1. **Rodzaje regulatorów w układach napędowych na przykładzie napędu prądu stałego, zjawisko windup w regulatorach PI/PID**

**Regulator** − jeden z elementów składających się na [obwód regulacji](http://pl.wikipedia.org/wiki/Uk%C5%82ad_regulacji_%28automatyka%29). Zadanie regulatora polega na wygenerowaniu odpowiedniego sygnału sterującego, tak aby obiekt sterowany zachowywał się w pożądany sposób (na przykład w jak najkrótszym czasie osiągał [wartość zadaną](http://pl.wikipedia.org/wiki/Warto%C5%9B%C4%87_zadana)). Regulator służy do doprowadzenia obiektu do żądanego stanu lub poprawy niekorzystnych właściwości obiektu regulowanego. Regulator może np. poprawić dynamikę obiektu regulowanego (silnik będzie szybciej osiągał żądaną [prędkość](http://pl.wikipedia.org/wiki/Pr%C4%99dko%C5%9B%C4%87)). Niewłaściwe zastosowanie może prowadzić do [niestabilności](http://pl.wikipedia.org/wiki/Stabilno%C5%9B%C4%87_uk%C5%82adu_automatycznej_regulacji) obwodu regulacji.

**Regulator PID** (regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący, [ang.](http://pl.wikipedia.org/wiki/J%C4%99zyk_angielski) *proportional-integral-derivative controller*) – [regulator](http://pl.wikipedia.org/wiki/Regulator) stosowany w [układach regulacji](http://pl.wikipedia.org/wiki/Uk%C5%82ad_regulacji_%28automatyka%29) składający się z trzech członów: proporcjonalnego, całkującego i różniczkującego. Najczęściej jego celem jest utrzymanie wartości wyjściowej na określonym poziomie, zwanym [wartością zadaną](http://pl.wikipedia.org/wiki/Warto%C5%9B%C4%87_zadana).

**Regulator PI** ([ang.](http://pl.wikipedia.org/wiki/J%C4%99zyk_angielski) *proportional-integral controller*) – w [automatyce](http://pl.wikipedia.org/wiki/Automatyka), [regulator](http://pl.wikipedia.org/wiki/Regulator) składający się z [członu proporcjonalnego](http://pl.wikipedia.org/wiki/Cz%C5%82on_proporcjonalny) **P** o wzmocnieniu K_p\,oraz [całkującego](http://pl.wikipedia.org/wiki/Cz%C5%82on_ca%C5%82kuj%C4%85cy) **I** o [czasie całkowania](http://pl.wikipedia.org/wiki/Czas_ca%C5%82kowania) T_i\,. Transmitancję regulatora PI określa się wzorem:

G_{PI}(s) = K_p (1 + {1 \over T_{i} s }).

Regulatory typu PI pozwalają na eliminację wolnozmiennych [zakłóceń](http://pl.wikipedia.org/wiki/Zak%C5%82%C3%B3cenia_%28automatyka%29), co przekłada się na zerowy [uchyb ustalony](http://pl.wikipedia.org/wiki/Uchyb_ustalony), niemożliwy do osiągnięcia w [regulatorach typu P](http://pl.wikipedia.org/wiki/Regulator_P) lub [typu PD](http://pl.wikipedia.org/wiki/Regulator_PD). Wzmocnienie członu całkującego musi być jednak ograniczone, ponieważ wprowadza on ujemne [przesunięcie fazowe](http://pl.wikipedia.org/wiki/Przesuni%C4%99cie_fazowe), które osłabia tłumienie [uchybu regulacji](http://pl.wikipedia.org/wiki/Uchyb_regulacji).

**Anty-windup** – ograniczenie sygnału sterującego mające na celu zapobiegnięcie powstania zbyt dużej wartości momentu elektromagnetycznego, a tym samym prądu, który spowodowałby uszkodzenie silnika elektrycznego (silnik spaliłby się). W przeciwnym wypadku całka dążyła by do bardzo dużej wartości (do nieskończoności), a tym samym moment i prąd rozruchowy osiągnęłyby zbyt dużą wartość. Ograniczenie momentu ma decydujący wpływ na właściwości dynamiczne układu, niewłaściwe spełnienie tego warunku może doprowadzić do niestabilnej pracy układu napędowego.

