

Układ napędowy z silnikiem indukcyjnym i falownikiem napięcia – metoda sterowania polowo zorientowanego (FOC)

Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego

Jarosław Guziński, Marcin Morawiec

Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego WEiA
Politechnika Gdańska 2015
wersja MM_2.12

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości statycznych i dynamicznych układu napędowego z silnikiem indukcyjnym klatkowym z polowo zorientowanym układem sterowania FOC (*ang. Field Oriented Control*).

2. Wprowadzenie

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 ψ_w – który regulowany jest przez zmianę prądu wzbudzenia silnika i_w np. za pomocą sterowanego źródła napięcia u_w zasilającego obwód wzbudzenia,
- moment elektromagnetyczny m_e – który regulowany jest przez zmianę prądu twornika i_t przy stałym strumieniu wzbudzenia $\psi_w = \text{const.}$; regulacja prądu twornika uzyskiwana jest np. za pomocą sterowanego źródła napięcia u_t zasilającego obwód twornika.

Moment elektromagnetyczny silnika prądu stałego opisany jest zależnością:

$$m_e = k\psi_w i_t \quad (1)$$

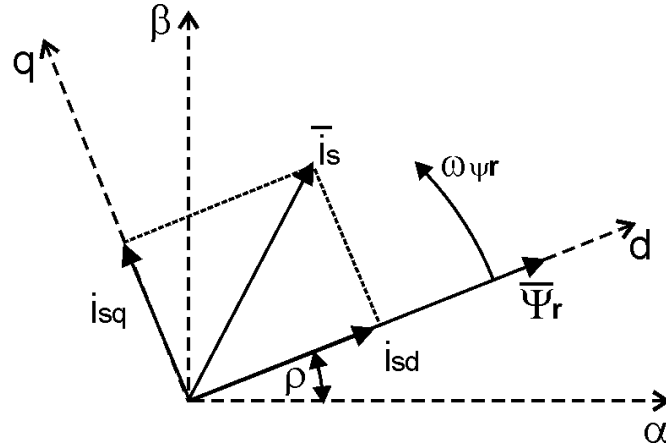
gdzie k jest stałą maszyny.

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.**

3. Sterowanie polowo zorientowane

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.



Rys. 1. Składowe prądu stojana w układach współrzędnych nieruchomych $\alpha\beta$ oraz współrzędnych wirujących dq

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 $\alpha\beta$. 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 :

$$\rho = \arctg \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{r\alpha}} \quad (2)$$

W układzie współrzędnych nieruchomych $\alpha\beta$ składowe poszczególnych wektorów są w stanie ustalonym wielkościami sinusoidalnie zmiennymi. Natomiast składowe tych wektorów w układzie współrzędnych dq mają w stanie ustalonym stałe wartości.

Zasada sterowania połowo zorientowanego oparta jest na analizie równań modelu maszyny asynchronicznej klatkowej. Ogólna postać równań modelu maszyny asynchronicznej klatkowej zapisana przy przyjęciu jednostek względnych dla układu współrzędnych xy wirujących z dowolną prędkością ω_a jest następująca:

$$\frac{di_{sx}}{dt} = a_1 \cdot i_{sx} + a_2 \cdot \psi_{rx} + \omega_a \cdot i_{sy} + \omega_r \cdot a_3 \cdot \psi_{ry} + a_4 \cdot u_{sx} \quad (3)$$

$$\frac{di_{sy}}{dt} = a_1 \cdot i_{sy} + a_2 \cdot \psi_{ry} - \omega_a \cdot i_{sx} - \omega_r \cdot a_3 \cdot \psi_{rx} + a_4 u_{sy} \quad (4)$$

$$\frac{d\psi_{rx}}{dt} = a_5 \cdot \psi_{rx} + (\omega_a - \omega_r) \cdot \psi_{ry} + a_6 \cdot i_{sx} \quad (5)$$

$$\frac{d\psi_{ry}}{dt} = a_5 \cdot \psi_{ry} - (\omega_a - \omega_r) \cdot \psi_{rx} + a_6 \cdot i_{sy} \quad (6)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{L_m}{L_r J} (\psi_{rx} i_{sy} - \psi_{ry} i_{sx}) - \frac{1}{J} m_o \quad (7)$$

gdzie:

$$a_1 = -\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{L_r w}, \quad a_2 = \frac{R_r L_m}{L_r w}, \quad a_3 = \frac{L_m}{w}, \quad a_4 = \frac{L_r}{w}, \quad a_5 = -\frac{R_r}{L_r}, \quad a_6 = R_r \frac{L_m}{L_r},$$

$$w = \sigma L_r L_s = L_r L_s - L_m^2, \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r},$$

oraz i_s oraz u_s to prąd i napięcie stojana, J jest momentem bezwładności, m_o to momentem obciążenia, R_s i R_r są rezystancjami uzwojeń stojana i wirnika, L_s , L_r są indukcyjnościami uzwojeń stojana i wirnika, L_m jest indukcyjnością główną natomiast σ jest współczynnikiem rozproszenia.

Równania modelu silnika indukcyjnego (3)-(7) zapisane zostały przy przyjęciu jednostek względnych odniesionych do wielkości bazowych przedstawionych w tab. 2 znajdującej się w końcowej części instrukcji.

Zależności modelu silnika (3)-(7) można zapisać dla układu współrzędnych wirujących dq przyjmując, że $\omega_a = \omega_{\psi_r}$. Otrzymuje się wtedy równania modelu silnika dla układu współrzędnych dq w postaci:

$$\frac{di_{sd}}{dt} = a_1 \cdot i_{sd} + a_2 \cdot \psi_{rd} + \omega_{\psi_r} \cdot i_{sd} + a_4 \cdot u_{sd} \quad (8)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = a_1 \cdot i_{sq} - \omega_{\psi_r} \cdot i_{sd} - \omega_r \cdot a_3 \cdot \psi_{rd} + a_4 u_{sq} \quad (9)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = a_5 \cdot \psi_{rd} + a_6 \cdot i_{sd} \quad (10)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{L_m}{L_r J} \psi_{rd} i_{sq} - \frac{1}{J} m_o \quad (11)$$

Ponieważ w układzie współrzędnych dq składowa strumienia dla osi q jest równa zero to wartość składowej strumienia dla osi d jest równa modułowi strumienia wirnika:

$$|\psi_r| = \sqrt{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} = \psi_{rd} \quad (12)$$

Moment elektromagnetyczny wytwarzany przez silnik asynchroniczny klatkowy określony jest zależnością:

$$m_e = \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} i_{sq} = k_{IM} |\psi_r| i_{sq} \quad (13)$$

gdzie $k_{IM} = L_m/L_r$

Wzór na moment silnika indukcyjnego (13) jest podobny do wzoru na moment silnika obcowzbudnego (1). Wynika z tego, że 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.

