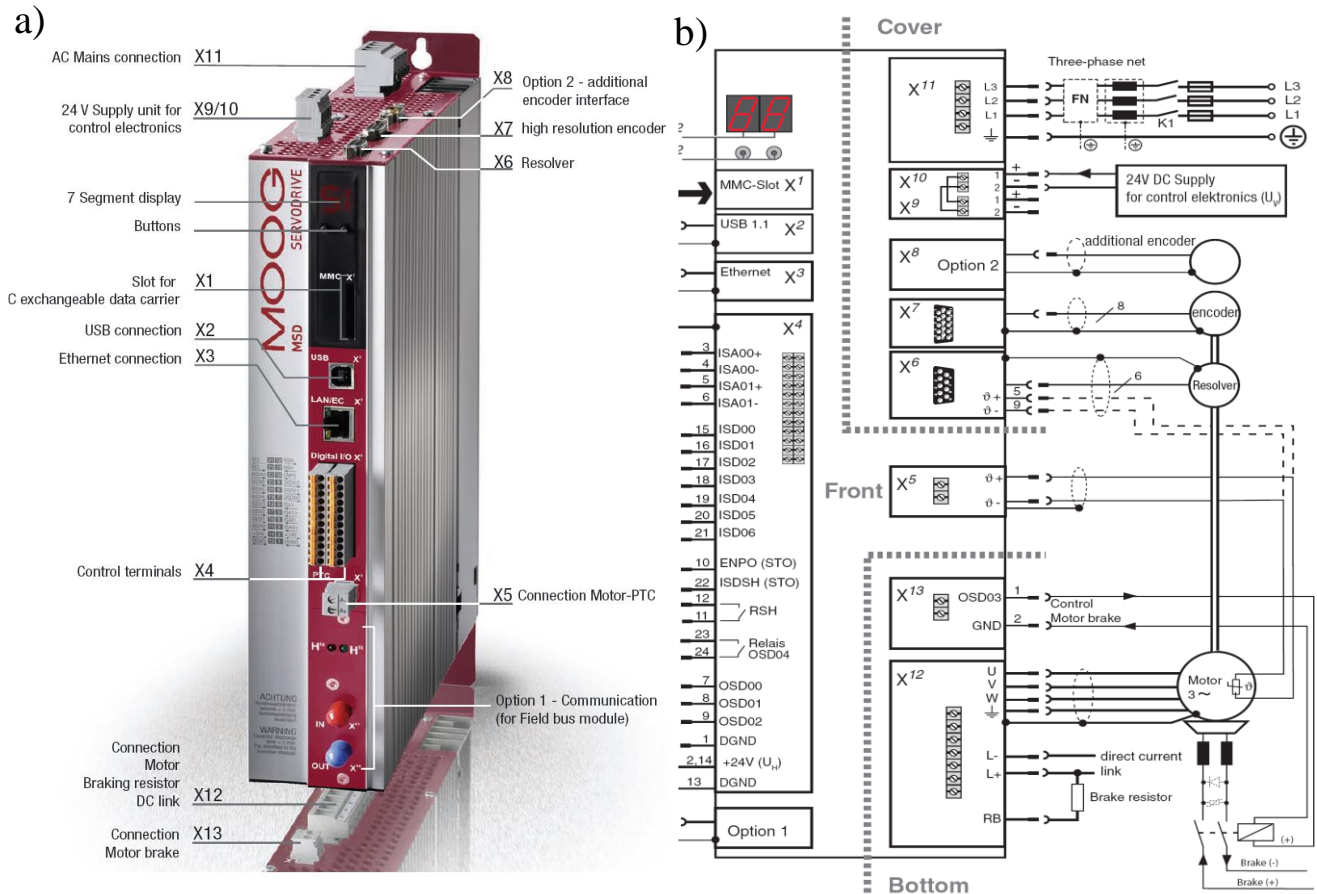
MultiSampling realizuje się przez bloki *Zero_Order_Hold* Na wejściu bloku o mniejszej częstotliwości próbkowania, oraz blok *Rate Transition* na wyjściu bloku o innej częstotliwości próbkowania. W ustawieniach symulacji podany musi być najmniejszy krok, z jakim ma być liczony układ. Na rys. 8. przedstawiono przykład budowy układu z MultiSamplingiem.



Rys. 8. Przykład budowy MultiSamplingu w Symulinku.