W układach napędowych z SPS stosujemy regulatory typu PI. Wyróżnić możemy następujące struktury regulacji:

*-szeregowa (kaskadowa),*

*-równoległa* (bezpośredniego wymuszania napięcia twornika),

*-z podporządkowaną regulacją momentu* (odmiana struktury szeregowej).

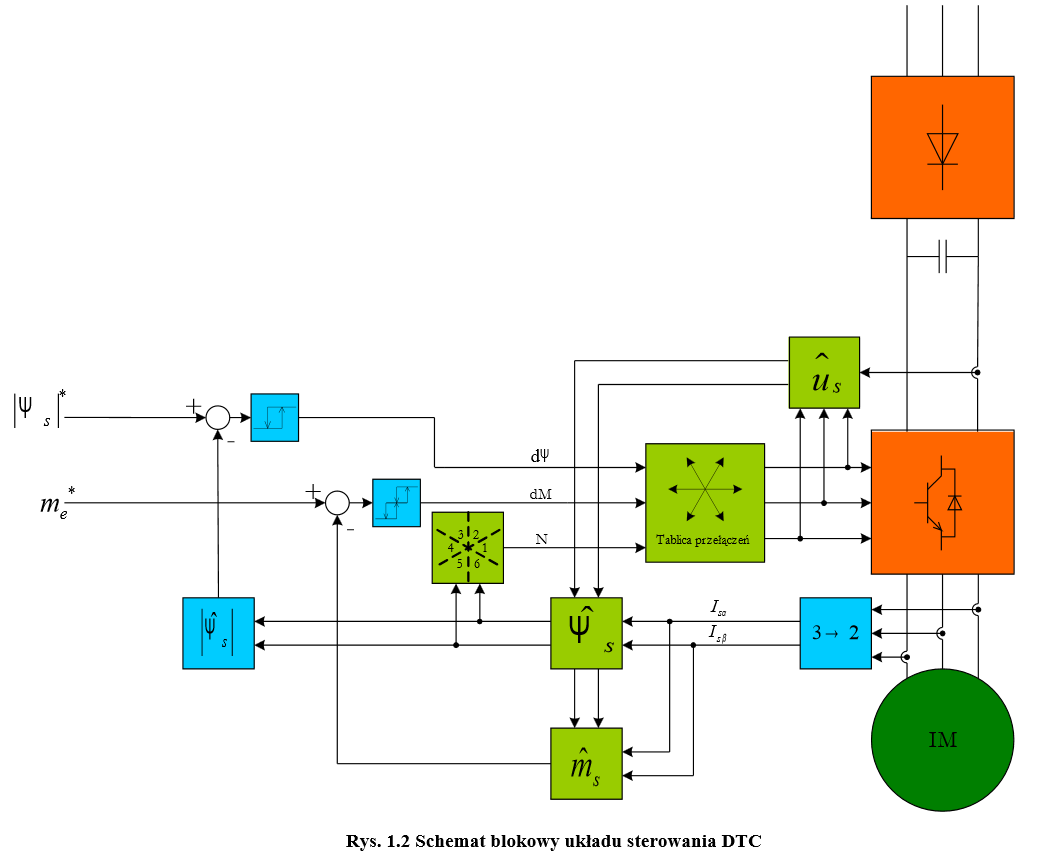
Porównanie:

1. Transmitancje opisujące obie struktury (szeregową i równoległą) mają podobną postać;
2. **W obu strukturach stała czasowa mechaniczna *TM* nie ma wpływu** na właściwości dynamiczne zamkniętego obwodu regulacji prędkości (została skompensowana przez Rw );
3. W strukturze **szeregowej** (z podrzędnym regulatorem prądu) – o dynamice decyduje **zastępcza stała czasowa obwodu regulacji prądu *Tzi*** (zależna od stałej przekształtnika);
4. W strukturze **równoległej** – o dynamice decyduje **elektromagnetyczna stała czasowa *Te* twornika** SPS.
5. **Podobieństwo metod sterowania wektorowego dla układu z falownikiem napięcia i silnikiem indukcyjnym oraz dla przekształtnika sieciowego AC/DC**

Ogólnie rzecz biorąc mamy następujące metody sterowania wektorowego SI: polowo-zorientowane (DFOC, IFOC) oraz bezpośredniego sterowania momentem (DTC).