Przy założeniu, że strumień silnika jest stały, z równania (13) wynika, że moment elektromagnetyczny generowany przez silnik indukcyjny jest proporcjonalny do prądu w osi q:

$$m_e \sim i_{sq} \Big|_{\text{dla } |\psi_r| = \text{const.}} \quad (14)$$

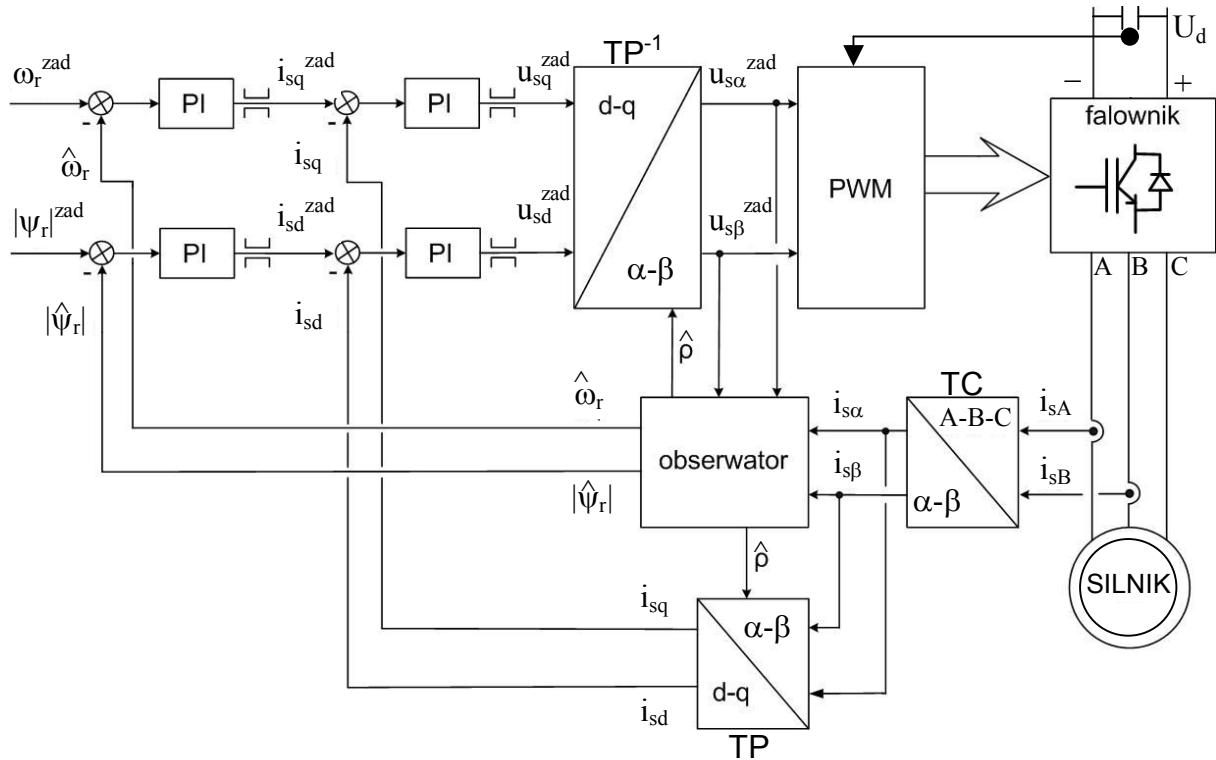
Natomiast z zależności (10) wynika, że strumień w silniku indukcyjnym jest proporcjonalny do prądu stojana w osi d:

$$|\psi_r| \sim i_{sd} \quad (15)$$

Porównując sterowanie silnikiem obcowzbudnym prądu stałego i silnikiem indukcyjnym prądu przemiennego można stwierdzić że:

- prąd i_{sq} w silniku indukcyjnym pełni rolę analogiczną do prądu twornika i_t silnika obcowzbudnego prądu stałego,
- prąd i_{sd} w silniku indukcyjnym pełni rolę analogiczną do prądu wzbudzenia i_w silnika obcowzbudnego prądu stałego.

Struktura układu sterowania polowo zorientowanego silnikiem indukcyjnym przedstawiona została na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy układu sterowania silnikiem indukcyjnym z orientacją względem wektora pola wirnika

W układzie sterowania z rys. 2 silnik indukcyjny zasilany jest z trójfazowego tranzystorowego falownika napięcia. Bloki oznaczone PI są regulatorami proporcjonalno-całkującymi. Blok PWM oznacza układ sterowania tranzystorów falownika realizujący modulację szerokości impulsów (*ang. Pulse Width Modulation*).

Blok obserwatora służy do obliczeń:

- kąta położenia wektora strumienia skojarzonego wirnika ρ ,
- modułu strumienia wirnika $|\psi_r|$,
- prędkości kątovej silnika ω_r

Wielkości obliczane w obserwatorze oznaczone są symbolem $\hat{}$.

W układzie z rys. 2 mierzone jest napięcie zasilania falownika U_d oraz dwa prądy fazowe silnika i_{sA} oraz i_{sB} . Prądy fazowe silnika przeliczane są w układzie sterowania z układu współrzędny trójfazowych ABC do układu współrzędnych dwufazowych, nieruchomych $\alpha\beta$. Takie przekształcenie wykonywane jest w bloku TC realizującego transformację Clarka zachowującą inwariantność mocy układu:

$$i_{s\alpha} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \left(i_{sA} - \frac{1}{2} i_{sB} - \frac{1}{2} i_{sC} \right) \quad (16)$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{sB} - i_{sC}) \quad (17)$$

Następnie prądy $i_{s\alpha}$ oraz $i_{s\beta}$ przeliczane są na prądy w wirującym układzie osi dq. Przeliczenie to przeprowadzane jest w bloku oznaczonym jako TP realizującego transformację Parka:

$$i_{sd} = i_{s\alpha} \cos \rho + i_{s\beta} \sin \rho \quad (18)$$

$$i_{sq} = -i_{s\alpha} \sin \rho + i_{s\beta} \cos \rho \quad (19)$$

W układzie sterowania polowo zorientowanego z rys. 2 nadrzędnymi wielkościami regulowanymi są prędkość ω_r i strumień silnika indukcyjnego $|\psi_r|$. Układ nadrzędnych

regulatorów na podstawie wartości zadanych prędkości ω_r^{zad} oraz strumienia $|\psi_r|^{\text{zad}}$ określa zadane składowe prądu stojana i_{sq}^{zad} oraz i_{sd}^{zad} . Prądy zadane porównywane są z prądami rzeczywistymi silnika i_{sq} oraz i_{sd} a na tej podstawie wyznaczane są zadane składowe napięcia silnika u_{sq}^{zad} oraz u_{sd}^{zad} . Zadane składowe napięcia silnika przeliczane są następnie z układu współrzędnych dq do układu współrzędnych $\alpha\beta$ w bloku odwrotnej transformacji Parka, oznaczonego jako TP⁻¹, w którym wykonywane są następujące obliczenia:

$$u_{s\alpha}^{\text{zad}} = u_{sd}^{\text{zad}} \cos \rho - u_{sq}^{\text{zad}} \sin \rho \quad (20)$$

$$u_{s\beta}^{\text{zad}} = u_{sd}^{\text{zad}} \sin \rho + u_{sq}^{\text{zad}} \cos \rho \quad (21)$$

Zadane napięcia silnika $u_{s\alpha}^{\text{zad}}$ oraz $u_{s\beta}^{\text{zad}}$ wprowadzane są do bloku PWM, który odpowiednio sterując tranzystorami umożliwia uzyskanie na wyjściu falownika napięcia silnika zgodnego z napięciem zadaniem przez układ regulacji.

