

# Sterowanie skalarne silnikiem klatkowym $U/f=\text{const}$

INSTRUKCJA

Arkadiusz Lewicki, Jarosław Guziński, Marcin Morawiec

12-12-2016

## Spis treści

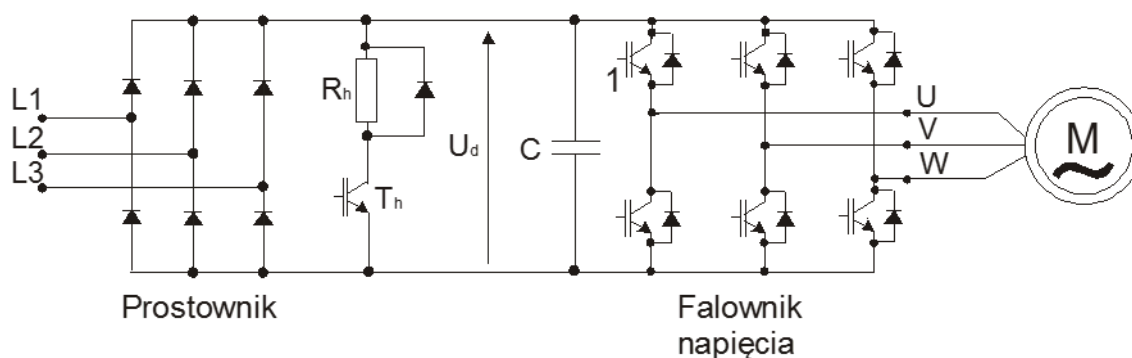
Cel ćwiczenia .....	2
Falownik napięcia .....	2
Sterowanie skalarne $U/f = \text{const}$ .....	2
Maksymalna wartość napięcia wyjściowego falownika napięcia.....	6
Strumień stojana i strumień wirnika .....	7
Podstawowy układ sterowania skalarnego .....	7
Układ z ogranicznikiem szybkości zmian sygnału zadanego .....	8
Omijanie prędkości krytycznych.....	8
Kompensacja poślizgu .....	9
Stanowisko laboratoryjne .....	10
Program ćwiczenia .....	11
Zagadnienia .....	14
Literatura uzupełniająca.....	14

## Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest badanie właściwości statycznych i dynamicznych układu napędowego zasilanego z falownika napięcia ze sterowaniem skalarnym  $U/f=\text{const.}$

## Falownik napięcia

Podstawowym sposobem regulacji prędkości obrotowej silnika asynchronicznego jest regulacja częstotliwościowa polegająca na zmianie parametrów napięcia zasilającego silnik. Do tego celu można wykorzystać przemiennik częstotliwości składający się z prostownika diodowego i falownika napięcia (Rys. 1). Rezystor  $R_h$  służy do rozpraszania energii elektrycznej pozyskanej z silnika podczas hamowania (wówczas silnik oddaje energię do falownika). Rezystor hamujący dołącza się do obwodu przekształtnika za pośrednictwem tranzystora  $T_h$  w przypadku wzrostu napięcia na kondensatorze  $C$ . W przypadku przekształtników z dwukierunkowym przepływem energii elektrycznej (prostownik diodowy jest wówczas zastępowany tzw. falownikiem sieciowym) nadmiar energii oddawany jest do sieci zasilającej. Rolą falownika sieciowego jest utrzymywanie określonego poziomu napięcia na kondensatorze falownika.



Rys. 1. Przemiennik częstotliwości z mostkiem prostowniczym i falownikiem napięcia

Zastosowanie falownika napięcia do zasilania układu napędowego z silnikiem indukcyjnym daje możliwości sterowania wartością amplitudy i częstotliwością napięcia zasilającego silnik. Napięcie wyjściowe falownika jest napięciem zmodulowanym – zawiera szereg impulsów o amplitudzie równej wartości napięcia w obwodzie pośredniczącym i zmiennej szerokości. Zmiana wartości średniej napięcia wyjściowego falownika dokonywana jest poprzez zmianę szerokości impulsów w kolejnych okresach impulsowania tranzystorów czyli przez modulację szerokości impulsów.

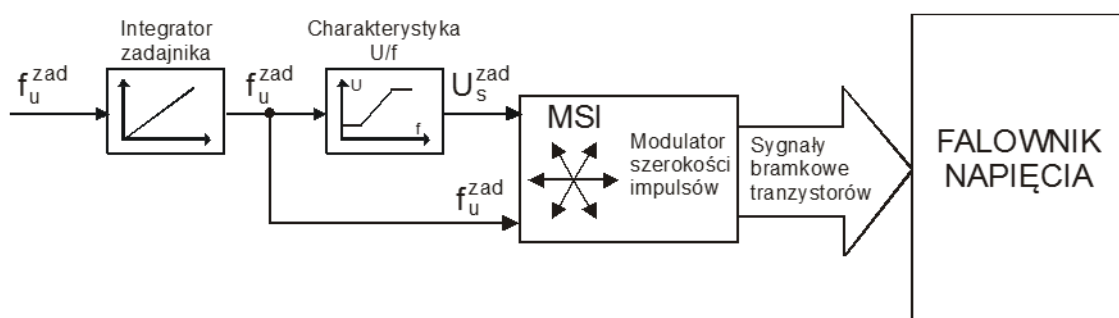
Zadana wartość napięcia zasilania silnika o regulowanej amplitudzie i częstotliwości ustalana jest przez algorytm sterujący pracą całego układu napędowego falownik-silnik. W napędach falownikowych silnika klatkowego stosowane są różne algorytmy sterowania o odmiennych właściwościach i stopniach złożoności.