**DTC:**

Metoda ta zakłada sterowanie momentem oraz strumieniem skojarzonym stojana silnika w sposób bezpośredni a nie za pomocą kontroli prądu stojana. Efekt ten uzyskać można poprzez bezpośrednie sterowanie kluczami falownika na podstawie wyjść komparatorów histerezowych momentu elektromagnetycznego, strumienia skojarzonego stojana silnika oraz detekcji aktualnego położenia wektora przestrzennego strumienia skojarzonego stojana. Stany komparatorów oraz położenie wektora strumienia są podstawą do wyboru odpowiednich stanów kluczy z predefiniowanej tablicy przełączeń optymalnych. Taka metoda sterowania zapewnia uzyskanie odprzężenia oraz linearyzacje torów sterowania (dzięki nieliniowej transformacji współrzędnych) co z kolei zapewnia bardzo dobre własności układu sterowania. W procesie sterowania nie jest też niezbędny pomiar położenia wału silnika, co jest jedną z podstawowych zalet tej metody. Prosta struktura oraz stosunkowo mała liczba wykonywanych obliczeń nie wymaga dużych mocy obliczeniowych.

****

FOC:



Nazwa sterownie polowo zorientowane nazywane potocznie sterowaniem wektorowym

oznacza, że model matematyczny maszyny sprowadza, się do układu współrzędnych

wirującego współbieżnie z przyjętym wektorem strumienia skojarzonego wirnika lub stojana.

W instrukcji przedstawiono najczęściej spotykaną metodę sterowani polowego, z układem

zorientowanym względem wektora strumienia skojarzonego wirnika.



Wprowadzenie układu współrzędnych dq wirującego synchronicznie z wektorem

strumienia skojarzonego wirnika wymaga wyznaczenia składowych wektorów wielkości

regulowanych dla współrzędnych układu dq. W tym celu niezbędna jest znajomość kąta ρ

określającego położenie wektora strumienia wirnika względem nieruchomego układu

odniesienia αβ. Kąt ρ obliczany jest przez układ mikroprocesorowy przy wykorzystaniu

matematycznych zależności obserwatora stanu silnika klatkowego. W obserwatorze obliczane

są aktualne wartości składowych strumienia skojarzonego wirnika, na podstawie których

określony jest kąt ρ.

Stosując metodę sterowania, w której reguluje się

wielkości wektorowe w układzie wirującym dq, można sterować silnikiem indukcyjnym

podobnie jak steruje się silnikiem obcowzbudnym prądu stałego.

Porównując sterowanie silnikiem obcowzbudnym prądu stałego i silnikiem indukcyjnym

prądu przemiennego można stwierdzić że:

* prąd isq w silniku indukcyjnym pełni rolę analogiczną do prądu twornika it silnika

obcowzbudnego prądu stałego,

* prąd isd w silniku indukcyjnym pełni rolę analogiczną do prądu wzbudzenia iw

silnika obcowzbudnego prądu stałego.

W układzie sterowania polowo zorientowanego nadrzędnymi wielkościami

regulowanymi są prędkość ωr i strumień silnika indukcyjnego |ψr|.

Różnice AC/DC vs FOC

Sterowanie układami napędowymi z silnikami prądu przemiennego jest bardzo złożone

w porównaniu ze sterowaniem układami napędowymi prądu stałego.