Napięcia zadane $u_{s\alpha}^{\text{zad}}$ oraz $u_{s\beta}^{\text{zad}}$ wykorzystywane są łącznie z mierzonymi prądami $i_{s\alpha}$ oraz $i_{s\beta}$ przez blok obserwatora do odtwarzania zmiennych.

W układzie napędowym przedstawionym na rys. 2 nie występuje czujnik prędkości, gdyż prędkość kątowna obliczana jest przez obserwator. Takie układy, w których prędkość jest regulowana, a w których zamiast pomiaru prędkości silnika stosuje się obliczanie prędkości nazywane są **układami sterowania bezczujnikowego**.

4. Dobór nastaw regulatorów

Zlinearyzowany układ dzieli się na dwa podukłady, elektromechaniczny związany ze zmiennymi ω_r i i_{sq} , oraz elektromagnetyczny związany ze zmiennymi $|\psi_r|$ i i_{sd} . Na podstawie struktury podukładów zaprojektowano kaskadowy układ regulatorów typu PI. W złożonym układzie sterowania silnikiem indukcyjnym nastawy regulatorów można wyznaczać na drodze eksperymentalnej podobnie jak dla obcowzbudnej maszyny prądu stałego. W praktyce dobór regulatorów może być przeprowadzany na podstawie prób i obserwacji otrzymanych przebiegów. Dąży się przy tym do tego, aby układ napędowy z dobranymi nastawami regulatorów pracował zgodnie z założeniami.

W układzie napędowym badanym w ćwiczeniu regulatory wielkości sterujących tworzą dwie struktury kaskadowe, tj. podukład mechaniczny i elektromagnetyczny. W układzie tym na wstępie należy dokonać optymalizacji obwodów wewnętrznych, a więc obwodów regulacji zmiennych i_{sq} i i_{sd} , a następnie optymalizacji obwodów zewnętrznych, czyli obwodu regulacji prędkości – zmiennej ω_r i strumienia – zmiennej i_{r_obs} .

W badanym układzie sterowania zastosowano regulatory proporcjonalno – całkujące z których każdy określony jest zależnością:

$$U_{wy}(n+1) = K_p \cdot E(n) + K_i \sum_{i=0}^{i=n} E(i), \quad (21)$$

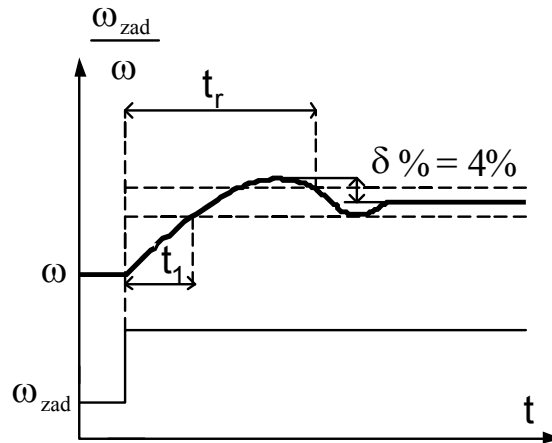
gdzie $U_{wy}(n+1)$ jest wielkością wyjściową regulatora w chwili $(n+1)$, $E(n)$ jest uchybem

wielkości regulowanej w chwili (n) , $\sum_{i=0}^{i=n} E(i)$ jest sumą uchybów wielkości regulowanej od

chwili $i = (0)$ do chwili $i = (n)$, K_p jest wzmocnieniem części proporcjonalnej regulatora PI,

K_i jest wzmocnieniem części całkującej regulatora PI.

W układzie rzeczywistym nastawy regulatorów dobrane w sposób analityczny mogą nie być optymalne ze względu na niedokładności wyznaczonych parametrów układu. Optymalne wartości nastaw regulatorów muszą być określone przez dostrojenie na obiekcie. Dostrojenie w układzie rzeczywistym przeprowadza się najczęściej przez rejestrację przebiegów zmiennych regulowanych i porównanie ich z zadanymi przebiegami - rys. 4.

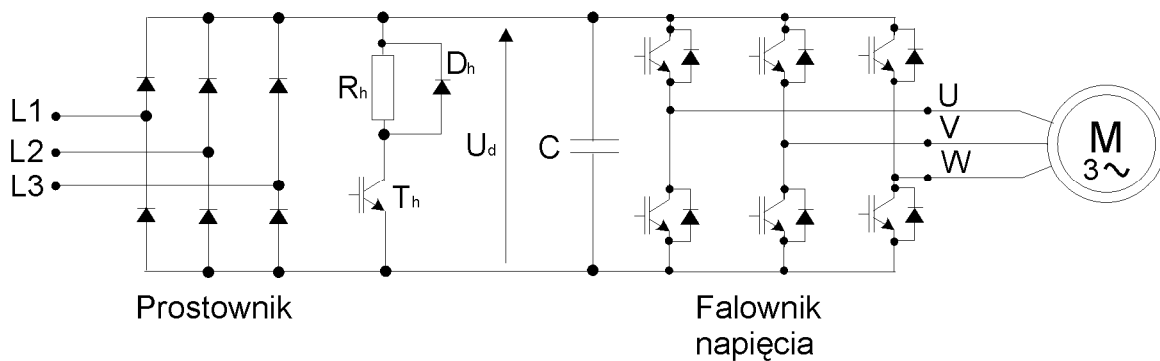


Rys. 3. Przebieg odpowiedzi czasowej układu sterowania na skokowe zmiany wielkości sterującej ω_{zad}

Nastawy zmienia się tak, aby uzyskać jak najszybsze działanie układu przy równoczesnym ograniczeniu lub wyeliminowaniu przeregulowań i uzyskaniu stabilnej pracy układu.

5. Budowa przemiennika częstotliwości do zasilania silnika indukcyjnego

Realizacja układu sterowania polowo zorientowanego FOC wymaga zastosowania przemiennika częstotliwości. Najpopularniejszym, obecnie stosowanym przemiennikiem jest przemiennik częstotliwości składający się z prostownika diodowego i tranzystorowego falownika napięcia – rys. 4.