4. Opis stanowiska laboratoryjnego

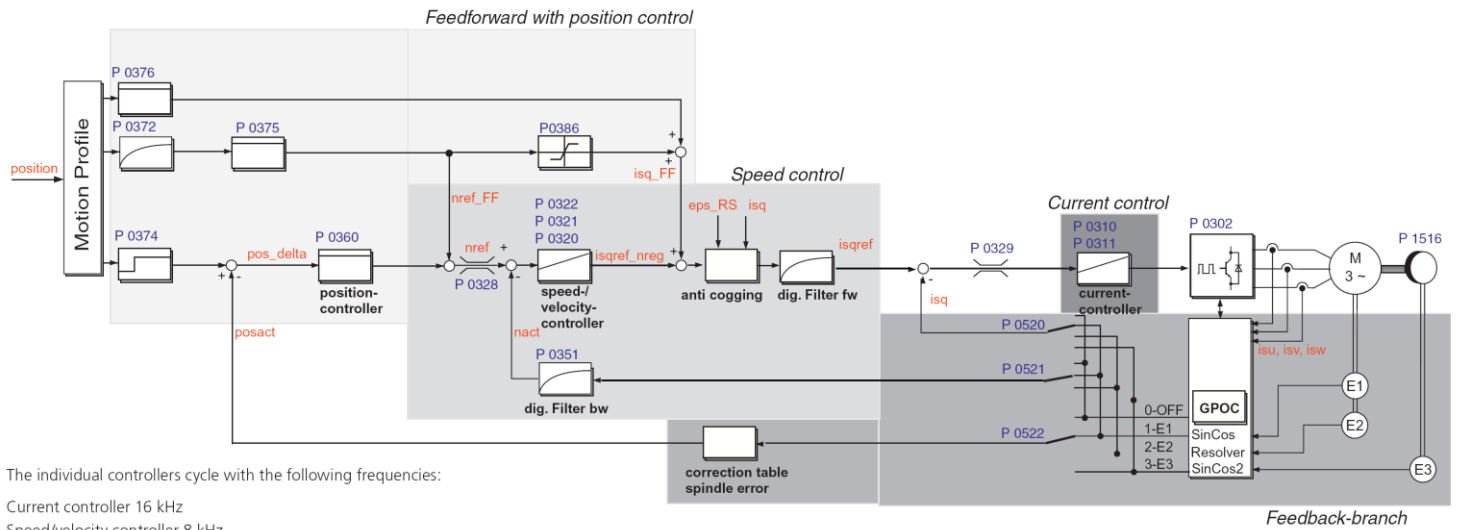
Stanowisko laboratoryjne zbudowane jest z przemysłowego falownika *MSD 3200* firmy *MOOG*, współpracującego z komputerem *PC*. Oprogramowanie *DriveAdministrator* pozwala na pełną parametryzację struktury sterowania falownikiem. Parametryzacji napędu można dokonać dwójako: przy użyciu interfejsu graficznego, oraz z wykorzystaniem list parametrów. Na rys. 9. przedstawiono wygląd falownika oraz jego wyprowadzenia.



Rys. 9. Fizyczny wygląd falownika MSD (a), Opis wyprowadzeń i sposób przyłączenia silnika (b).

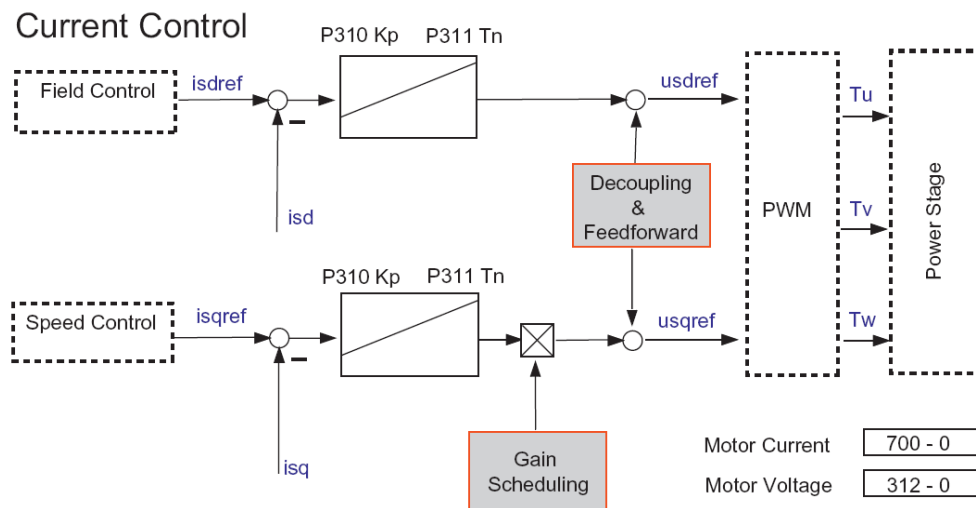
W jednostce sterującej zaimplementowano pełną strukturę sterowania, jej schemat przedstawiono na rys. 10. Natomiast na rys. 11 przedstawiono wewnętrzną strukturę regulacji prądów w osiach d i q.