W napędach prądu stałego najłatwiej sterować jest silnikiem obcowzbudnym. W silniku

obcowzbudnym wielkościami regulowanymi są:

* strumień magnetyczny – który regulowany jest przez zmianę prądu

wzbudzenia silnika iw np. za pomocą sterowanego źródła napięcia uw

zasilającego obwód wzbudzenia,

* moment elektromagnetyczny me – który regulowany jest przez zmianę prądu

twornika it przy stałym strumieniu wzbudzenia psiw=const.; regulacja prądu

twornika uzyskiwana jest np. za pomocą sterowanego źródła napięcia ut

zasilającego obwód twornika.

W odróżnieniu od sterowania silnikiem obcowzbudnym prądu stałego sterowanie

silnikiem indukcyjnym jest znacznie bardziej skomplikowane. Jednak **stosując falownik**

**napięcia, który odpowiednio jest sterowany przez system mikroprocesorowy, można**

**uzyskać dla silnika indukcyjnego właściwości regulacyjne takie same lub lepsze niż w**

**przypadku silnika obcowzbudnego prądu stałego**. Lepsza właściwości napędu z silnikiem

indukcyjnym wynikają z tego, że silnik indukcyjny jest pozbawiony szczotek i w związku z

tym nie wymaga zmiany położenia szczotek w zależności od kierunku obrotów i obciążenia

maszyny co jest często wymagane w przypadku napędów z maszynami prądu stałego.

Metodą sterowania, która pozwala na uzyskanie bardzo dobrych właściwości napędu z

silnikiem indukcyjnym jest **metoda sterowania polowo zorientowanego**.

Podobieństwo- silnik indukcyjny przy wymuszaniu prądu stojana w układzie sterowania polowo-zorientowanego staje się liniowym obiektem sterowania. Strumień wirnika jest ksztaltowany za pomocą składowej isx wektora prądu stojana natomiast moment dla stałej wartości strumienia zależy liniowo od składowej isy. Mamy 2 niezależne pętle regulacji (strumienia i prędkości). Regulatory PI prądu (strojone wg KM) kompensują wpływ stałej czasowej uzwojenia stojana *Tss* (człon inercyjny),

Regulator PI strumienia (strojony wg KM) kompensuje wpływ stałej czasowej uzw. wirnika *Tr* .

Regulator PI prędkości (strojony wg KS) kompensuje wpływ mechanicznej stałej czasowej silnika *TM.*

Widać analogię do kaskadowej struktury sterownia silnika SPS.

1. **Metody odtwarzania zmiennych stanu i parametrow dla silników prądu przemiennego**

Wektorowe metody sterowania wymagają nie tylko informacji o prędkości/położeniu wirnika ale również o elektromagnetycznych zmiennych stanu SE**,** takich jak: amplituda i położenie wektora strumienia wirnika. Można je łatwo oszacować na podstawie pomiaru napięcia i prądu stojana. Dzięki zastosowaniu estymatorów otrzymujemy: redukcja przestrzeni zajmowanej przez napęd, zmniejszenie liczby połączeń kablowych, redukcja kosztów, wzrost niezawodności.



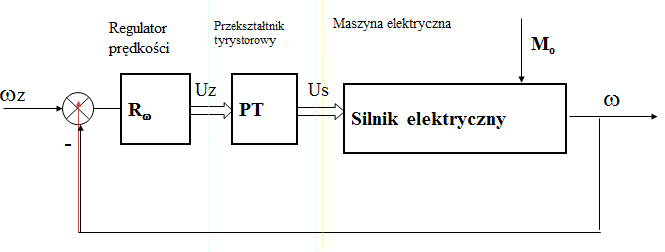
Metody fizykalne bazują na asymetrii magnetycznej maszyny. Pozwalają osiągnąć niezależność estymacji prędkości od zmienności parametrów silnika oraz posiadają bardzo dobrą dokładność statyczną w zakresie wysokich prędkości. Przy prędkościach niższych wyniki są znacznie gorsze, potrzebne jest złożone przetwarzanie sygnałów oraz konieczne jest umieszczenie w stojanie maszyny specjalnych uzwojeń pomiarowych. Np. Analiza FFT prądu stojana wynikająca z nieosiowości wirnika.  
Symulatory zmiennych stanu - to równanie dynamiki (model) wybranej, niedostępnej pomiarowo elektromagnetycznej zmiennej stanu silnika, na podstawie której jest następnie obliczana prędkość silnika. Wadą jest duża wrażliwość na niedokładność określenia lub zmienność parametrów silnika.  
Obserwatory zmiennych stanu - równanie dynamiki wybranej, niedostępnej pomiarowo elektromagnetycznej zmiennej stanu silnika, na podstawie której jest następnie obliczana prędkość silnika. Zaletą jest znacznie zmniejszona wrażliwość na niedokładność określenia lub zmienność parametrów silnika.