Rys. 4. Budowa przemiennika częstotliwości z prostownikiem diodowym i tranzystorowym falownikiem napięcia

Przemiennik z rys. 4 zasilany jest z sieci trójfazowej prądu zmiennego. Napięcie zmienne jest wyprostowane w trójfazowym prostowniku diodowym. Na wyjściu prostownika uzyskuje się jednokierunkowe pulsujące napięcie, które jest następnie wygładzone w kondensatorze C. Jest to zwykle bateria połączonych szeregowo-równolegle kondensatorów, oznaczona na rys. 4 jako zastępczy kondensator C o dużej pojemności. Dzięki kondensatorowi C napięcie zasilania falownika U_d jest bardzo gładkie. Łącznie prostownik i kondensator C tworzą źródło napięcia, z którego zasilany jest falownik. Falownik tworzą tranzystory mocy równoległe i przeciwobnie połączone z diodami zwrotnymi. Tranzystory sterowane są sygnałami bramkowymi generowanymi w układzie sterowania mikroprocesorowego. Sterowanie tranzystorów realizowane jest tak aby na wyjściu falownika wygenerować napięcie, którego

harmoniczna podstawowa będzie zgodna (co do amplitudy i częstotliwości) z napięciem zadanym przez układ sterownia połowo zorientowanego.

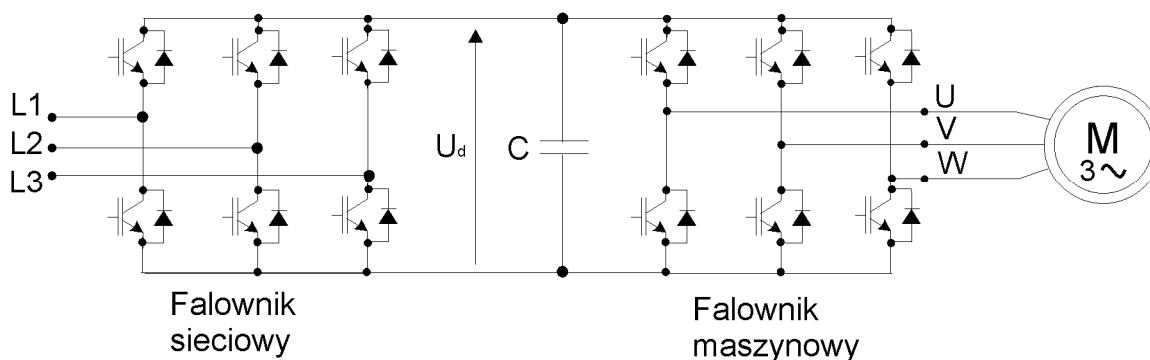
Do zacisków wyjściowych falownika podłączony jest trójfazowy silnik indukcyjny.

Obwód łączący prostownik z falownikiem jest nazywany obwodem pośredniczącym DC przemiennika częstotliwości.

Falownik jest przekształtnikiem umożliwiającym dwukierunkowe przekazywanie energii. Energia dostarczana jest do maszyny indukcyjnej przy jej pracy silnikowej. Przy pracy generatorowej maszyny energia przekazywana jest przez falownik do kondensatora C. W układzie z rys. 4 nie ma możliwości zwrotu energii do sieci, gdyż prostownik diodowy umożliwia tylko jednokierunkowe przekazywanie energii (tj. z sieci zasilającej do obwodu pośredniczącego DC).

Dostarczanie energii do kondensatora C przy pracy generatorowej powoduje wzrost napięcia U_d i w efekcie może prowadzić do uszkodzenia falownika. Dlatego konieczne jest stosowanie obwodu rozładowania kondensatora. Obwód ten tworzą elementy T_h , R_h i D_h . Tranzystor T_h załączany jest, gdy napięcie U_d przekroczy dopuszczalny poziom. Po załączeniu T_h kondensator C jest rozładowywany przez R_h – energia hamowania maszyny indukcyjnej jest wtedy tracona na ciepło w rezystorze.

W układach napędowych, w których hamowanie elektryczne maszyny występuje bardzo często albo energia hamowania jest bardzo duża, bardziej opłacalne jest stosowanie przemiennika częstotliwości, który umożliwi zwrot energii do sieci zasilającej. Układ taki pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Budowa przemiennika częstotliwości z prostownikiem tranzystorowym i tranzystorowym falownikiem napięcia – przekształtnik z możliwością zwrotu energii do sieci zasilającej

Układ energoelektroniczny z rys. 5 składa się z dwóch przekształtników o strukturze falownika napięcia. Falownik włączony od strony sieci jest nazywany falownikiem sieciowym a falownik włączony od strony maszyny nazywany jest falownikiem maszynowym. W zależności od sposobu sterowania każdy z tych przekształtników może pełnić rolę falownika lub prostownika. Zaletami układu z rys. 5 w porównaniu z układem z rys. 4 są:

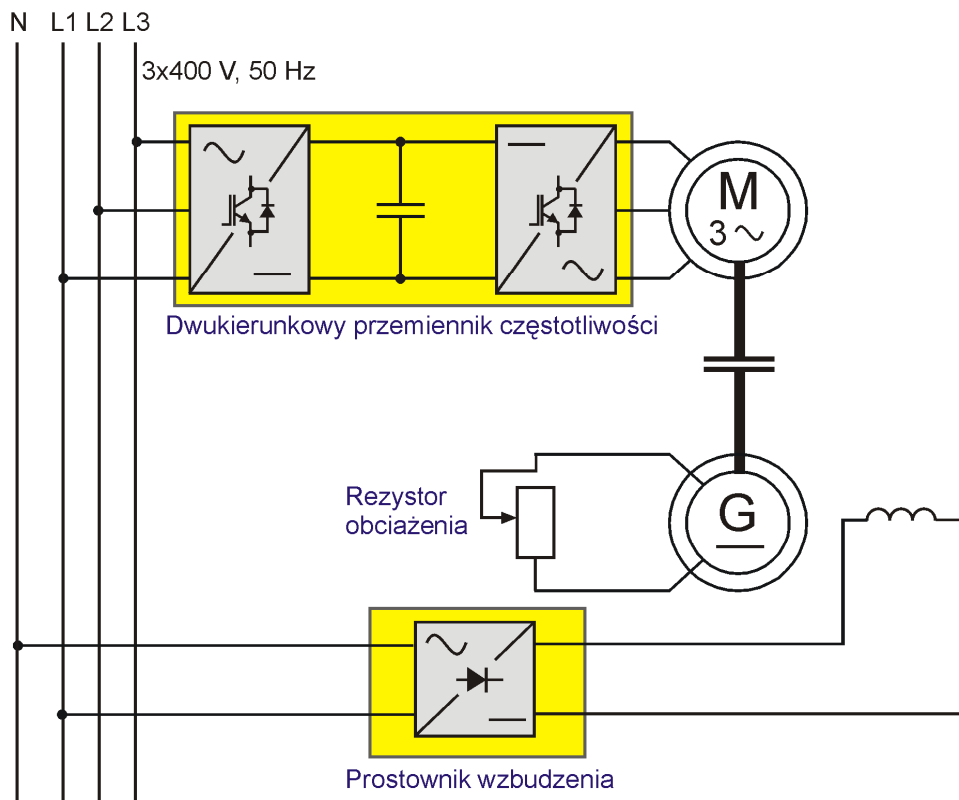
- możliwość zwrotu energii hamowania maszyny do sieci zasilającej,
- kontrolowanie kształtu prądu pobieranego z sieci tak, aby pobierać prąd sinusoidalny (nieodkształcony),
- kontrolowanie współczynnika mocy przekształtnika tak, aby uzyskać $\cos\varphi=1$ (dzięki temu przekształtnik nie pobiera mocy biernej a więc jest bardziej efektywny energetycznie),

- mniejsza pojemność C kondensatora obwodu pośredniczącego DC (taki kondensator jest mniejszy, tańszy i bardziej niezawodny).