Dodatkowo na rys. 10 zaznaczono różnymi kolorami poszczególne bloki funkcjonalne, oraz numery parametrów odpowiedzialnych za strojenie danego bloku. Jak widać struktura pozwala na śledzenie zadanego sygnału pozycji. Struktura feedforward pozwala na minimalizację opóźnień śledzenia sygnałów zadanych poprzez wprowadzenie sygnału wyprzedzającego (struktura nie będzie badana w ćwiczeniu). Istnieje również możliwość wyboru odpowiedniego sygnału dla sprzężenia zwrotnego w regulatorze prędkości. Na rys. 10 podano również częstotliwości próbkowania poszczególnych obwodów.



Rys. 10. Struktura sterowania zaimplementowana w falowniku MSD 3200.

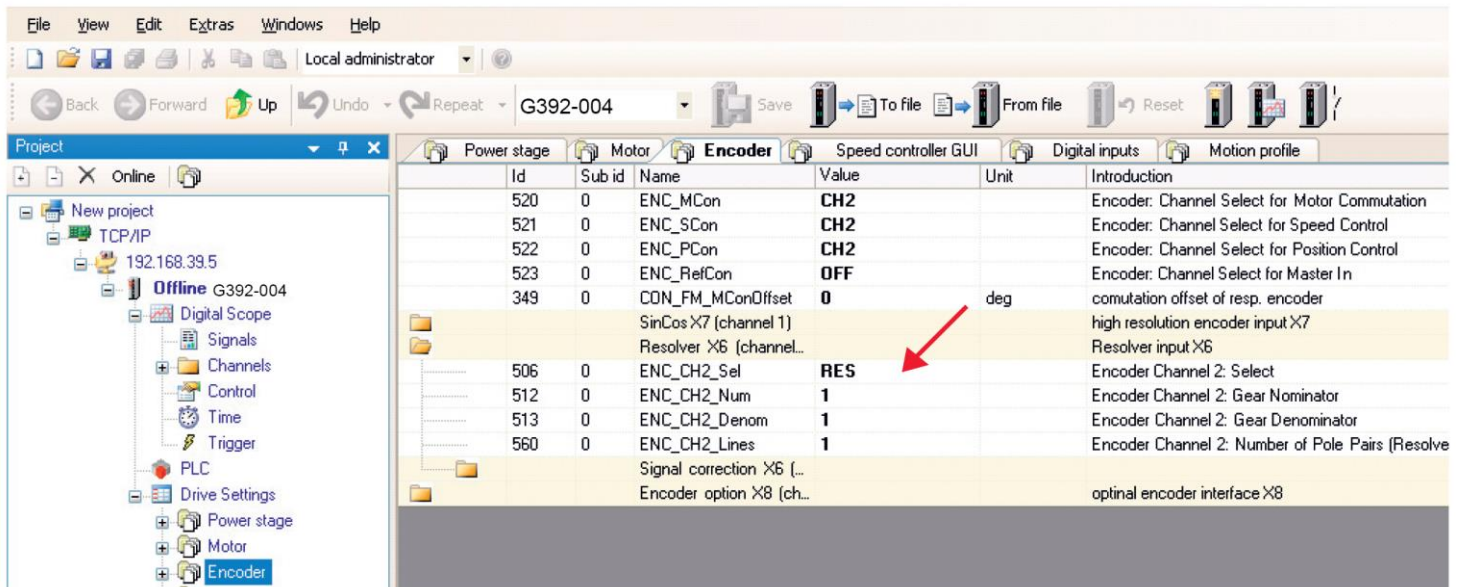
Jak widać na rys. 11 w strukturze nie ma możliwości strojenia osobno regulatora w osi d i q. Oba regulatory strojone są przez parę tych samych parametrów.



Rys. 11. Struktura regulacji prądów w osiach d i q.

Na rys. 12. przedstawiono okno programu Drive Administrator. Okno to możemy podzielić na trzy podstawowe obszary:

- Obszar ikon szybkiego uruchamiania. Obszar ten zajmuje górny pasek.
- Obszar projektu, gdzie znajduje się drzewo katalogów napędu. Obszar ten znajduje się po lewej stronie okna
- Obszar roboczy, w którym otwierane są okienka konfiguracyjne.



Rys. 12. Okno programu Drive Administrator.

5. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia laboratoryjnego jest zapoznanie się z właściwościami dynamicznymi układu napędowego z Silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych przy sterowaniu połowo – zorientowanym, realizowanym w układzie jaki omówiono w instrukcji.