## Sterowanie skalarne $U/f = \text{const}$

Metoda sterowania skalarnego jest najprostszą metodą sterowania układem napędowym falownik – silnik indukcyjny. W metodzie sterowania skalarnego, określanej również jako sterowanie typu  $U/f=\text{const.}$ , wykorzystuje się zależnościach obowiązujących dla stanów ustalonych pracy maszyny. W związku z tym układ sterowania nie oddziałuje na wzajemne położenie wektorów prądów i strumieni

skojarzonych i tym samym nie ma możliwości prawidłowej kontroli procesów przejściowych w takim napędzie.

W układzie sterowania skalarne  $U/f = \text{const}$  stabilizacja strumienia magnetycznego w silniku uzyskiwana jest na podstawie proporcjonalnej zmiany wartości napięcia i częstotliwości zasilania tj. przez utrzymanie stałego stosunku  $U/f$ . Wadą układu sterowania skalarne jest brak kontroli w stanach przejściowych nad istotnymi wielkościami silnika takimi jak m.in. prąd, moment elektromagnetyczny czy strumień magnetyczny. Z tego powodu, w celu ograniczenia niekorzystnych zjawisk w stanach przejściowych, stosuje się zmniejszenie dynamiki układu napędowego przez stopniową zmianę zadanej wartości częstotliwości napięcia stojana i związaną z tym stopniową zmianę wartości napięcia zasilającego silnik (Rys. 2).



Rys. 2. Układ sterowania skalarne  $U/f = \text{const}$  układem napędowym falownik-silnik

W układzie sterowania skalarne, na podstawie zależności obowiązujących dla stanu ustalonego silnika, nastawiane są wartości amplitudy i pulsacji wektora napięcia zasilającego maszynę. Przy takim sterowaniu wartość napięcia określana jest na podstawie zadanej częstotliwości napięcia silnika. Częstotliwość  $f_u$  i pulsacja napięcia zasilania silnika  $\omega_u$  związane są zależnością:

$$\omega_u = 2\pi f_u. \quad (1)$$

Zależności wiążące pulsacje napięcia zasilającego falownik z jego amplitudą można wyznaczyć wykorzystując równania modelu matematycznego silnika klatkowego:

$$u_{sx} = R_s i_{sx} + \frac{d\psi_{sx}}{d\tau} - \omega_a \psi_{sy}, \quad (2)$$

$$u_{sy} = R_s i_{sy} + \frac{d\psi_{sy}}{d\tau} + \omega_a \psi_{sx}, \quad (3)$$

gdzie:  $u_{sx}$ ,  $u_{sy}$  są składowymi wektora napięcia zasilania silnika,  $\omega_a$  jest (dowolną) prędkością wirowania układu współrzędnych x-y, w którym analizowane są powyższe zależności,  $i_{sx}$ ,  $i_{sy}$  są składowymi wektora prądu,  $\psi_{sx}$ ,  $\psi_{sy}$  są składowymi wektora strumienia stojana,  $R_s$  jest rezystancją stojana.

Przyjmuje się układ współrzędnych d-q skojarzony ze strumieniem stojana (prędkość wirowania tego układu jest prędkością synchroniczną – równą pulsacji napięcia zasilającego silnik:  $\omega_a = \omega_u$ ), w którym:

$$\psi_{sd} = |\psi_s|, \quad (4)$$

$$\psi_{sq} = 0, \quad (5)$$

Zależności (2) i (3) można zapisać jako:

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d|\psi_s|}{d\tau}, \quad (6)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_u |\psi_s|, \quad (7)$$

W sterowaniu skalarным wykorzystuje się zależności obowiązujące dla stanu ustalonego pracy maszyny:

$$\frac{d|\psi_s|}{d\tau} = 0. \quad (8)$$

W takim przypadku zależność (6) i (7) przyjmą postać:

$$u_{sd} = R_s i_{sd}, \quad (9)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_u |\psi_s|, \quad (10)$$

Amplitudę wektora napięcia zasilającego można wyznaczyć z zależności:

$$|\mathbf{u}_s| = \sqrt{(u_{sd})^2 + (u_{sq})^2} = \sqrt{(R_s i_{sd})^2 + (R_s i_{sq} + \omega_u |\psi_s|)^2}, \quad (11)$$

Przy wyznaczeniu zależności wiążącej wartość modułu wektora wyjściowego z jego prędkością wirowania często pomija się wartość rezystancji stojana przyjmując  $R_s=0$ . Wynika to z tego, że przy wyższych częstotliwościach napięcia silnika rezystancja stojana  $R_s$  jest znacznie mniejsza od reaktancji stojana  $X_s$ :

$$X_s = 2\pi f_u L_s \gg R_s, \quad (12)$$

Przy pominięciu rezystancji stojana w zależności (11) moduł wektora napięcia zasilania silnika określa zależność:

$$|\mathbf{u}_s| = \sqrt{(\omega_u |\psi_s|)^2}, \quad (13)$$

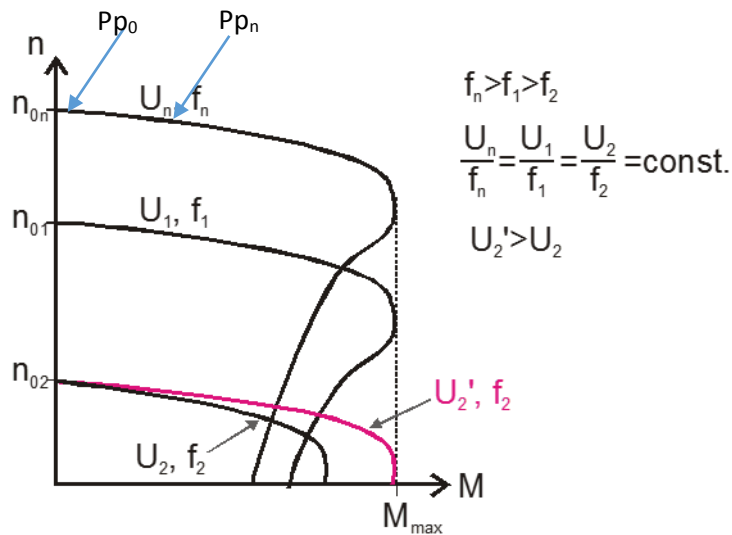
Przyjmując znamionową wartość strumienia stojana (wartość 1 w jednostkach względnych), można zapisać:

$$|\mathbf{u}_s| = \sqrt{(\omega_u)^2} = \pm \omega_u. \quad (14)$$

Z zależności (14) wynika, że należy proporcjonalnie do zadawanej pulsacji  $\omega_u$  zmieniać napięcie zasilania silnika  $|\mathbf{u}_s|$ . Pozwala to na utrzymanie znamionowego strumień stojana dla różnych prędkości obrotowych wału (różnych częstotliwości napięcia zasilającego silnik). **Jeśli strumień silnika pozostaje znamionowy to również moment maksymalny silnika jest stały.** Uwaga – jest to możliwe (zgodnie z warunkiem (8)) wyłącznie w stanie ustalonym pracy maszyny.

Kształtowanie charakterystyki mechanicznej silnika indukcyjnego przy sterowaniu skalarным i utrzymywaniu stałego stosunku napięcia do częstotliwości przedstawiono na rys. 3. Zmiana momentu obciążenia powoduje zmniejszenie prędkości obrotowej wału maszyny.

Sterowanie skalarne  $U/f = \text{const.}$



Rys. 3. Kształtowanie charakterystyki mechanicznej silnika przy sterowaniu skalarnym  $U/f = \text{const.}$   $Pp_0$  – punkt pracy silnika nieobciążonego, w którym prędkość wału jest zbliżona do prędkości synchronicznej,  $Pp_n$  – punkt pracy ze znamionowym momentem i znamionową prędkością

Zależność (13) można przekształcić do postaci:

$$|\psi_s| = \frac{|u_s|}{\omega_u} = \frac{|u_{sn}|}{\omega_{in}}, \quad (15)$$

gdzie  $|u_{sn}|$  jest znamionowym napięciem silnika, zaś  $\omega_{in}$  znamionową pulsacją. Stosunek 1/1 w jednostkach względnych [j.w.] odpowiada zachowaniu przykładowej proporcji napięcia znamionowego do częstotliwości znamionowej (np. 400[V] / 50[Hz]).

Jeżeli nie jest zachowany stosunek napięcia do częstotliwości równy 1 (przy zastosowaniu j.w.) to strumień ulega zmniejszeniu (a tym samym zmniejszony jest maksymalny moment jaki może wytworzyć maszyna):

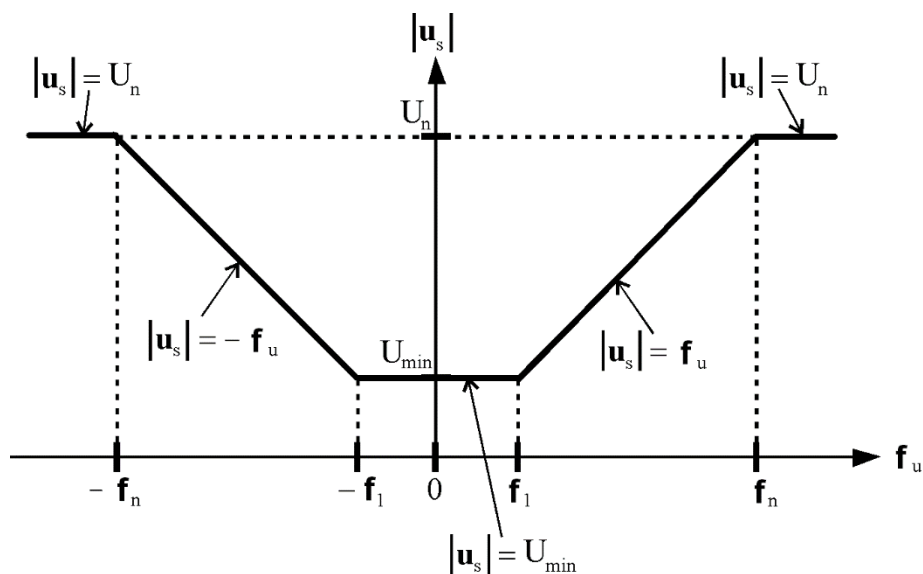
$$\frac{|u_s|}{\omega_u} < 1 \Rightarrow |\psi_s| < 1., \quad (16)$$

Typowa zależność między częstotliwością wyjściową oraz napięciem wyjściowym falownika złożona z kilku linii prostych (Rys. 4.) **Znamionowa wartość strumienia stojana utrzymywana jest wyłącznie w zakresie częstotliwości, dla której zachowany jest warunek określony zależnością (14).** Warunek ten jest spełniony dla częstotliwości z zakresu od  $f_1$  do  $f_n$  i  $-f_1$  do  $-f_n$  (Rys.4), gdzie  $f_n$  z reguły oznacza częstotliwość znamionową. W praktyce wartość graniczna częstotliwości, dla której dalszy jej wzrost nie powoduje zwiększania amplitudy napięcia zasilającego zależy od możliwości pozyskania napięcia o odpowiedniej amplitudzie ze źródła, jakim jest falownik. Falownik napięcia jest układem obniżającym napięcie – w przypadku falowników z prostownikiem diodowym nie ma możliwości uzyskania napięć wyższych niż napięcie zasilania przekształtnika. Możliwość taka pojawia się w przypadku zastosowania przekształtników składających się z dwóch falowników (sieciowego i silnikowego), gdzie istnieje możliwość sterowania wartością napięcia w obwodzie pośredniczącym.