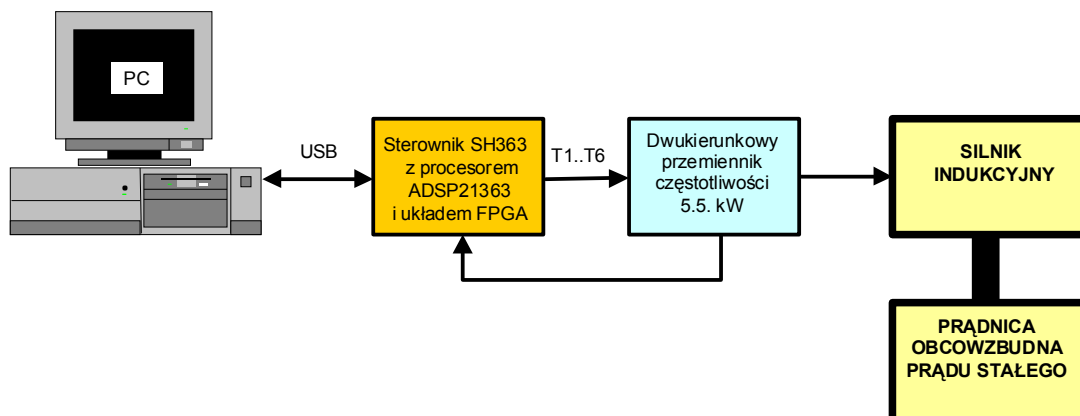
Układ sterowania przekształtnika z rys. 5 jest jednak bardziej złożony a algorytm sterowania bardziej skomplikowany. Układ z rys. 5 wymaga też dodatkowych czujników pomiarowych prądów i napięć sieciowy. Złożoność układu z rys. 5 powoduje jego wyższą cenę w porównaniu z układem z rys. 4.

6. Stanowisko laboratoryjne

Stanowisko laboratoryjne składa się z silnika indukcyjnego o mocy 5,5kW zasilanego z dwukierunkowego przemiennika częstotliwości oraz maszyny prądu stałego obciążonej rezystorem regulowanym. Schemat połączeń pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Schemat połączeń maszyn i przekształtników stanowiska laboratoryjnego



Rys. 7. Sterowanie układu laboratoryjnego

Sterowanie układu napędowego z silnikiem indukcyjnym składa się ze sterownika mikroprocesorowego i komputera PC. Schemat połączeń komunikacyjnych pokazano na rys. 7.

Sterownik mikroprocesorowy składa się z procesora sygnałowego ADSP21363, układu logiki programowalnej FPGA, przetwornika analogowo - cyfrowego oraz układów wejść i wyjść cyfrowych. Komputer PC umożliwia ładowanie programu sterowania do pamięci sterownika mikroprocesorowego za pomocą interfejsu USB oraz obsługę układu napędowego przy pomocy programu *TKombajn* - zadawanie i odczyt parametrów oraz wizualizację przebiegów. Obsługę programu *Tkombajn* opisano w załączniku 3.

Dane znamionowe silnika indukcyjnego i maszyny prądu stałego zostały zamieszczone w załączniku nr 1.

Tab. 1. Spis zmiennych dostępnych w programie konsoli operatora „*TKombajn*”

| Zmienna | Opis |
|---------------------------------------|--|
| omegaRzad | Zadana prędkość silnika (zakres -0,6 ... +0,6) |
| omega_sof | Prędkość silnika obliczona w obserwatorze prędkości |
| frzad | Strumień magnetyczny wirnika – zadany (zakres 0,4 ... 1,2) |
| fr_so | Moduł strumienia magnetycznego wirnika – obliczony |
| frx_so, fry_so | Składowe $\alpha\beta$ strumienia magnetycznego wirnika |
| me | Moment elektromagnetyczny silnika |
| imaA, imbA, imcA | Mierzone prądy fazowe silnika - współrzędne naturalne abc |
| imx, imy | Mierzone prądy silnika - współrzędne $\alpha\beta$ |
| isq, isd | Mierzone prądy silnika - współrzędne dq |
| isqzad, isdzad | Zadane prądy silnika - współrzędne dq |
| usqzad, usdzad | Zadane napięcia silnika - współrzędne dq |
| usx_zad_multi, usy_zad_multi | Zadane napięcia silnika - współrzędne $\alpha\beta$ |
| im | Moduł mierzonego prądu stojana |
| ud | Napięcie stałe w obwodzie pośredniczącym przemiennika częstotliwości |
| RampaPlus_FM_MMB RampaMinus_FM_MMB | Nachylenie charakterystyki zmiany sygnału zadanego (domyślnie 0,0002) |
| kpomegaR | Wzmocnienie członu proporcjonalnego regulatora prędkości (domyślnie 18) |
| kiomegaR | Wzmocnienie członu całkującego regulatora prędkości (domyślnie 0,001) |
| kpisq | Wzmocnienie członu proporcjonalnego regulatora składowej q prądu stojana (domyślnie 0.2) |
| kiisq | Wzmocnienie członu całkującego regulatora składowej prądu stojana (domyślnie 0,001) |
| kpfr | Wzmocnienie członu proporcjonalnego regulatora strumienia wirnika (domyślnie 10) |

| | |
|-------|---|
| kifr | Wzmocnienie członu całkującego regulatora strumienia wirnika (domyślnie 0,0005) |
| kpsid | Wzmocnienie członu proporcjonalnego regulatora składowej d prądu stojana (domyślnie 0,2) |
| kiisd | Wzmocnienie członu całkującego regulatora składowej d prądu stojana (domyślnie 0,0002) |
| isqo | Ograniczenie wyjścia regulatora prędkości, (domyślnie 0,9 / zakres 0,2 ... 0,9) |
| isdo | Ograniczenie wyjścia regulatora prędkości, (domyślnie 0,9 / zakres 0,2 ... 0,9) |
| usqo | Ograniczenie wyjścia regulatora składowej prądu i_{sq} , (domyślnie 0,9 / zakres 0,2 ... 0,9) |
| usdo | Ograniczenie wyjścia regulatora składowej prądu i_{sd} , (domyślnie 0,9 / zakres 0,2 ... 0,9) |

Uwaga: Wszystkie rejestrowane zmienne określone są w jednostkach względnych odniesionych do wielkości bazowych zdefiniowanych w tab. 3 [3]:

Tab. 2. Jednostki bazowe

| | | |
|-----------------------------|------------|-----------------------|
| Napięcie bazowe | U_b | $\sqrt{3} U_n$ fázowe |
| Prąd bazowy | I_b | $\sqrt{3} I_n$ fázowy |
| Impedancja bazowa | Z_b | U_b/I_b |
| Strumień magnetyczny bazowy | Ψ_b | U_b/ω_o |
| Prędkość kątowna bazowa | ω_b | ω_o/p |
| Moment bazowy | m_b | $\Psi_b I_b p$ |
| Indukcyjność bazowa | L_b | Ψ_b/I_b |

gdzie ω_o to pulsacja synchroniczna $\omega_o=2\pi f_n$

7. Program ćwiczenia

1. Zapoznać się z działaniem i obsługa stanowiska (Załączenie przyciskiem ON, silnik uruchamiany jest z początkową prędkością 0,2 j.w.).
2. Wyznaczyć charakterystyki mechaniczne układu $n=f(m_e)$ tj. zależność między prędkością obrotową n [obr/min] oraz momentem elektromagnetycznym silnika m_e [Nm]. Wyznaczyć charakterystyki dla 3 różnych zadanych prędkości: np.: 0,5j.w., 0,3j.w i 0,1j.w. Charakterystyki wyznacza się tak, że dla zadanej wartości prędkości zmienia się obciążenie silnika odczytując wielkości n oraz m_e . Prędkość obrotową i moment obciążenia silnika odczytywać w programie konsoli operatora. Zmierzone charakterystyki przedstawić na wspólnym wykresie. Prędkość obrotowa silnika i moment wyrazić w jednostkach rzeczywistych czyli [obr/min] i [Nm]. W sprawozdaniu określić sztywność charakterystyk.
3. Przeprowadzić rejestrację stanu ustalonego pracy silnika przy prędkości zadanej 0,1 j.w. oraz 0,5 j.w. dla zmiennych:
 - ω_{Rzad} , ω_{sof} , fr_{obs} , m_e , ud ,
 - ω_{Rzad} , ω_{sof} , isd , isq , imx .
4. Powtórzyć pomiary z punktu 3 dla zadanej prędkości 0,5 j.w. oraz osłabionego strumienia o wartości 0,6 j.w. Po zakończeniu pomiarów ustawić zadaną wartość strumienia na 1,0 j.w.

5. Dobrać nastawy regulatora PI prędkości: $k_{p\omega R}$ oraz $k_{i\omega R}$. Dobór przeprowadzić na podstawie odpowiedzi układu na skok jednostkowy zadanej prędkości od 0,1j.w. do 0,6j.w. porównując prędkość zadaną silnika z prędkością silnika obliczoną w obserwatorze lub prędkością mierzoną. Rejestrować: prędkość zadaną, obliczoną, moment elektromagnetyczny, zadaną składową q prądu silnika oraz moduł strumienia wirnika.
6. Przeprowadzić rejestrację przebiegów przy znamionowym strumieniu $f_{rzad}=1,0$ j.w. dla:
 - wzrostu prędkości od 0.1 j.w. do 0.6 j.w. z obciążeniem i bez obciążenia.
 - zmniejszenia prędkości od 0.6 j.w. do 0.1 j.w. z obciążeniem i bez obciążenia.Rejestrować: prędkość zadaną, prędkość obliczaną, moment elektromagnetyczny filtrowany, zadaną składową q prądu silnika oraz moduł strumienia wirnika.
7. Przeprowadzić rejestrację przebiegów przy osłabieniu strumienia zadanego $f_{rzad}=0,8$ dla:
 - wzrostu prędkości od 0.1 j.w. do 0.6 j.w., z obciążeniem i bez obciążenia.
 - zmniejszenia prędkości od 0.6 j.w. do 0.1 j.w. z obciążeniem i bez obciążenia.Rejestrować: prędkość zadaną, prędkość aktualną, moment elektromagnetyczny silnika, zadaną składową q prądu silnika oraz moduł strumienia wirnika.
8. Przeprowadzić rejestrację przy stałej prędkości obrotowej silnika 0.6j.w. i zmniejszeniu strumienia silnika od 1.0 j.w. do 0.6 j.w. Pomiary wykonać dla silnika obciążonego i nieobciążonego.
Rejestrować: zadany strumień wirnika, aktualny moduł strumienia wirnika, zadaną składową d prądu stojana, prędkość aktualną oraz moment elektromagnetyczny silnika.
9. Przeprowadzić rejestrację przy stałej prędkości obrotowej silnika 0.6j.w. i zwiększeniu strumienia silnika od 0.6 j.w. do 1.0 j.w. Pomiary wykonać dla silnika obciążonego i nieobciążonego.
Rejestrować: zadany strumień wirnika, aktualny moduł strumienia wirnika, zadaną składową d prądu stojana, prędkość aktualną oraz moment elektromagnetyczny silnika.
10. Zmieniając zadaną wartość strumienia wyznaczyć zależność pomiędzy modulem strumienia wirnika a modulem prądu stojana $|\mathbf{i}_m|=f(|\psi_r|)$ – zmiennymi programu: i_m , f_{r_obs} . Pomiary przeprowadzić dla silnika nieobciążonego dla zdanych prędkości np. 0,6j.w. oraz 0,4j.w. W sprawozdaniu, na wspólnym wykresie narysować zmierzone charakterystyki.
11. Sprawdzić działanie ograniczenia prądu w osi q . Badanie przeprowadzić wykonując próbę zwiększenia prędkości obrotowej silnika od 0.1 j.w. do 0.6 j.w. dla dwóch ograniczeń prądu np: 0,4 j.w. i 0,7 j.w. Pomiar wykonać dla silnika nieobciążonego i obciążonego.
Rejestrować: prędkość zadaną, prędkość obliczaną, moment elektromagnetyczny filtrowany, zadaną składową q prądu silnika oraz moduł strumienia wirnika.
12. Przeprowadzić rejestrację nawrotu silnika od 0.6 j.w. do -0.6 j.w. bez obciążenia przy znamionowym strumieniu 1,0j.w. oraz strumieniu osłabionym na 0,8 j.w.
Rejestrować: prędkość zadaną, prędkość obliczaną, moment elektromagnetyczny filtrowany, zadaną składową q prądu silnika oraz moduł strumienia wirnika.
13. Z badać działanie układu przy zmianie obciążenia silnika: bieg jałowy \rightarrow obciążenie \rightarrow bieg jałowy. Badanie wykonać dla zadanej prędkości 0,5 j.w.
Rejestrować: prędkość obliczaną, moment elektromagnetyczny, zadaną składową q prądu silnika, moduł prądu stojana oraz moduł strumienia wirnika.
Rejestracje załączyć przy silniku pracującym na biegu jałowym a następnie załączyć i po chwili wyłączyć obciążenie. Rejestrację przeprowadzić dla odpowiednio długiego czasu.