Ćwiczenie składa się z dwóch części:

1. Budowa modelu symulacyjnego silnika synchronicznego o magnesach trwałych wraz ze strukturą sterowania. W części tej przeprowadzone zostaną badania symulacyjne mające na celu zapoznanie się z właściwościami dynamicznymi omawianego napędu, oraz z wpływem nieliniowości silnika na zachowanie się struktury sterowania.
2. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych na stanowisku laboratoryjnym. W części tej zostanie przeprowadzona analiza sposobu parametryzacji falownika oraz przeprowadzone badania nad wpływem wybranych parametrów na pracę napędu. Parametry do przebadania zostaną ustalone osobno z każdą grupą ćwiczeniową.

W sprawozdaniu umieścić należy strukturę sterowania oraz ustalone z prowadzącym ćwiczenia wyniki symulacyjne oraz eksperymentalne. Wyniki muszą zawierać komentarz studentów.

Szczegółowy program ćwiczenia:

Część 1.

1. Zapoznanie się z modelem liniowym i nieliniowym maszyny synchronicznej o magnesach trwałych, oraz budowa tych modeli w programie *Matlab/Symulink*
2. Zapoznanie się ze strukturą sterowania napędów PMSM, budowa modelu symulacyjnego
3. Dokonanie strojenia regulatorów w strukturze sterowania, oraz sprawdzenie wpływu nieliniowości silnika na pracę napędu

Część 2.

1. Zapoznanie się ze stanowiskiem laboratoryjnym, oraz oprogramowaniem sterującym
2. Zapoznanie się ze sposobem parametryzacji struktury sterowania w środowisku *Drive Administrator*.
3. Przeprowadzenie wstępnej parametryzacji napędu, ściągnięcie wstępnych wyników eksperymentalnych.
4. Wykonanie badań zleconych przez prowadzącego. W skład badań mogą wchodzić np. sprawdzenie wpływu częstotliwości modulacji na właściwości dynamiczne sterowania momentem elektromagnetycznym.

Pytania kontrolne:

1. Omówić strukturę sterowania napędami z silnikami PMSM
2. Model matematyczny silnika PMSM, gdzie występują główne nieliniowości
3. MultiSampling – czym jest i jaki jest cel jego stosowania

Załączniki:

Dane silnika Gx4:

continuous stall torque	① Mo [Nm]	1,50 Nm
continuous stall current	① Io [Arms]	2,99 Arms
peak stall torque	Mmax [Nm]	3,3 Nm
peak stall current	Imax [Arms]	8,0 Arms

rated torque	→ Mn [Nm]	1,09 Nm
rated current	→ In [Arms]	2,2 Arms
rated power	→ Pn [W]	893 W
rated speed	→ Nn [rpm]	7800 rpm

theoretical no load speed	② Ntheo [rpm]	12410 rpm
maximum speed	Nmax [rpm]	17570 rpm
torque constant	kt [Nm/Arms]	0,501 Nm/Arms
EMK-constant	ke [Vpk/rad/s]	0,435 Vpk/rad/s
terminal to terminal resistance	Rtt [Ohm]	6,700 Ohm
terminal to terminal inductance	Ltt [mH]	11,935 mH
inductance Ld	Ld [mH]	7,202 mH
inductance Lq	Lq [mH]	7,233 mH
thermal resistance	Rth [°C/W]	0,799 °C / W
electr. time constant	T [ms]	1,781 ms
inertia w/o brake	J [kgcm ²]	1,0 kgcm²
mass w/o brake	m [kg]	3,0 kg

inertia with small brake	J [kgcm ²]	1,6 kgcm²
inertia with big brake	J [kgcm ²]	2,0 kgcm²
mass with small brake	m [kg]	3,6 kg
mass with big brake	m [kg]	3,8 kg

Konfiguracja parametrów symulacji:

s: model_PMSM_LABORKA/Configuration (Active)

Simulation time

Start time: 0.0 Stop time: 0.05

Solver options

Type: Variable-step Solver: ode23t (mod. stiff/Trapezoidal)

Max step size: 5e-6 Relative tolerance: 4e-6

Min step size: auto Absolute tolerance: 3e-6

Initial step size: auto Shape preservation: Disable all

Solver reset method: Fast

Number of consecutive min steps: 1

Tasking and sample time options

Tasking mode for periodic sample times: Auto

Automatically handle rate transition for data transfer

Higher priority value indicates higher task priority

Zero-crossing options

Zero-crossing control: Enable all Algorithm: Nonadaptive

Time tolerance: 10*128*eps Signal threshold: auto

Number of consecutive zero crossings: 1000

OK Cancel Help Apply