Dla małych częstotliwości (w zakresie od  $-f_1$  do  $f_1$  (Rys. 4) silnik zasilany jest napięciem o amplitudzie wyższej niż wynika to z zależności (14). Spowodowane jest koniecznością skompensowania rezystancji stojana, która została pominięta podczas przekształcania zależności (11) do postaci (13). W przypadku niewielkich pulsacji napięcia zasilającego przestaje być spełniony warunek (12). Jeżeli

rezystancja nie zostanie skompensowana poprawnie, to strumień może osiągać wartości mniejsze od 1[j.w.] (strumień może być mniejszy od znamionowego) a tym samym ograniczona jest maksymalna wartość momentu generowanego przez silnik.

Wpływ pominięcia rezystancji stojana na charakterystykę mechaniczną silnika indukcyjnego dla małych częstotliwości przedstawiono na Rys. 3. Przy małej częstotliwości  $f_2$  maksymalny moment silnika jest zmniejszony z uwagi na zbyt małą wartość napięcia  $U_2$ . Zastosowanie większego napięcia  $U_2'$  powoduje wzrost momentu maksymalnego silnika.



Rys. 4. Charakterystyka  $U/f = \text{const}$

Dla wysokich pulsacji (większych od  $f_n$  lub mniejszych od  $-f_n$ ) wartość strumienia zmienia się zgodnie z zależnością (16) ( $|u_s|$  pozostaje na stałym poziomie, zwiększana jest pulsacja  $\omega_u$ ).

## Maksymalna wartość napięcia wyjściowego falownika napięcia

W układach napędowych, w których wartość napięcia znamionowego silnika jest wyższa od maksymalnej wartości napięcia wyjściowego falownika z modulacją szerokości impulsów, napięcie zasilające silnik ograniczone jest do wartości:

$$|u_s|_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{2} u_d, \quad (17)$$

gdzie  $u_d$  jest napięciem kondensatora obwodu pośredniczącego.

Wzrost napięcia wyjściowego falownika poza wartość określoną przez (17) prowadzi do wejścia falownika w zakres nadmodulacji. Przy nadmodulacji napięcie zasilania silnika jest odkształcone co powoduje równocześnie odkształcenia prądu zasilającego silnik.

W ćwiczeniu laboratoryjnym, aby uniknąć pracy z odkształconym prądem, częstotliwość zasilania silnika ograniczona została tak aby przy utrzymaniu stałego stosunku  $U/f$ , układ nie pracował w zakresie nadmodulacji.

## Strumień stojana i strumień wirnika

Związek pomiędzy amplitudą strumienia wirnika a amplitudą strumienia stojana wyznaczyć można z zależności:

$$|\boldsymbol{\psi}_s| = \frac{L_s L_r - (L_m)^2}{L_r} |\mathbf{i}_s| + \frac{L_m}{L_r} |\boldsymbol{\psi}_r|, \quad (18)$$

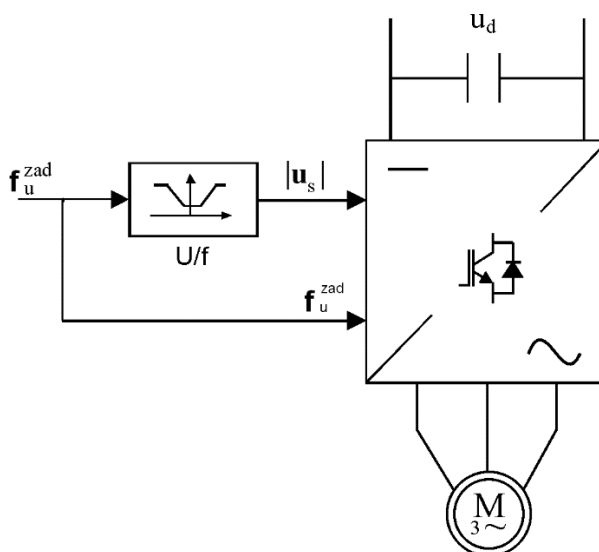
gdzie:  $|\boldsymbol{\psi}_r|$  jest modułem wektora strumienia wirnika,  $|\mathbf{i}_s|$  jest modułem wektora prądu.

