



Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów  
Elektrycznych  
Politechniki Wrocławskiej  
**ZAKŁAD NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH**



## LABORATORIUM Z AUTOMATYKI NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO

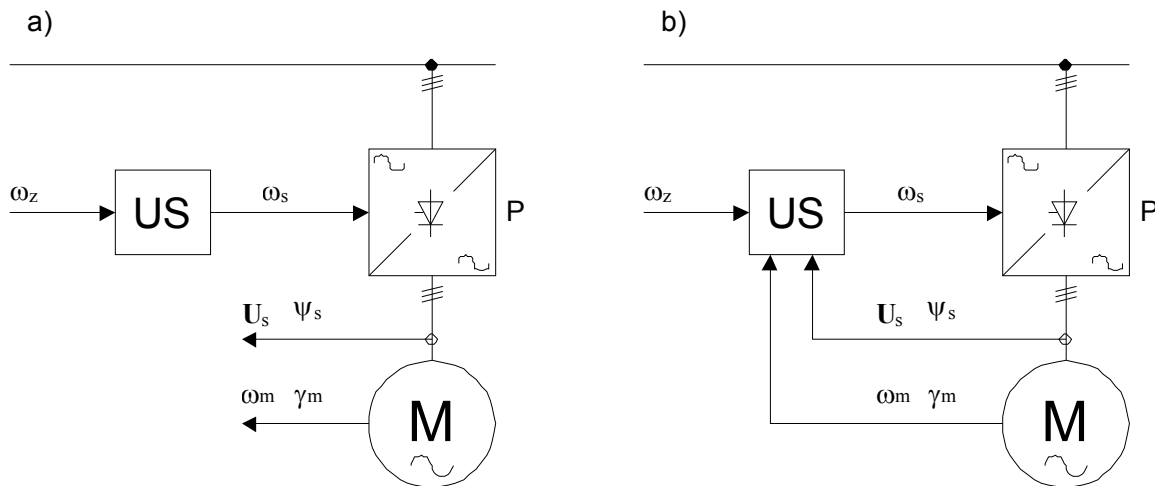
### **Sterowanie wektorowe polowo – zorientowane układu napędowego z silnikiem indukcyjnym**

Wrocław 2004

## 1. Metody częstotliwościowego sterowania silnika indukcyjnego

Wszystkie układy sterowania stosowane w przemyśle można podzielić na układy sterowania zewnętrznego i wewnętrznego. W zależności od tego w jakiego rodzaju procesie przemysłowym ma być stosowany silnik indukcyjny, każda z tych metod sterowania ma swoje wady i zalety.

W układzie ze sterowaniem zewnętrznym sterowanie odbywa się bez udziału maszyny, natomiast w układzie o sterowaniu wewnętrznym wykorzystuje się pomiary wybranych wielkości, tj. prędkość kątową, kąt położenia wału, wektor przestrzenny napięcia stojana  $u_s$  lub strumienia  $I_s$  do realizacji sprzężeń zwrotnych. Sterowanie takie wymaga specjalistycznych układów sterowania, które znacznie komplikują układ – dlatego też stosowane jest ono zazwyczaj wszędzie tam gdzie wymagana jest bardzo dobra dynamika oraz dobre właściwości dynamiczne układu napędowego.



Rys. 1.1 Sposoby sterowania silników prądu przemiennego w układzie:  
a) sterowania zewnętrznego, b) sterowania wewnętrznego

Wadą układów ze sterowaniem zewnętrznym jest to, że każdorazowa zmiana częstotliwości zasilania lub momentu obciążenia wywołuje niekontrolowane elektromagnetyczne procesy przejściowe w maszynie. Objawia się to skłonnością do słabo tłumionych i długo trwających oscylacji, utykaniem (silnik klatkowy) lub wypadaniem z synchronizmu (silnik synchroniczny). Powoduje to, że napędy z takim sterowaniem są stosowane tam gdzie nie są wymagane bardzo dobre właściwości dynamiczne układu napędowego, częste zmiany prędkości lub obciążenia. Wad tych nie ma układ sterowania wewnętrznego, który dzięki informacjom z czujników pomiarowych szybko reaguje na udarowe zmiany momentu obciążenia lub zmiany prędkości zadanej.

W układach takich używane są prawie wyłącznie przemienniki częstotliwości z regulacją prądu stojana uzupełnione odpowiednim układem wewnętrznego sterowania częstotliwości.

Sterowanie wewnętrzne polega na takim zadawaniu częstotliwości zasilania, aby w każdej chwili kontrolowane były zależności fazowe w maszynie prądu przemiennego. Polega więc na synchronizacji impulsów sterujących częstotliwości przemiennika z przebiegiem strumienia wirującego w maszynie. Synchronizacja ta może być realizowana różnie zależnie od tego, jakie wielkości są bezpośrednio mierzone w maszynie i jakie są wymagania odnośnie do właściwości dynamicznych i statycznych napędu. Jest rzeczą charakterystyczną jednak, że układ sterowania wewnętrznego wraz z przemiennikiem częstotliwości spełnia zadanie

podobne do roli, jaką ma komutator w maszynie prądu stałego, tzn. przełącza prąd twornika do odpowiednich uzwojeń znajdujących się pod biegunami maszyny. Mówi się więc o orientacji wektora układu prądu twornika względem wektora strumienia. Dlatego silnik indukcyjny w układzie sterowania wewnętrznego ze sterowaniem wektorowym ma właściwości zbliżone do właściwości obcowzbudnej maszyny prądu stałego.

Powyższy podział uwzględnia schematyczny obraz układu sterowania, tzn.: czy sterowanie odbywa się przez urządzenie zewnętrzne bez udziału silnika, czy przez urządzenia wewnętrzne (sterowanie wewnętrzne) posiadające dostęp do informacji o wejściu i wyjściu obiektu. Natomiast podział ze względu na warunki optymalizacji statycznej uwzględnia procesy i zjawiska zachodzące w układzie sterowania częstotliwościowego maszyny indukcyjnej w taki sposób, aby zminimalizować całkowite straty napędu.

Optymalizacja statyczna sterowania zapewnia przybieranie przez poszczególne elektromagnetyczne zmienne stanu takich wartości w stanach ustalonych, które minimalizują składniki  $I_1$  i  $I_2$  wskaźnika jakości sterowania.