14. W stanie ustalonym zarejestrować: m_e , i_{sqzad} , i_{sq} , u_{sqzad} , i_m . Badanie przeprowadzić przy zadanej prędkości 0,5j.w. dla 3 dowolnych obciążeń. Zaobserwować jak zmieniają się rejestrowane wielkości w zależności od obciążenia. Pomiarów wykonać dla krótkiego czasu rejestracji.
15. W stanie ustalonym zarejestrować składowe zmiennych w układzie współrzędnych $\alpha\beta$: $u_{sx_zad_multi}$, $u_{sy_zad_multi}$, i_{mx} , i_{my} , frx_so . Badanie przeprowadzić przy prędkości zadanej 0,5 j.w. dla silnika bez obciążenia oraz przy 3 dowolnych poziomach obciążenia.
16. Dla takiego samego obciążenia i takiej samej prędkości jak w punkcie 9 w stanie ustalonym zarejestrować: u_{sqzad} , i_{sq} , i_{sqzad} , u_{sdzad} , i_{sd} .
17. Zarejestrować przebiegi prądów pobieranych z sieci zasilającej przez przekształtnik oraz napięć sieci elektroenergetycznej. Pomiarów wykonać dla układu z silnikiem na biegu jałowym i przy obciążeniu maszyny. Zarejestrować przebieg modułu prądu sieci oraz napięcia w obwodzie dc przekształtnika przy nawrocie silnika.

| | |
|---------------------|---|
| i_{sx}, i_{sy} | Mierzone prądy sieci zasilającej - współrzędne $\alpha\beta$ |
| u_{spx}, u_{spsy} | Mierzone napięcia sieci zasilającej - współrzędne $\alpha\beta$ |
| i_s | Moduł prądu pobieranego z sieci elektroenergetycznej przez przekształtnik |

8. Literatura

1. Zawirski K., Deskur J., Kaczmarek T.: Automatyka napędu elektrycznego, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
2. Koczara W.: Wprowadzenie do napędu elektrycznego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
3. Tunia H., Kaźmierkowski M.: Automatyka napędu przekształtnikowego. PWN, Warszawa, 1987.
4. Orłowska - Kowalska T.: Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.

9. Zagadnienia

1. Zasada sterowania wektorowego FOC silnikiem klatkowym.
2. Budowa przemiennika częstotliwości do zasilania silnika indukcyjnego.
3. Co to jest oraz w jakim celu wykorzystywany jest układ obserwatora w układzie sterowania połowo zorientowanego?
4. Wyjaśnić, do jakich celów wykorzystywany jest kąt ρ w układzie sterowania wektorowego (zaznaczyć kąt na wykresie wskazowym oraz w strukturze układu regulacji).
5. Omówić wpływ ograniczenia prądu w osi q na pracę napędu w stanach przejściowych.
6. Wyjaśnić, na czym polega analogia między napędem z silnikiem obcowzbudnym prądu stałego i napędem z silnikiem indukcyjnym sterowanym wektorowo.
7. Porównać właściwości napędu z silnikiem indukcyjnym sterowanym skalarnie i wektorowo w stanie ustalonym oraz stanach dynamicznych.

Załącznik 1

Dane maszyn elektrycznych

Tab. 3. Dane silnika indukcyjnego klatkowego typu SZJDe56

| Opis | Oznaczenie | Wartość | Jednostka |
|--------------------------------|------------------|-----------|-----------|
| Moc znamionowa | P_n | 5,5 | kW |
| Napięcie znamionowe Δ/Y | U_n | 220/380 | V |
| Prąd znamionowy Δ/Y | I_n | 20,4/11,8 | A |
| Prędkość obrotowa znamionowa | n_n | 935 | obr/min |
| Częstotliwość znamionowa | f_n | 50 | Hz |
| Liczba par biegunów | P | 3 | - |
| Znamionowy współczynnik mocy | $\cos \varphi_n$ | 0,84 | - |
| Sprawność | η_n | 79 | % |

Tab. 4. Dane maszyny obcowzbudnej prądu stałego typu EMIT DC0084

| Typ maszyny | EMIT DC0084 |
|--------------------------------|----------------------|
| Moc znamionowa | $P_n=11$ [kW] |
| Napięcie znamionowe twornika | $U_{tn}=460$ [V] |
| Prąd znamionowy twornika | $I_{tn}=24$ [A] |
| Prędkość obrotowa znamionowa | $n_n=1450$ [obr/min] |
| Napięcie znamionowe wzbudzenia | $U_{wn}=220$ [V] |
| Prąd znamionowy wzbudzenia | $I_{wn}=1,7$ [A] |

Załącznik 2

Program konsoli operatora TKombajn

Konsola TKombajn została opracowana do komunikacji pomiędzy komputerem PC oraz sterownikiem mikroprocesorowym DSP typu SH65L lub SH363 przy użyciu interfejsu szeregowego RS232 lub USB.

Po uruchomieniu programu konsoli należy w pierwszej kolejności wybrać plik z programem, który ma zostać załadowany do pamięci procesora sterownika DSP. W tym celu należy użyć klawisza oznaczonego jako [*].ldr]. Za pomocą opisanego klawisza następuje. Jeśli wybrany plik jest poprawny to ścieżka dostępu do pliku zostanie wyświetlona na zielonym pasku pod klawiszem [*].ldr] oraz w dolnym oknie dialogowym.

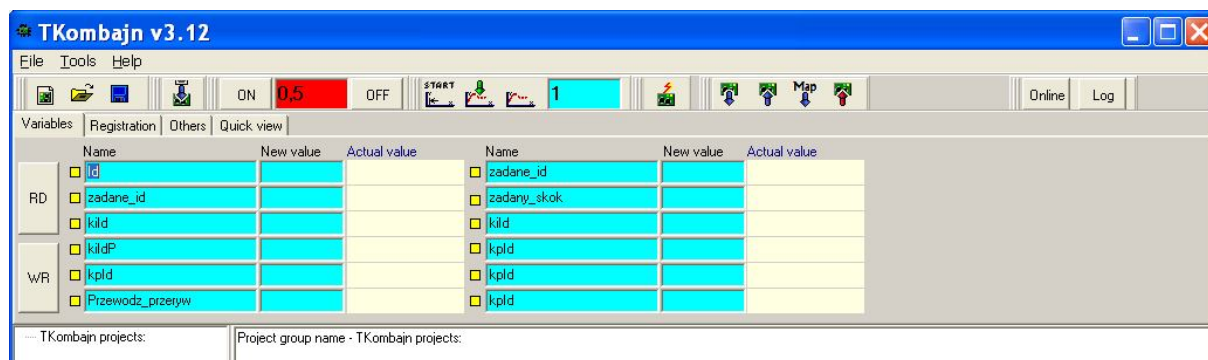
Ładowanie programu dla sterownika SH65L odbywa się za pomocą klawisza [load *.ldr]. Wysłanie pliku do sterownika przez interfejs szeregowy jest potwierdzone komunikatem „Program loaded” w dolnym oknie dialogowym wraz z wyświetleniem godziny komunikaty.

Załączenie oraz wyłączenie falownika odbywa się za pomocą klawiszy [ON] oraz [OFF]. Między tymi przyciskami jest okno sygnału zadanego prędkości. Zmiana odbywa się przez bezpośrednie wpisanie w oknie i naciśnięcie klawisza [ENTER]. Wpisanie wartości ujemnej wymaga skasowania wszystkich znaków w oknie i wpisanie wartości zaczynającej się od znaku minus.