Stałe czasowe elektromagnetyczne obwodu stojana i wirnika są różne. Obwód stojana ma mniejszą stałą czasową niż obwód wirnika. Różnice te można zauważyć obserwując przebiegi wartości chwilowych modułów obu strumieni. W przebiegu strumienia stojana widoczne są wyraźnie zmiany wynikające z impulsowego przebiegu napięcia stojana. Natomiast przebieg modułu wirnika stojana ma znacznie bardziej gładki kształt

## Podstawowy układ sterowania skalarne

W układzie sterowania skalarne wielkościami regulowanymi są: moduł napięcia stojana  $|\mathbf{u}_s|$  oraz jego pulsacja  $\omega_u$ . Pod względem stanów przejściowych właściwości układu napędowego ze sterowaniem skalarne są prawie takie same jak silnika klatkowego włączonego bezpośrednio do sieci. Różnica tkwi jedynie w możliwości regulacji modułu i pulsacji napięcia zasilającego stojan. Przez zmianę częstotliwości zmienia się prędkość obrotową. Aby zmieniać prędkość obrotową przy stałym obciążeniu maszyny należy zachować  $|\mathbf{u}_s|/f_u = \text{const.}$  Wówczas zarówno wartość strumień stojana jak i maksymalny moment elektromagnetyczny maszyny nie ulegają zmianie.

Schemat blokowy układu sterowania silnikiem indukcyjnym z charakterystyką  $U/f$  przedstawiono na rys. 5.



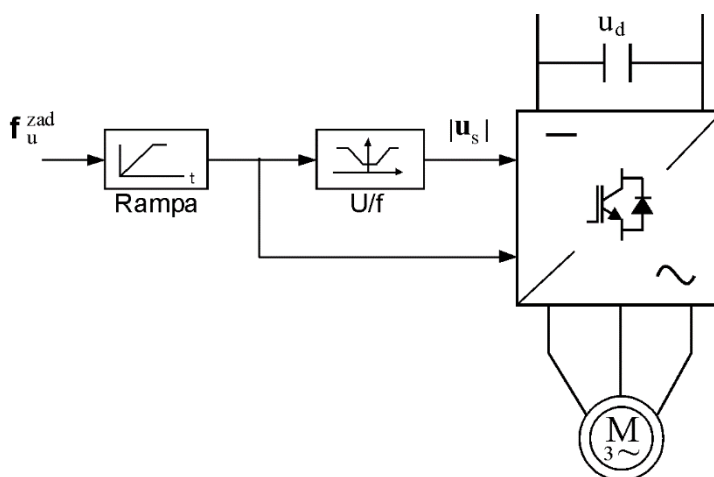
Rys. 5. Falownik napięcia z zadaniem napięcia według charakterystyki  $U/f$



W układzie z Rys. 5 sygnałem zadanym jest pulsacja napięcia  $\omega_u$  związana z częstotliwością  $f_u$  przez zależność (1). Na podstawie zadanej pulsacji  $\omega_u$  odczytywana jest z charakterystyki  $U/f$  zadana wartość napięcia wyjściowego falownika.

## Układ z ogranicznikiem szybkości zmian sygnału zadanego

Szybkie zmiany zadanej pulsacji napięcia powodują, że przestaje być spełniony warunek pracy w stanie ustalonym. Strumień maszyny zmniejsza się, co powoduje spadek wartości siły elektromotorycznej indukowanej (zależnej od prędkości i strumienia). SEM ma zwrot skierowany przeciwnie do napięcia zasilającego silnik. Jej zmniejszenie powoduje wzrost wartości prądów silnika (a tym samym prądów płynących przez falownik). W przypadku, gdy prądy te są zbyt duże – falownik może zostać wyłączony wskutek zadziałania zabezpieczeń nadprądowych. W celu uniknięcia niestabilnej pracy układu oraz ograniczenia wartości prądów w stanach przejściowych dla napędu ze sterowaniem skalarnym konieczne jest ograniczenie szybkości zmian zadanego sygnału częstotliwości. W tym celu do układu regulacji wprowadza się dodatkowy blok ograniczający szybkość zmian zadanej wartości pulsacji napięcia zasilającego przekształtnik – rys. 6. Na ten blok przyjęto się powszechnie określenie „rampa” pochodzące od słowa angielskiego oznaczającego nachylenie.



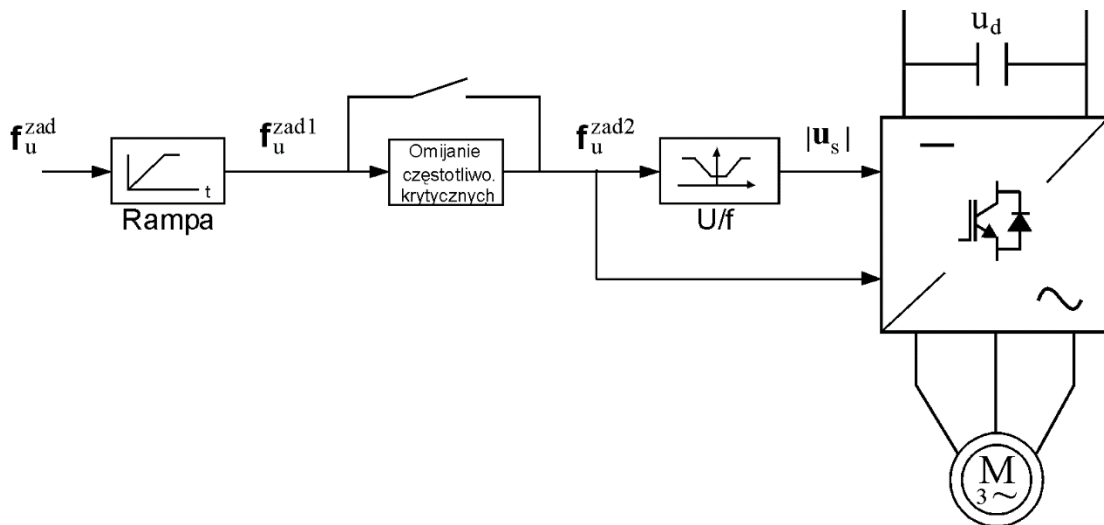
Rys. 6. Falownik napięcia z zadawaniem napięcia według charakterystyki  $U/f$  i ograniczeniem dynamiki częstotliwości zadanej

Blok rampy umożliwia realizację płynnych zmian prędkości obrotowej. Wpływa to korzystnie na ograniczenie niekorzystnych efektów występujących przy zmianach prędkości obrotowej silnika ale powoduje pogorszenie dynamiki zmian prędkości silnika.