Wskaźniki jakości sterowania maszyny prądu przemiennego w stanach statycznych można sformułować następująco:

$$I = I_1 + I_2 = \alpha_1 \|\Psi_z - \Psi\| + \alpha_2 \|\Psi_s \mathbf{i}_s\|$$

gdzie:

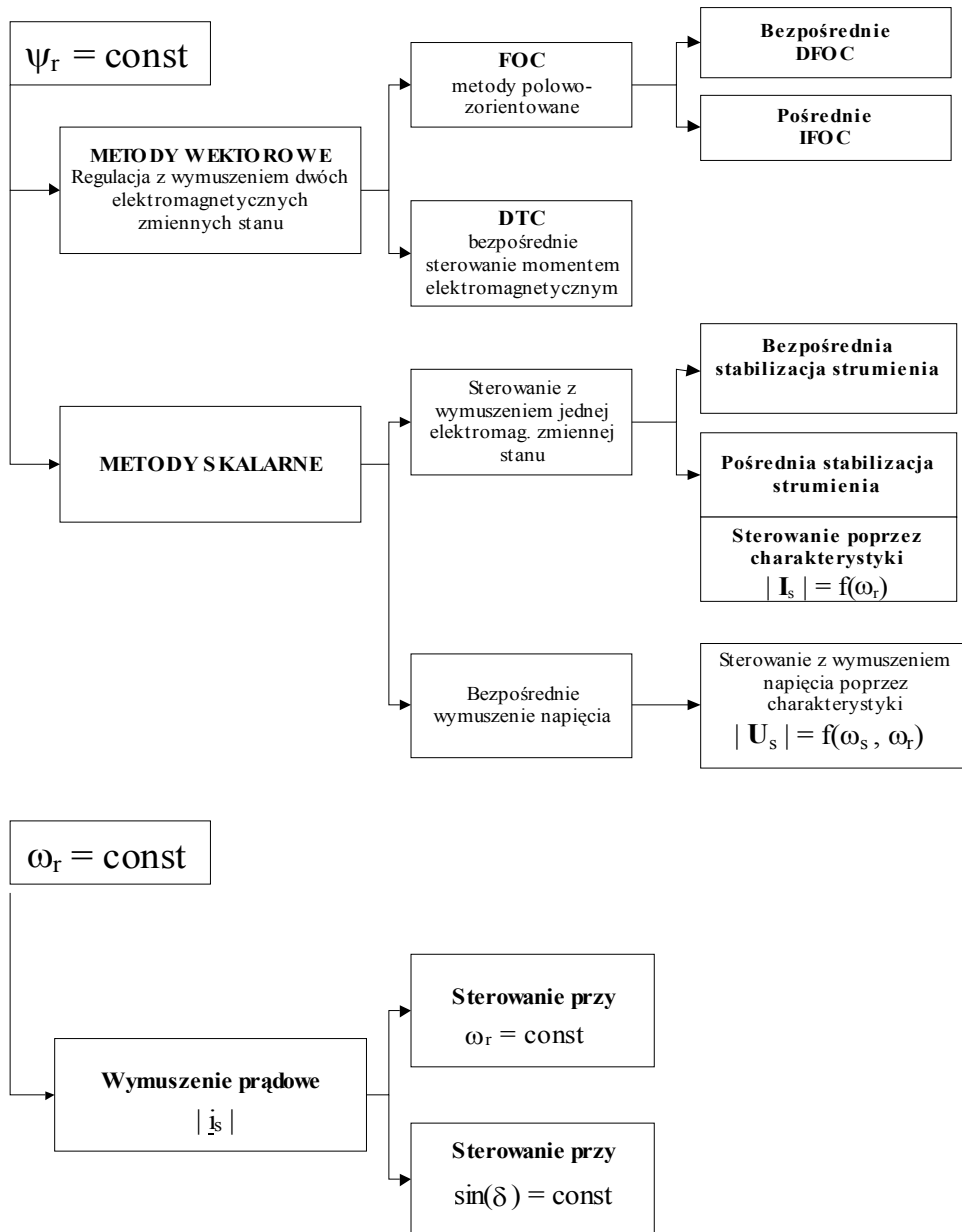
$\|\Psi_z - \Psi\|$  - jest to uchyb strumienia skojarzonego stojana, rozumiany jako norma różnicy między wektorem strumienia skojarzonego stojana lub wirnika zadanego  $1_z$  a wektorem strumienia skojarzonego stojana lub wirnika w maszynie  $1$ ,

$\|\Psi_s \mathbf{i}_s\|$  - współczynnik poboru mocy biernej, rozumiany jako wartość bezwzględna iloczynu skalarnego wektorów strumienia skojarzonego stojana  $1_s$  oraz prądu stojana  $\mathbf{i}_s$ .

Minimalizacja składnika  $I_1$  prowadzi do sterowania maszyny asynchronicznej z zachowaniem stałej, znamionowej wartości amplitudy strumienia skojarzonego stojana  $1_s$  lub strumienia wirnika  $1_r$ .

Minimalizacja składnika  $I_2$  prowadzi do sterowania maszyny indukcyjnej z zachowaniem stałej wartości częstotliwości wirnika. Przy tym sposobie sterowania maszyna pobiera minimalną moc bierną.

Podział metod sterowania momentem i prędkością silników indukcyjnych ze względu na wymagania optymalizacji statycznej przedstawiono na rysunku 1.2.



Rys. 1.2 Podział metod sterowania ze względu na optymalizację statyczną

## 2. Podstawy metody polowo – zorientowanej momentu silnika indukcyjnego

### 2.1. Model matematyczny silnika indukcyjnego

Model matematyczny silnika indukcyjnego formułuje się przy założeniu elektrycznej i magnetycznej symetrii uzwojeń stojana i wirnika, jednorodnej szczeliny powietrznej wirnika, sinusoidalnego rozkładu indukcji w szczelinie oraz pominięciu zjawisk nieliniowych. Można go przedstawić za pomocą znanego układu równań wektorowych, w których zmiennymi stanu są:  $\mathbf{x}_1 = \mathbf{i}_s$  – przestrzenny wektor prądu stojana oraz  $\mathbf{x}_2 = \mathbf{1}_r$  – przestrzenny wektor strumienia skojarzonego z uzwojeniem wirnika, wirujące z prędkością  $1_k$  (w jednostkach względnych):  
I - równania obwodów elektromagnetycznych maszyny:

$$\mathbf{u}_{sk} = r_s \mathbf{i}_{sk} + T_N \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{sk} + j\omega_k \boldsymbol{\Psi}_{sk} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{u}_{rk} = r_r \mathbf{i}_{rk} + T_N \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{rk} + j(\omega_k - \omega_m) \boldsymbol{\Psi}_{rk} \quad (2.2)$$

$$\boldsymbol{\Psi}_{sk} = x_s \mathbf{i}_{sk} + x_M \mathbf{i}_{rk} \quad (2.3)$$

$$\boldsymbol{\Psi}_{rk} = x_r \mathbf{i}_{rk} + x_M \mathbf{i}_{sk} \quad (2.4)$$

II – równanie ruchu:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{T_M} (m_e - m_o) \quad (2.5)$$

$$m_e = |\boldsymbol{\Psi}_{sk} \times \mathbf{i}_{sk}| \operatorname{sgn}\{\boldsymbol{\Psi}_{sk} \times \mathbf{i}_{sk}\} = \operatorname{Im}\{\boldsymbol{\Psi}_{sk} \mathbf{i}_{sk}^*\} \quad (2.6)$$