Drugie okno edycyjne służy do wprowadzenia mnożnika czasu próbkowania rejestrowanych sygnałów.

W programie Tkombajn występują 3 zakładki: [Variables], [Registration], [Others], [Quick view].

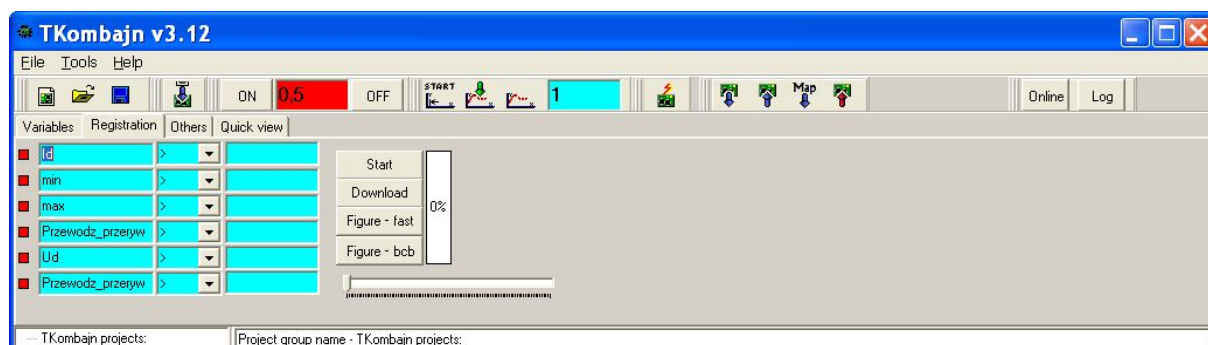
Zakładka [Variables] (rys. 8) służy do kontrolowania zmiennych umieszczonych w pamięci procesora. Ich nazwę wpisuje się w pola edycyjne opisane jako „Name”. Jeżeli pole edycyjne ma błękitne tło, oznacza to, że dana zmienna jest umieszczona w mapie pamięci procesora, w innym przypadku pole posiada tło czerwone, należy wtedy sprawdzić poprawność wpisanej nazwy zmiennej. Zmienne aktualnie kontrolowane mają obok swojej nazwy zielony kwadrat, natomiast zmienne nie kontrolowane kwadrat czerwony. Aby kontrolować daną zmienną lub aby wyłączyć kontrolę nad zmienną należy myszką kliknąć w kwadrat, poczym powinien on zmienić swój kolor.



Rys. 8. Okno programu Tkombajn – zakładka [Variables]

Zmienne oznaczone jako kontrolowane mogą zostać nadpisane lub odczytane przez użytkownika. Odczyt wartości zmiennej następuje przez naciśnięcie przycisku [RD] lub klawisza F5, wartość odczytana zostanie wyświetlona po prawej stronie nazwy zmiennej w kolumnie oznaczonej „Actual value”. Nadpisanie wartości danej zmiennej następuje po wciśnięciu klawisza [WR]. Wartość która zostanie wpisana pod daną zmienną należy umieścić po prawej stronie zmiennej w kolumnie „New value”. Zapis wartości odbywa się też przez wpisanie liczby w okienku „New value” i naciśnięcie klawisza Enter.

Okno zakładki [Registration] (rys. 9) umożliwia przeprowadzenie rejestracji zmiennych procesora. Zmienne przeznaczone do rejestracji wpisuje się w pierwszej kolumnie i zatwierdza klawiszem [ENTER]. Druga kolumna służy do ustalenia warunku (< - mniejszy niż; > - większy niż; = - równy), który ma zostać spełniony do rozpoczęcia rejestracji. Trzecia kolumna umożliwia wpisanie wartości do spełnienia przez zadany wcześniej warunek. Z lewej strony nazwy zmiennej umieszczone zostały szare pola. Kliknięcie myszką spowoduje zmianę na kolor zielony i jednocześnie włączenie warunku, który ma zostać spełniony podczas rejestracji.



Rys. 9. Okno programu Tkombajn – zakładka [Registration]

W zakładce [Registration] dostępne są 4 klawisze służące odpowiednio do:

- [Start] – uruchomienie rejestracji,
- [Download] – ściągnięcie danych ze sterownika do komputera,
- [Figure-fast] oraz [Figure-bcb] - uruchamiają dwa programy do prezentacji zarejestrowanych danych.

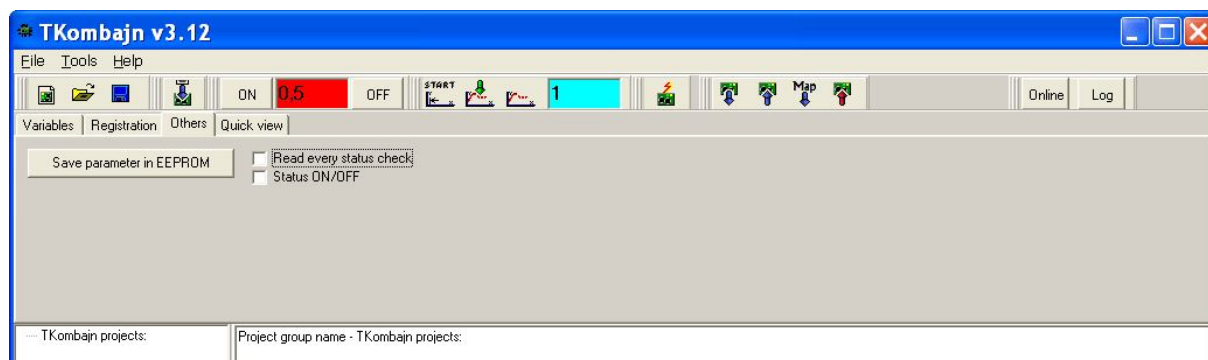
Dane zarejestrowane znajdują się w katalogu, określonym w ustawieniach projektu, jako plik tekstowy z rozszerzeniem „*.dat”.

Czas rejestracji można zmieniać przez mnożnik czasu próbkowania. Całkowity czas rejestracji przebiegów oboczny jest: $T_{PRÓBKOWANIA} \times MNOŻNIK \times BUFOR$, gdzie $T_{PRÓBKOWANIA}$ to czas próbkowania równy 150 μs , $MNOŻNIK$ to wartość wpisana w oknie edycyjnym natomiast $BUFOR$ to ilość rejestrowanych próbek równa 500.

W zakładce jest dostępny również pasek wskaźnika weryfikacji warunku rejestracji. Jego pozycja oznacza miejsce spełnienia warunku wybranego przy ustawianiu rejestracji zmiennych.

W zakładce [Quick view] można zaznaczyć opcje (rys. 10):

- „Read etery status check” - powoduje automatyczny odczyt zmiennych z pamięci procesora co około 1 s i aktualizację w zakładce [Variables],
- „Status ON/OFF” – wyświetla dodatkowe okno informujące o stanie pracy układu, awariach oraz stanie rejestracji i transmisji danych z procesora.



Rys. 10. Okno programu Tkombajn – zakładka [Others]