## Omijanie prędkości krytycznych

Właściwości wirujących elementów mechanicznych układu napędowego mogą powodować pojawianie, dla niektórych prędkości obrotowych silnika, niebezpiecznych drgań mechanicznych. Niebezpieczne drgania wynikają z częstotliwości rezonansowych układu mechanicznego połączonego z maszyną indukcyjną. Uniknięcie długotrwałej pracy napędu przy takich prędkościach obrotowych jest realizowane w niektórych układach przez podanie, dla układu sterowania, zabronionych zakresów zadanej częstotliwości napięcia silnika. W tak zabezpieczonych układach skokowo zmieniana jest częstotliwość napięcia zasilania silnika przy przechodzeniu przez ustawiony, przez obsługę falownika, zakres prędkości krytycznych.

Na rys. 7. przedstawiono schemat blokowy skalarnego układu sterowania silnikiem klatkowym z omijaniem częstotliwości krytycznych.



Rys. 7 Falownik napięcia z zadawaniem napięcia według charakterystyki  $U/f$ , ograniczeniem dynamiki zmian pulsacji zadanej i funkcją omijania częstotliwości krytycznych

## Kompensacja poślizgu

Wzrost obciążenia silnika, przy niezmiennych wartościach napięcia i częstotliwości, powoduje wzrost poślizgu i spadek obrotów silnika. W celu utrzymania stałej wartości prędkości obrotowej wymagane jest wytworzenie większego momentu elektromagnetycznego przez silnik. W układzie sterowania skalarnego może odbywać się to przez zwiększenie napięcia przy zachowaniu stałej częstotliwości. Do określenia stopnia obciążenia silnika można wykorzystać pomiar prądu stojana. Do układu regulacji może zostać wprowadzana poprawka, dla napięcia zadanego, uwzględniająca wartość prądu stojana aktualnie pobieraną przez silnik.

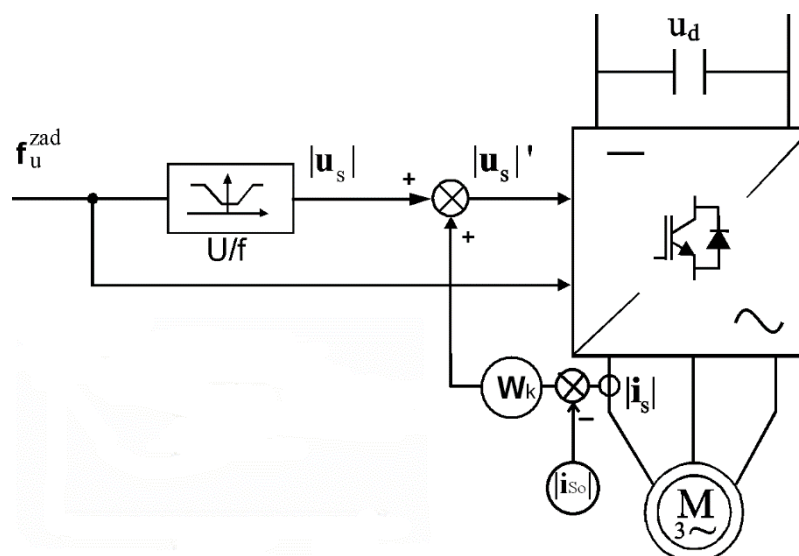
W układzie z kompensacją poślizgu zadana wartość modułu napięcia określona jest zależnością:

$$|\mathbf{u}_s|' = |\mathbf{u}_s| + w_k \cdot (|\mathbf{i}_s| - |\mathbf{i}_{so}|), \quad (19)$$

gdzie:  $|\mathbf{u}_s|$  jest modułem wektora napięcia silnika odczytanym z charakterystyki  $U/f$ ,  $|\mathbf{u}_s|'$  jest zadanym modułem wektora napięcia wyjściowego falownika uwzględniającego kompensację poślizgu,  $w_k$  jest stałym współczynnikiem dobieranym tak, aby uzyskać sztywną charakterystykę mechaniczną napędu,  $|\mathbf{i}_s|$  jest modułem aktualnej wartości prądu silnika natomiast  $|\mathbf{i}_{so}|$  - jest modułem prądu biegu jałowego silnika.

Wzrost obciążenia na wale maszyny pociąga za sobą wzrost prądu stojana i tym samym napięcia. Natomiast wzrost napięcia poprzez zwiększenie generowanego momentu powoduje wzrost prędkości obrotowej.

Struktura układu sterowania skalarnego z kompensacją poślizgu przedstawiona została na rys. 8.