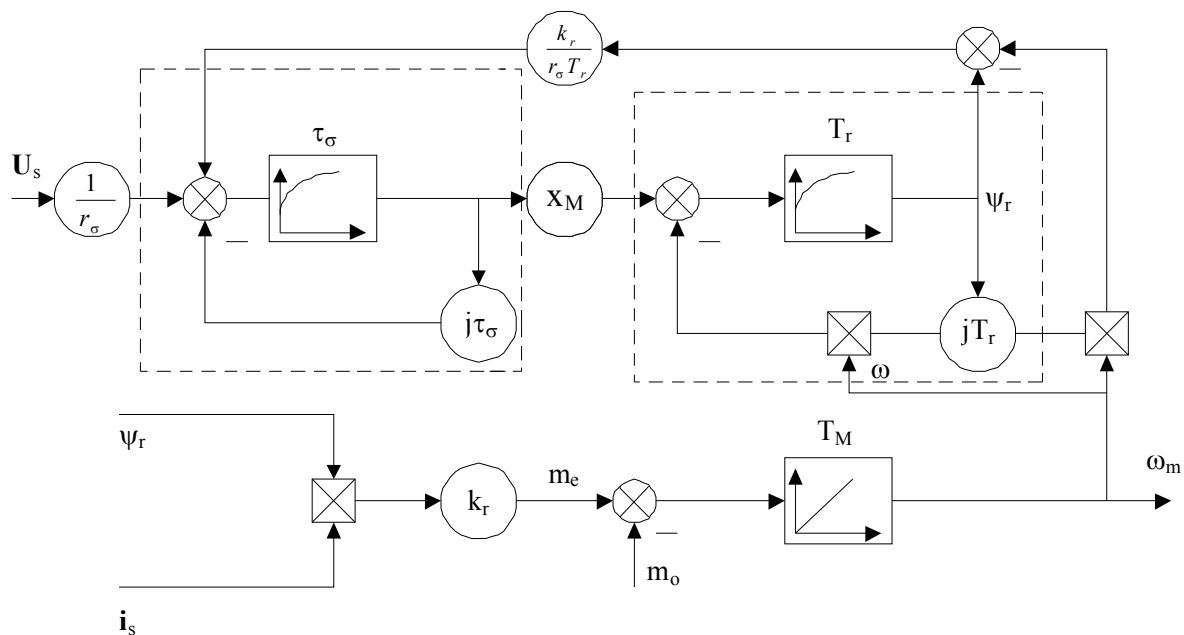
$$\text{gdzie: } T_M = \frac{J\omega_b}{pM_b}, T_N = \frac{1}{\omega_b}.$$

Po wprowadzeniu następujących oznaczeń:

$$\tau_s = \frac{x_s}{r_s \omega_b}, \tau_r = \frac{x_r}{r_r \omega_b}, \tau_\sigma = \frac{\sigma x_s}{r_\sigma \omega_b}, r_\sigma = r_s + k_r^2 r_r, \quad (2.7)$$

$$k_r = \frac{x_M}{x_r}, k_s = \frac{x_M}{x_s}, \sigma = 1 - k_s k_r$$

Model ten można przedstawić w postaci schematu z rysunku 2.1 przy założeniu stacjonarnego układu współrzędnych ( $1_k = 0$ ).



Rys. 2.1 Schemat blokowy silnika indukcyjnego przedstawiony za pomocą wektorów przestrzennych prądu stojana i strumienia wirnika

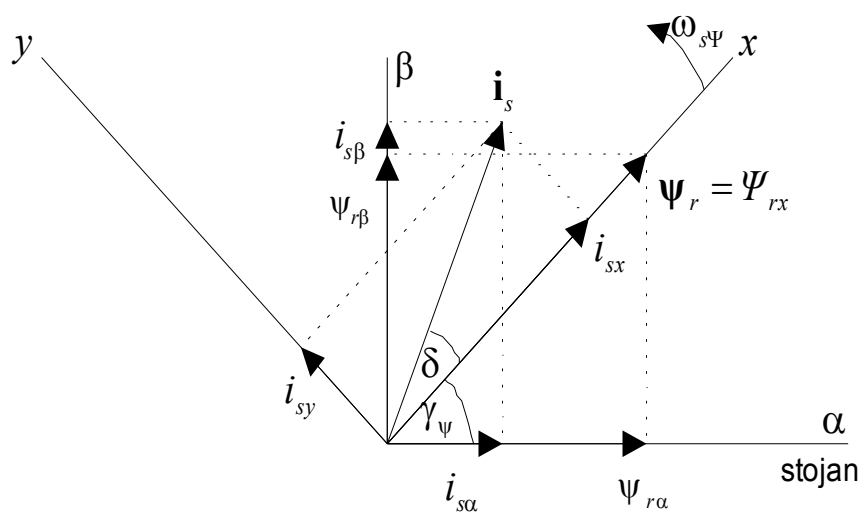
## 2.2. Właściwości dynamiczne silnika indukcyjnego przy wymuszeniu prądu stojana

Układy sterowania wewnętrzne zostały rozwinięte w celu:

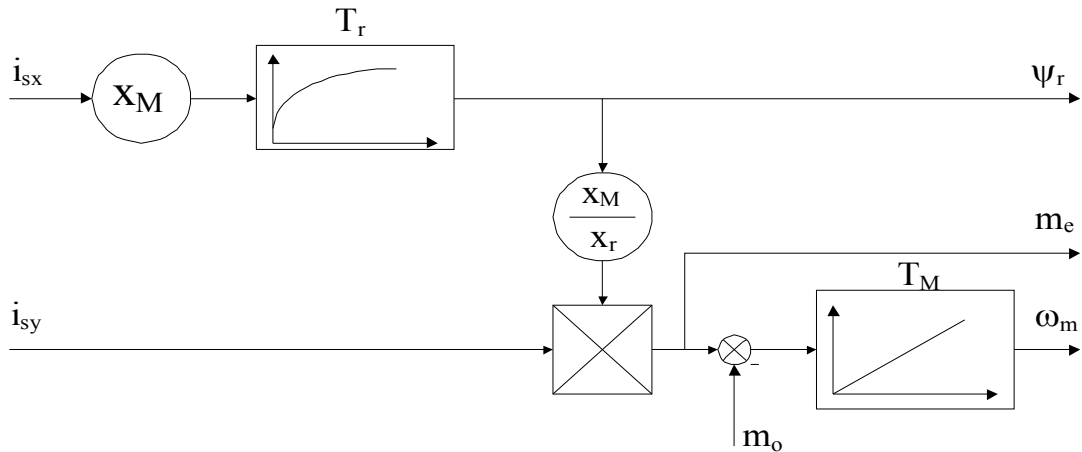
- uzyskania kontroli i ograniczenia wartości częstotliwości poślizgu, co automatycznie zabezpiecza maszynę przed utknięciem;
- poprawy właściwości dynamicznych sterowania momentem rozwijanym przez maszynę indukcyjną, co pozwala wykorzystać ją w szybkich napędach nawrotnych.

Do takich metod należy między innymi metoda sterowania polowo – zorientowanego.

Schemat blokowy maszyny indukcyjnej przy sterowaniu ze źródła o regulowanym prądzie, przy założeniu orientacji wektora prądu względem wektora strumienia wirnika w polowo - zorientowanym (rysunek 3.2) układzie współrzędnych  $x - y$  przedstawia rysunek 2.3.