Filtr Kalmana- algorytm wyznaczania estymaty zmiennej stanu układu dynamicznego na podstawie pomiarów wyjścia oraz wejścia tego układu. Pomiar i proces przetwarzania wewnątrz układu obarczony jest błędem o rozkładzie gaussowskim. Filtr Kalmana odznacza się odpornością na zakłócenia pomiarowe i parametryczne, posiada skomplikowany algorytm obliczeniowy oraz brak analitycznej metody doboru elementów macierzy Q i R.

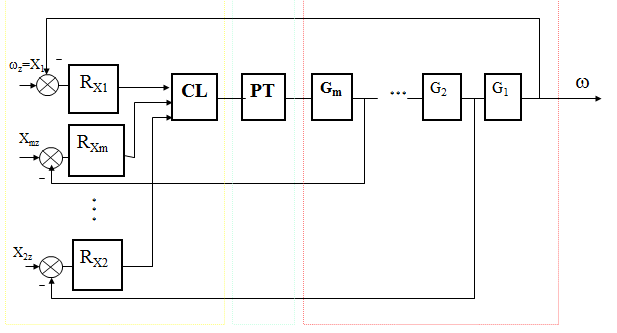
Metody neuronowe- dwa podejścia oparte na sieciach neuronowych można zastosować do estymacji prędkości SI:  
-metoda bazująca na neuronowym modelowaniu – on-line (a)  
-metoda bazująca na neuronowej identyfikacji – off-line (b)

1. **Podstawowe struktury sterowania napędem z połączeniem sprężystym**

Moment może być sterowany przy zastosowaniu 4 podstawowych struktur regulacji:

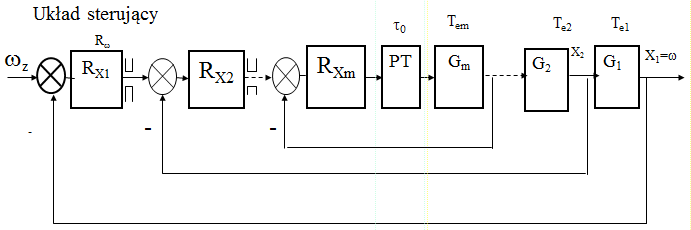
*a) struktura z wymuszeniem napięcia* (układ bezpośredniego strowania predkością)

Słaba dynamika regulacji momentu, bo brak sprżężeń od zmiennych stanu tworzących moment silnika-przebiegi dynamiczne momentu nie są kontrolowane.

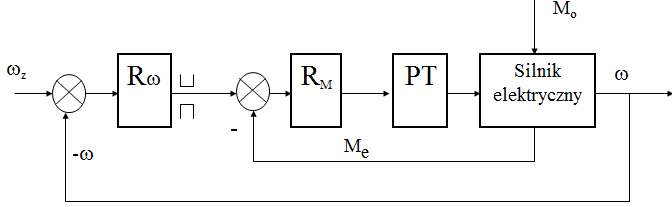


*b) struktura rownoległa:*

Układ zapewnia kontrolę sygnałów równoległych lecz sterowana jest jedynie jedna wielkośc (zmienna stanu) z aktualnego regulatora (wybierana przez sumator logiczny).

c*) szeregowa:*

Regulatory pracują cały czas. Regulator nadrzędny generuje sygnał dla podrzędnych korygowanych przez sprzężenia zwrotne.

*d) z podporządkowaną regulacją momentu*  
Niezbędny jest pomiar lub odtwarzenie momentu elektromagnetycznego.