Rys. 8 Układ sterowania skalarnego z kompensacją poślizgu

Tabela 1. Dane znamionowe maszyn elektrycznych

Silnik indukcyjny klatkowy TECO typ F 100L AEU2D		
Moc	$P_n$	3 kW
Napięcie	$U_n$	380 V $\Delta$
Prąd	$I_n$	6,98 A
Częstotliwość	$f_n$	50 Hz
Liczba par biegunów	$p$	2
Prędkość obrotowa	$n_n$	1425 obr/min
Współczynnik mocy	$\cos \varphi_n$	0,8
Sprawność	$\eta_n$	83,2%
Prądnica obcowzbudna prądu stałego KOMEL typ PZMb 54a		
Moc	$P_n$	5,5 kW
Napięcie twornika	$U_{tn}$	220 V
Prąd twornika	$I_{tn}$	28 A
Napięcie wzbudzenia	$U_{wn}$	220 V
Prąd wzbudzenia	$I_{wn}$	0,615 A
Prędkość obrotowa	$n_n$	3000 obr/min

## Stanowisko laboratoryjne

Układ napędowy składa się z silnika indukcyjnego o mocy 3kW i maszyny prądu stałego 5,5 kW pracującą jako generator. Dane maszyn przedstawiono w tab. 1.

Do twornika prądnicy podłączono rezystor regulacyjny za pomocą którego można twornika zmieniać obciążenie.

Pracą przemiennika częstotliwości steruje układ mikroprocesorowy SH65 ver.3.0 z procesorem sygnałowym DSP firmy Analog Devices typu ADSP21065L i układem logiki programowalnej FPGA firmy Altera typu FLEX6016. Program zawierający algorytm sterowania napędem przekazywany jest do

pamięci procesora DSP za pomocą programu konsoli operatora *TKombajn*, która umożliwia także zmianę parametrów sterowania, rejestrację i wizualizację przebiegów.

## Program ćwiczenia

- Zapoznać się z działaniem i obsługą przemiennika częstotliwości.
- Zapoznać się z działaniem i obsługą programu konsoli operatora *TKombajn*.
- Zmierzyć charakterystykę  $U/f$  realizowaną w badanym układzie. Charakterystykę wyznaczyć zapisując w tabelce wartości zadanej częstotliwości i modułu napięcia (wartości chwilowe tych zmiennych są odczytywane w programie *TKombajn*). W sprawozdaniu narysować charakterystykę i uzasadnić jej kształt.
  - Sprawdzić działanie układu przy małych częstotliwościach kontrolując moduł strumienia.
  - Sprawdzić moduł strumienia wirnika przy wysokich częstotliwościach i niskich.
  - Sprawdzić czy przy niskich częstotliwościach, tj. poniżej 10 Hz, moduł strumienia wektora wirnika obniża się w porównaniu ze strumieniem przy częstotliwościach wyższych.
  - Jaki jest moduł prądu stojana przy wysokiej i bardzo niskiej częstotliwości?
  - Określić wartość ograniczenia minimalnego napięcia charakterystyki  $U/f$  tak aby w jak największym zakresie małych częstotliwości strumień był zbliżony do znamionowego.
- Wyznaczyć charakterystyki mechaniczne układu czyli zależność pomiędzy prędkością obrotową a momentem elektromagnetycznym silnika  $\omega_{\text{sof}}=f(\text{me})$ . Wartości odczytywać w programie *TKombajn*, pomiary zapisywać w tabelce. Wyznaczyć charakterystyki dla 3 różnych zadanych częstotliwości: np.: 0,3 j.w., 0,5 j.w. oraz 0,7 j.w.

**Charakterystyki wyznacza się przy stałej, zadanej wartości częstotliwości napięcia stojana dla kolejnych zmian obciążenia silnika. Aktualną prędkość obrotową ( $\omega_{\text{sof}}$ ) i moment elektromagnetyczny ( $me$ ) odczytuje się w programie *TKombajn*.**

W sprawozdaniu charakterystyki przedstawić na wspólnym wykresie. Obliczyć sztywność charakterystyk.

Na podstawie uproszczonego wzoru Klossa (20) narysować charakterystykę mechaniczną silnika indukcyjnego wykorzystywanego w ćwiczeniu.

$$M_e = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (20)$$

gdzie:  $M_e$  – moment elektromagnetyczny silnika,  $M_k$  – moment krytyczny/maksymalny,  $s$  – poślizg,  $s_k$  – poślizg krytyczny.

W obliczeniach przyjąć, że  $M_k=2,7 M_n$ . Poślizg krytyczny można wyznaczyć podstawiając znamionowe wartości momentu i poślizgu do (20).

Porównać otrzymaną charakterystykę z charakterystykami zmierzonymi. Uzasadnić występujące różnice.

- Dla częstotliwości 0,5 [j.w.] oraz 0,7 [j.w.] sprawdzić działanie układu z kompensacją poślizgu. Kompensację poślizgu włącza się wpisując niezerowa wartość współczynnika *kompensacja*. Dobrać współczynnik kompensacji poślizgu tak, aby przy zmianach obciążenia charakterystyka mechaniczna napędu była jak najbardziej sztywna. Zmierzyć charakterystykę mechaniczną układu  $\omega_{\text{sof}}=f(\text{me})$  dla dobranego współczynnika *kompensacja*. Sprawdzić jak współczynnik

kompensacji wpływa na pobór prądu silnika oraz na moduł strumień wirnika wykreślając charakterystyki  $i_m = f(m_e)$ . Po zakończeniu pomiarów współczynnik kompensacji ustawić na 0. W sprawozdaniu narysować charakterystyki  $\omega_{\text{sof}} = f(m_e)$  zaznaczając dla jakiej wartości współczynnika kompensacji została wyznaczona. Charakterystyki porównać ze zmierzonymi w punkcie 4 dla odpowiednich częstotliwości napięcia zasilającego.