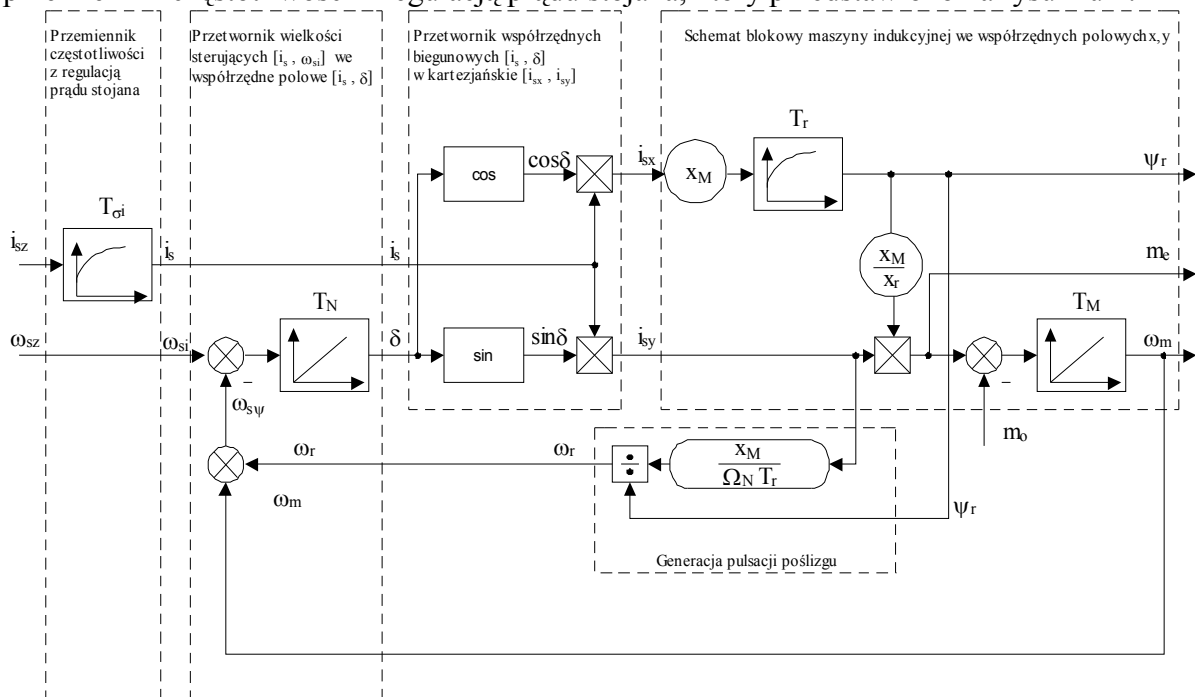
Rys. 2.2 Wykres wektorowy zmiennych stanu silnika indukcyjnego we współrzędnych połowych dla metody polowo - zorientowanej



Rys. 2.3 Schemat blokowy maszyny indukcyjnej we współrzędnych polowych

Strumień wirnika  $\psi_r$  zależy tylko od składowej  $i_{sx}$ . Jeżeli  $i_{sx} = \text{const}$ , to moment rozwijany przez maszynę można – tak jak w maszynie obcowzbudnej prądu stałego – sterować bezinercyjnie poprzez zmianę składowej  $i_{sy}$ .

Dzięki relacjom między wielkościami wyjściowymi przemiennika, a składowymi polowymi x – y można uzyskać pełny schemat blokowy maszyny indukcyjnej zasilanej przez przemiennik częstotliwości z regulacją prądu stojana, który przedstawiono na rysunku 2.4



Rys. 2.4 Pełny schemat blokowy maszyny indukcyjnej zasilanej przez przemiennik częstotliwości z regulacją prądu stojana

Właściwości struktury pokazanej na rysunku 2.4:

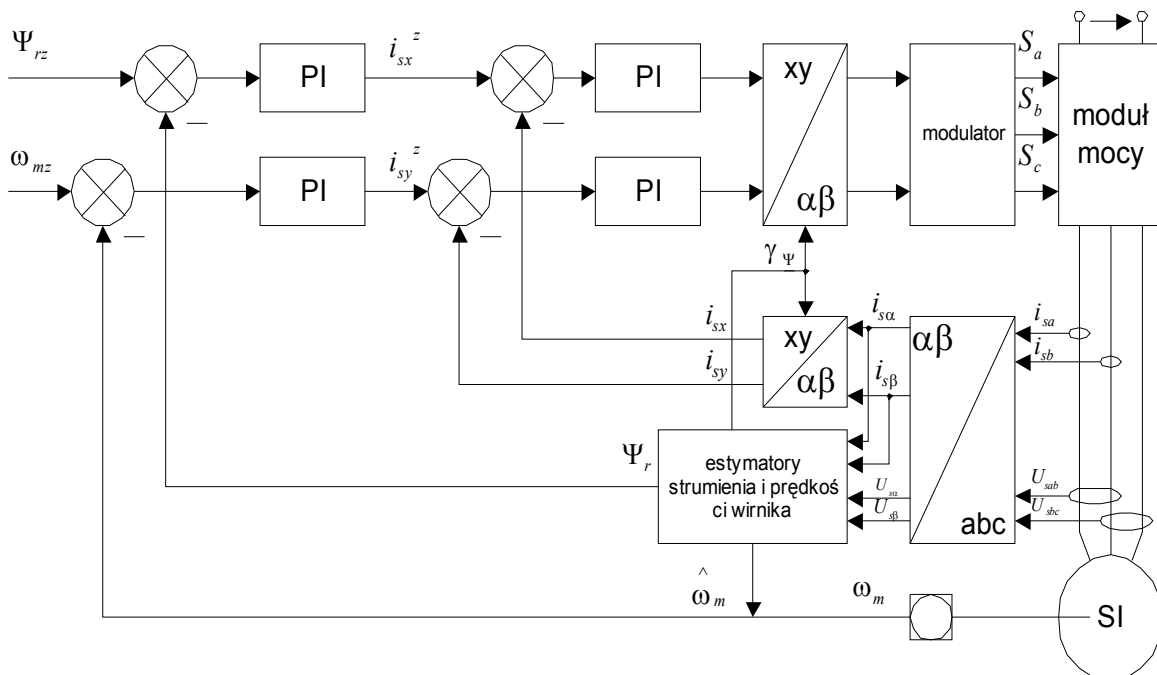
- kąt obciążenia  $\delta$  jest określony jako całka z różnicy częstotliwości wyjściowej przemiennika  $1_{si}$  i prędkości synchronicznej strumienia wirnika  $1_{s1} = 1_m + 1_r$ ;
- w stanach ustalonych wektory prądu  $\mathbf{i}_s$  oraz strumienia  $\mathbf{1}_r$  wirują z jednakową prędkością kątową  $1_{si} = 1_{s1}$ , kąt obciążenia pozostaje stały ( $d\delta/dt = 0$ );

- w stanach przejściowych wywołanych zmianą częstotliwości przemiennika lub momentu obciążenia  $1_{s1}$ , kąt obciążenia zmienia się  $d1/dt \neq 0$ . Powoduje to nawet przy stałej amplitudzie  $i_s$ , zmiany obu polowo – zorientowanych składowych  $i_{sx}$  oraz  $i_{sy}$ , które następnie poprzez  $1_m$  i  $1_r$  oddziałują zwrotnie na  $1_{s1}$ ;
- zmiany te oddziałują na człon inercyjny ( $T_r$ ) obwodu wirnika i całkujący ( $T_M$ ) układu mechanicznego oraz elementy nieliniowe tak, że maszyna reprezentuje nieliniową strukturę podatną na powstawanie oscylacji. O tym, jaka będzie częstotliwość drgań oraz tłumienie tych oscylacji, decydują wartości elektromagnetycznej stałej czasowej wirnika  $T_r$  oraz mechanicznej stałej czasowej napędu  $T_M$ . Z tego faktu wynika konieczność sterowania silnika indukcyjnego, przy wymuszeniu prądu stojana, w układzie zamkniętym.

### 2.3. Sterowanie polowo – zorientowane

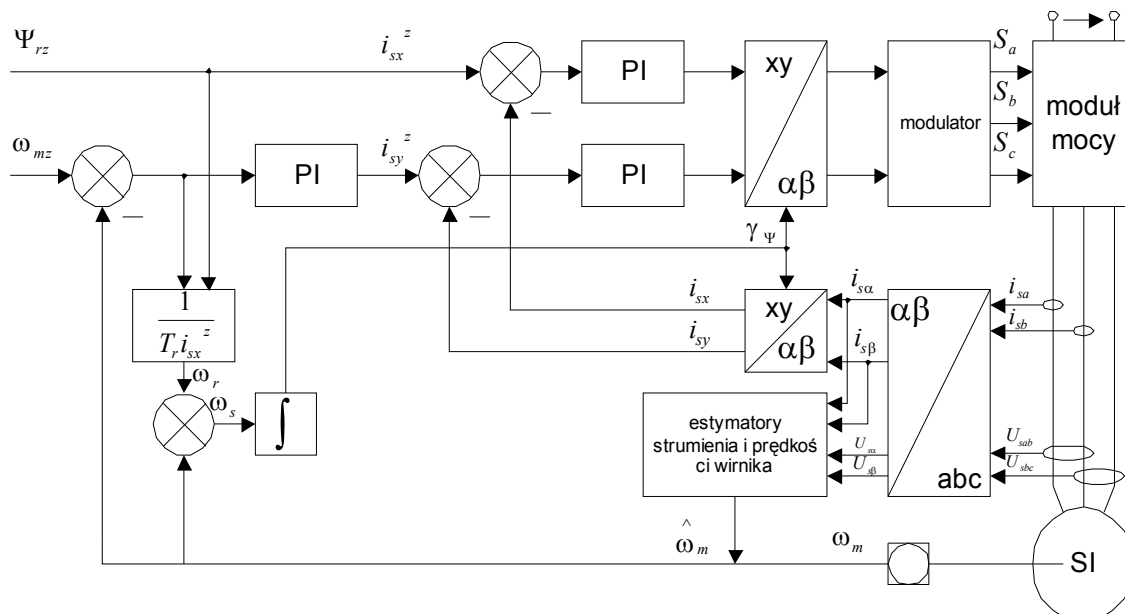
Autorami sterowania wektorowego polowo – zorientowanego byli F. Blaschke i K. Hasse. W metodzie tej równania silnika są przekształcane do prostokątnego układu współrzędnych wirującego zgodnie z wektorem strumienia wirnika (rys. 2.2) lub stojana. Daje to możliwość sterowania momentem poprzez wymuszanie składowej  $i_{sy}$  oraz sterowanie wartością strumienia wirnika poprzez składową  $i_{sx}$  wektora prądu stojana.

Sterowanie polowo – zorientowane można podzielić na bezpośrednie i pośrednie. W sterowaniu bezpośrednim wektor strumienia wirnika jest odtwarzany lub mierzony, natomiast w metodzie pośredniej jest on wyliczany na podstawie wartości zadanej składowej  $i_{sx}$  prądu stojana, pulsacji poślizgu oraz mierzonej (lub estymowanej) prędkości wirnika. Struktury sterowania bezpośredniego i pośredniego przedstawiono odpowiednio na rysunkach 2.5 i 2.6.



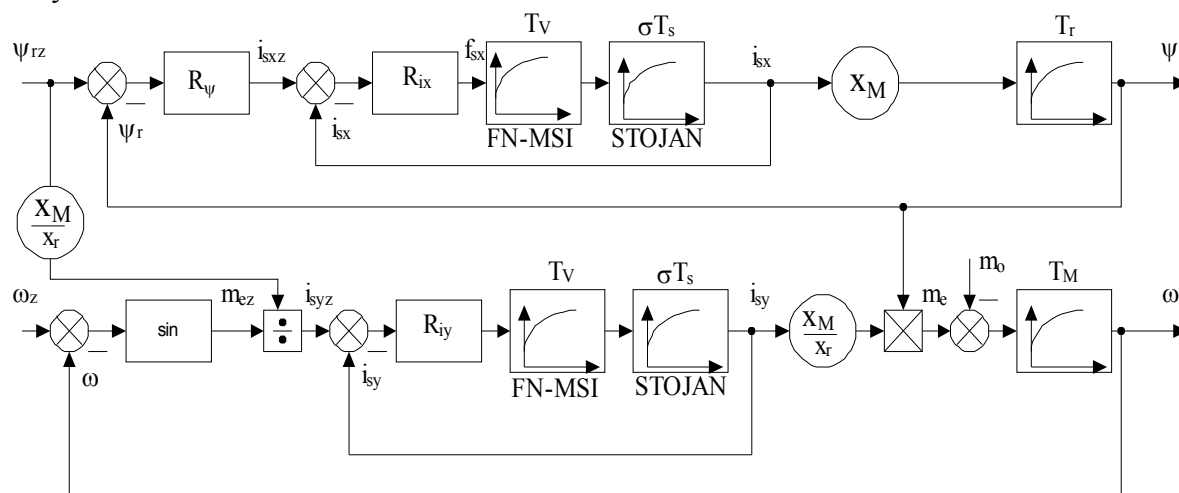
Rys. 2.5 Struktura układu bezpośredniego sterowania polowo – zorientowanego





Rys. 2.6 Struktura układu pośredniego sterowania polowo – zorientowanego

W strukturze FOC bezpośredniej występują dwa niezależne tory regulacji  $i_r$  i  $i_m$ , w których odpowiednie regulatory połączone są kaskadowo (typu PI). Sposób optymalizacji regulatorów w tej strukturze sterowania wynika ze schematu blokowego, który można przedstawić tak, jak na rysunku 2.7.



Rys. 2.7 Ideowy schemat przekształtnika

Dzięki optymalizacji regulatora prądu według kryterium modułu uzyskuje się kompensację stałej czasowej obwodu stojana  $\sigma T_s$ . W torze regulacji strumienia elektromagnetycznego regulator nastawia się według kryterium modułu co daje kompensację stałej czasowej obwodu wirnika  $T_r$ . Wobec tego o dynamice regulacji strumienia wirnika w układzie polowo - zorientowanym decyduje najmniejsza stała czasowa obwodu - stała czasowa przekształtnika  $T_v$  (FN -MSI).

Obwód regulacji optymalizuje się zgodnie z kryterium symetrii, co umożliwia kompensację dominującej stałej czasowej napędu  $T_M$ . W wyniku tego o właściwościach dynamicznych struktury sterowania momentu silnika decyduje stała czasowa przekształtnika  $T_v$ .

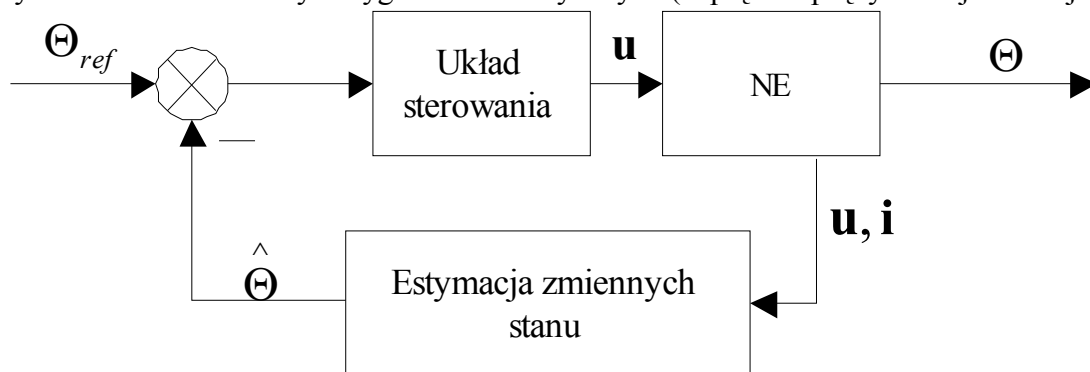
### 3. Estymatory strumienia i prędkości w napędach prądu przemiennego

#### 3.1. Wprowadzenie

Coraz częściej w nowoczesnych układach napędowych silniki prądu stałego i krokowe są zastępowane silnikami prądu przemiennego - wynika to z ogromnych możliwości tych silników szybkiego rozwoju techniki oraz ciągle obniżających się cen tych maszyn. Dzięki falownikom napięcia i wektorowym metodom sterowania otrzymuje się bardzo dobre właściwości dynamiczne sterowania momentem w maszynach prądu przemiennego.

Wektorowe metody sterowania wymagają nie tylko informacji o prędkości i położeniu wirnika, ale również o elektromagnetycznym stanie silnika elektrycznego, takich jak amplituda i położenie wektora strumienia wirnika.

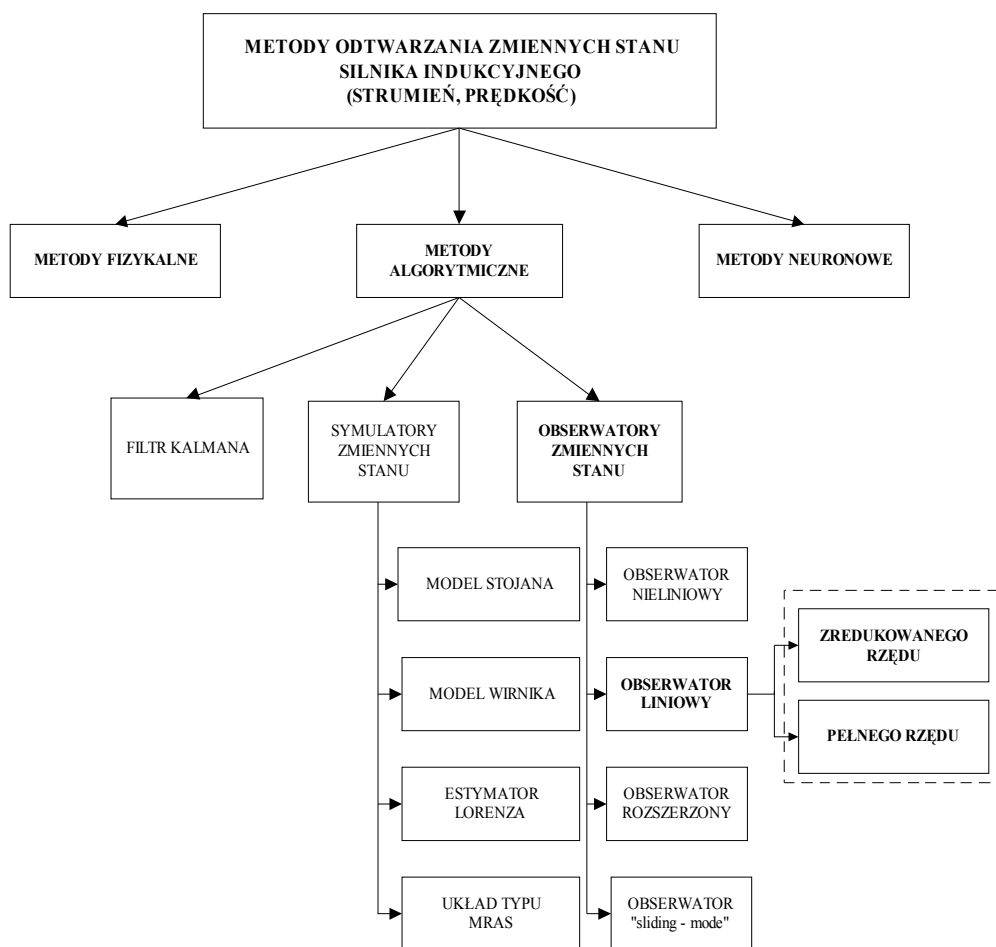
Aktualne trendy w napędach elektrycznych powodują eliminację inwazyjnych pomiarów (jak strumień elektromagnetyczny silnika indukcyjnego) oraz przetworników mechanicznych jak również minimalizację liczby wykorzystywanych czujników pomiarowych prądu i napięcia. W związku z tym w ostatnich latach nastąpił intensywny rozwój specjalnych układów do estymacji trudno mierzalnych zmiennych stanu silników prądu przemiennego, opartych na łatwo mierzalnych sygnałach elektrycznych (napięcia i prądy uzwojenia stojana).



Rys. 3.1 Układ zamknięty z estymacją zmiennych stanu

Estymacja sygnałów pozwala na:

- redukcję przestrzeni zajmowanej przez napęd;
- zmniejszenie liczby połączeń kablowych;
- redukcję kosztów;
- wzrost niezawodności układu.



Rys. 3.2 Metody odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego w napędach bezczujnikowych

Metody fizyczne bazują na asymetrii magnetycznej maszyny. Ich zaletą jest niezależność estymacji prędkości kątowej od zmiennych parametrów silnika i bardzo dobra dokładność statyczna w zakresie wysokich prędkości; przy prędkościach niskich wyniki ulegają znacznemu pogorszeniu, przetwarzanie sygnałów jest bardzo złożone, ponadto konieczna jest ingerencja w wewnętrzną strukturę maszyny.

Do najprostszych układów odtwarzających strumień i prędkość wirnika wykorzystujących metody algorytmiczne (oparte na modelu matematycznym silnika indukcyjnego) należą tzw. symulatory zmiennych stanu. Są to układy realizujące model matematyczny silnika w technice analogowej lub cyfrowej i służące do symulacji przebiegów tych zmiennych w czasie rzeczywistym. Symulatory takie stanowią układy o właściwościach dynamicznych takich samych jak obiekt. Mają one podstawową wadę – są tak samo wrażliwe na zmiany parametrów jak obiekty, których są modelami.

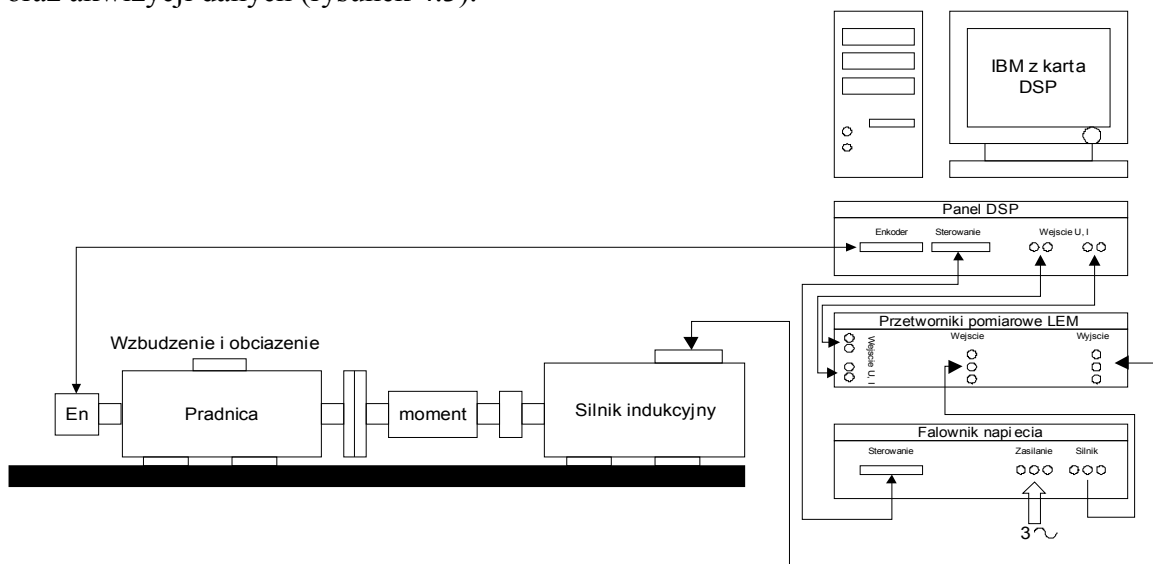
Dokładność odtwarzania strumienia wirnika można znacznie polepszyć, wprowadzając do modelu obwodów elektromagnetycznych silnika sprzężenie zwrotne o odpowiednio dobranych współczynnikach wzmocnienia, czyli stosując tzw. obserwatory stanu bazujące na teorii sterowania. Obserwatorem stanu systemu dynamicznego - obiektu nazywa się inny system, który na podstawie sygnałów wejściowych i wyjściowych wyznacza na bieżąco estymatę wektora stanu obiektu.

Filtr Kalmana wykorzystuje stochastyczne podejście, minimalizuje wrażliwość na zakłócenia pomiarowe, jednak algorytm jego działania jest bardzo skomplikowany, w związku z czym wymaga bardzo szybkiego procesora sygnałowego. Ponadto właściwości dynamiczne filtru Kalmana mogą być kształtowane jedynie przez wybór macierzy kowariancji  $R$  i  $Q$ , które muszą być wyliczone już na wstępie projektowania estymatora i są różne dla różnych typów silników indukcyjnych. Filtr Kalmana dla silnika indukcyjnego tworzy się na bazie pełnego modelu matematycznego maszyny. Ponieważ jest to model strukturalnie nieliniowy, dokonuje się jego linearyzacji wokół aktualnego punktu pracy, a prędkość kątową wirnika traktowana jest jako dodatkowa zmienna stanu. Uzyskuje się w ten sposób rozszerzony model matematyczny silnika, dla którego projektuje się rozszerzony filtr Kalmana.

W zastosowaniach sieci neuronowych w układach napędowych z silnikiem indukcyjnym klatkowym ukazują się coraz więcej prac i publikacji dotyczących układów odtwarzających zmienne stanu, a w szczególności amplitudę i fazę wektora strumienia skojarzonego z uzwojeniem wirnika oraz prędkość kątową silnika indukcyjnego. Zastosowania te opierają się na podejściu związanym z modelowaniem lub identyfikacją układów dynamicznych przy wykorzystaniu sieci neuronowych.

#### 4. Opis stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko laboratoryjne umożliwia dokonywanie badań zarówno układu otwartego jak i układu zamkniętego sterowania silnika indukcyjnego klatkowego. Stanowisko to składa się z komputera z procesorem sygnałowym sprzężonym z urządzeniami pomiarowymi i sterowania, który za pomocą oprogramowania jest w stanie sterować pracą silnika oraz mierzyć wybrane wielkości elektryczne i nieelektryczne. Komputer zawiera kartę procesora sygnałowego DS1102 wraz z oprogramowaniem przeznaczonym do nadzorowania pracy karty oraz akwizycji danych (rysunek 4.3).



Rys.4.3 Schemat ideowy struktury stanowiska laboratoryjnego

Obiektem badań był silnik indukcyjny sprzężony z prądnicą prądu stałego pracującą w charakterze obciążenia. Z wałem prądnicy sprzężony jest enkoder umożliwiający pomiar prędkości kątowej silnika.

Sygnaly prądowe oraz napięciowe mierzone były za pomocą przetworników hallotronowych firmy LEM LA25 i LV 25 skalujących sygnały tak, aby były akceptowalne przez kartę

procesora. Sygnały te były doprowadzone do karty przy wykorzystaniu wejść analogowych, wyjścia cyfrowe z kolei posłużyły do sterowania falownikiem.

Najważniejsze dane techniczne sterownika procesorowego DS1102 DSP:

Procesor TMS 320c31 Floating Point DSP z zegarem 60 MHz o pamięci 128 k x 32 – bit RAM, 2k x 32 – bit on chip RAM, dodatkowo 4 równoległe kanały analogowe, 4 równoległe wyjścia analogowe o napięciu we/wy  $\pm 10V$ , cyfrowe I/O

Parametry badanego silnika:

- silnik obrabiarkowy firmy SIEMENS typ 1PH6 101 4NF46

moc znamionowa	$P_n$	= 3,7 / 4,5 / 4,6 dla S1 / S6-60 / S6-40
prędkość znamionowa	$n_n$	= 1400 obr/min
prąd znamionowy	$I_n$	= 13 / 15 / 17,5 A
moment znamionowy	$M_n$	= 24 Nm
moment bezwładności	J	= 0,02 Nm

Parametry schematu zastępczego:

rezystancja uzwojenia stojana	$r_s$	= 0,79 $\Omega$
rezystancja uzwojenia wirnika	$r_r$	= 0,81 $\Omega$
reaktancja rozproszenia uzwojenia stojana	$x_{\delta s}$	= 0,57 $\Omega$
reaktancja rozproszenia uzwojenia wirnika	$x_{\delta r}$	= 0,57 $\Omega$
reaktancja magnesująca	$x_M$	= 14,5 $\Omega$

Optymalne nastawy regulatorów

W układzie sterowania wykorzystano regulatory typu PI

a) nastawy regulatorów dla układu z pomiarem prędkości:

	$R_\omega$	$R_\psi$
$k_p$	2 [-]	2,5 [-]
$T_i$	0,1[s]	0,08 [s]

b) nastawy regulatorów w układzie sensorless:

	$R_\omega$	$R_\psi$
$k_p$	2 [-]	1,5 [-]
$T_i$	0,1[s]	0,1 [s]

## 5. Program ćwiczenia

Celem ćwiczenia laboratoryjnego jest zapoznanie się z właściwościami dynamicznymi układu napędowego z SI przy sterowaniu bezpośrednim polowo – zorientowanym, realizowanym w układzie jaki omówiono w instrukcji.

Ćwiczenie składa się z dwóch części – 1 podczas, której wykonywane będą badania symulacyjne układu wektorowego sterowania silnika indukcyjnego, oraz 2 w czasie, której wykonane zostaną badania na układzie rzeczywistym.

Badania symulacyjne wykonać należy w programach symulacyjnych Program\_Wektor i Obserwator, uruchomionych na stanowiskach laboratoryjnych.

Po zapoznaniu się z obsługą programu, należy wykonać symulacje dla zadanych trajektorii prędkości SI i zadanych cykli obciążenia silnika, podanych przez prowadzącego ćwiczenie.

W sprawozdaniu należy umieścić schemat blokowy badanego układu, warunki wykonywania poszczególnych symulacji, wyniki badań zawierające przebiegi dynamiczne poszczególnych zmiennych układu regulacji prędkości SI oraz wnioski z analizy tych wyników.

### Część 1

1. Zapoznanie się z zasadami wektorowego sterowania polowo zorientowanego
2. Zapoznanie się z oprogramowaniem do symulacji układu wektorowego sterowania polowo zorientowanego SI.
3. Wykonanie badań symulacyjnych układu wektorowego sterowania polowo zorientowanego SI dla różnych wartości zadanych prędkości, momentu obciążenia i nastaw regulatorów.
4. Zapoznanie się tematyką odtwarzania zmiennych stanu.
5. Wykonanie badań układów wektorowego sterowania polowo zorientowanego SI z obserwatorem pełnego i zredukowanego rzędu (porównanie działania układów).

### Część 2

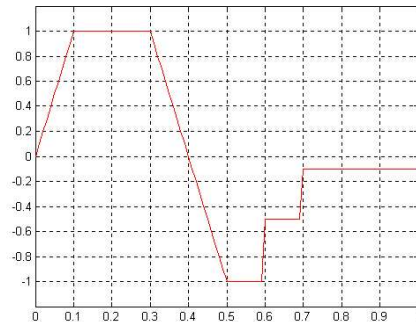
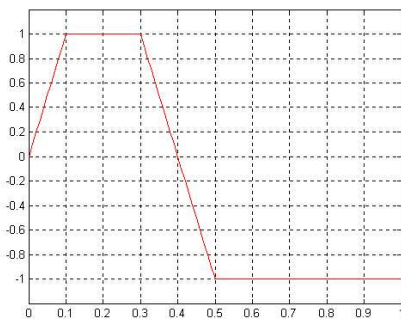
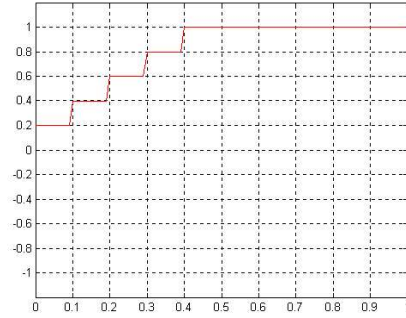
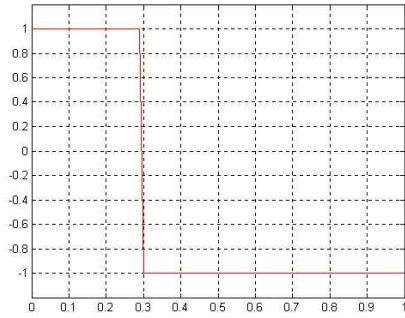
1. Zapoznanie się ze strukturą stanowiska laboratoryjnego do badania napędu z wektorowym sterowaniem silnika indukcyjnego.
2. Zapoznanie się z oprogramowaniem sterującym ControlDesk
3. Wykonanie badań układu wektorowego sterowania polowo zorientowanego SI dla pracy w różnych strukturach sterowania (z obserwatorem pełnego i zredukowanego rzędu).

### Pytania kontrolne

1. Omówić metody częstotliwościowego sterowania silnika indukcyjnego.
2. Podać podział metod sterowania ze względu na optymalizację statyczną.
3. Model matematyczny silnika indukcyjnego.
4. Omówić podstawy metody polowo – zorientowanej.
5. Sposoby estymacji zmiennych stanu, cel ich stosowania.

## Zadania do realizacji w ćwiczeniu nr 1

Za pomocą wskazanego przez prowadzącego programu symulacyjnego wygenerować przebiegi prędkości zadawanej jak na poniższych rysunkach, a następnie przeprowadzić badania układu wektorowego sterowania silnika indukcyjnego w układach z pomiarem strumienia i prędkości kątovej wirnika oraz w układach z estymacją tych zmiennych stanu.



Wszystkie badania przeprowadzić przy obciążeniu znamionowym oraz w układzie bez obciążenia.

Porównać wyniki otrzymane przy symulacji układu z pomiarem prędkości kątovej i strumienia wirnika silnika indukcyjnego z układem z estymacją tych parametrów.

## **Literatura podstawowa**

1. ORŁOWSKA - KOWALSKA T.: „Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
2. GRUNWALD Z.: „Napęd elektryczny”, WNT, Warszawa 1987.
3. TUNIA H., KAŻMIERKOWSKI M.: „Automatyka napędu przekształtnikowego”, PWN, Warszawa 1987.

## **Literatura uzupełniająca**

1. KOWALSKI CZ., ORŁOWSKA - KOWALSKA T., WOJSZNIS P.: „Zastosowanie DSP w układzie wektorowego sterowania silnika indukcyjnego”, SENE '99, IV Krajowa Konferencja Naukowa „Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym”, Łódź – Arturówek, 17 – 19 listopada 1999 r., str. 359 - 365.
2. KRZEMIŃSKI Z.: „Obserwator prędkości silnika asynchronicznego”, SENE '99, IV Krajowa Konferencja Naukowa „Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym”, Łódź – Arturówek, 17 – 19 listopada 1999 r., str. 387 – 392
3. [www.dspaceinc.com](http://www.dspaceinc.com)
4. [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)