6. Dla zadanej pulsacji napięcia silnika  $\omega U = 0,5$  j.w. zarejestrować przebiegi: momentu elektromagnetycznego silnika, składowej  $u_{sx\_zad}$  napięcia silnika, składowej  $i_{mx}$  prądu stojana, składowych strumienia wirnika. Przebiegi zarejestrować dla najkrótszego czasu rejestracji.
7. Przeprowadzić nawrót silnika dla wybranej zadanej pulsacji napięcia (np.  $\pm 0,5$  j.w.) dla dwóch szybkości zmian sygnału zadanego. Nawrót przeprowadzić dla silnika nieobciążonego. Zarejestrować przebiegi: zadanej pulsacji napięcia, momentu elektromagnetycznego silnika, modułu prądu stojana  $i_m$ , napięcia w obwodzie pośredniczącym i prędkości obrotowej wału silnika oraz mocy czynnej i biernej stojana maszyny. Określić czas nawrotu. Określić, w jaki sposób szybkość zmian sygnału zadanego wpływa na czas osiągnięcia zadanej pulsacji.

W sprawozdaniu zwrócić szczególną uwagę na przebieg napięcia w obwodzie pośredniczącym oraz na przebiegi zmiennych przy zmianie kierunku obrotów silnika. Czy na podstawie zarejestrowanych przebiegów można określić kiedy maszyna indukcyjna pracuje jako silnik a kiedy jako prądnica? Przeanalizować co dzieje się, w badanym układzie, z energią wytwarzaną przy pracy prądnicowej maszyny indukcyjnej.

8. Przeprowadzić nawrót silnika tak jak w punkcie 7 rejestrując: zadaną pulsację napięcia stojana, moduł napięcia zasilającego silnik, moduł strumienia wirnika oraz moduł prądu stojana. W sprawozdaniu zwrócić uwagę na przebiegi strumienia i prądu przy małej częstotliwości i uzasadnić ich kształt.

Przeprowadzić rozruch i hamowanie silnika dla dwóch czasów narastania zadanej częstotliwości napięcia stojana bez obciążenia. Zarejestrować przebiegi: zadanej pulsacji napięcia, momentu elektromagnetycznego silnika, modułu prądu stojana, napięcia w obwodzie pośredniczącym i prędkości obrotowej wału silnika. Określić czas rozruchu i hamowania.

W sprawozdaniu zwrócić czy i w jaki sposób czas ograniczenie dynamiki zmian prędkości wpływa na przebiegi rejestrowanych zmiennych. Jak w układzie sterowania skalarnego można ograniczyć prąd rozruchowy silnika?

9. Przeprowadzić rejestracje momentu, prędkości, modułu prądu stojana, modułu napięcia stojana i modułu strumienia wirnika dla stanu ustalonego pracy napędu przy zadanych częstotliwościach 0,2 j.w. oraz 0,6 j.w. dla silnika na biegu jałowym i silnika obciążonego. W sprawozdaniu wyznaczyć procentowe zmiany prędkości obrotowej silnika dla poszczególnych badanych stanów pracy
10. Z badać działanie układu przy skokowym obciążeniu silnika – zarejestrować przebiegi: zadanej pulsacji napięcia, momentu elektromagnetycznego silnika, modułu prądu stojana, napięcia w obwodzie pośredniczącym, prędkości obrotowej wału silnika. Rejestrację wykonać przy stałej, zadanej pulsacji napięcia stojana np. 0,5 j.w. Skokową zmianę obciążenia zrealizować przez szybka zmianę pokrętkła regulacyjnego rezystora obciążenia. Zmieniać obciążenie tak aby nie przekroczyć prądu znamionowego prądnicy. W sprawozdaniu obliczyć jaka jest procentowa zmiana prędkości obrotowej silnika przy zmianach obciążenia. Uzasadnić dlaczego prędkość silnika zmienia się przy obciążeniu maszyny.

Tabela 2. Spis zmiennych dostępnych z poziomu programu *Tkombajn*

<b>UWAGA:</b> Gdzie nie jest to określone wielkości są podawane w jednostkach względnych, których opis zamieszczono w tab. 3	
<b>Nazwa</b>	<b>Opis</b>
imaA, imbA, imcA	Mierzone prądy fazowe silnika w [A] (układ współrzędnych naturalnych ABC)
imx, imy	Składowe $\alpha\beta$ mierzonego prądu silnika (układ współrzędnych ortogonalnych nieruchomych $\alpha\beta$ )
im	Moduł mierzonego prądu silnika
ud	Napięcie stałe w obwodzie pośredniczącym przekształtnika w [j.w.] – mierzone
udcV	Napięcie stałe w obwodzie pośredniczącym przekształtnika w [V] – mierzone
RampaMinusSek_UF RampaPlusSek_UF	Współczynniki określające szybkość zmiany sygnału zadanego częstotliwości: RampaPlusSek_UF – współczynnik określający szybkość narastania sygnału zadanego; RampaMinusSek_UF – współczynnik określający szybkość opadania sygnału zadanego;
kompensacja	Współczynnik dla układu z kompensacją poślizgu (domyślnie 0, dopuszczalny zakres 0 ... 0,5)
Input_FM	Zadana pulsacja napięcia zasilającego silnik - z zadajnika komputerowego programu <i>Tkombajn</i> (dopuszczalny zakres $-0,7 \dots +0,7$ j.w.) - na rys. 8, 9 oznaczona jako $\omega_u^{\text{zad}}$
omegaU_freq	Zadana pulsacja napięcia zasilającego silnik – na wejściu bloku charakterystyki U/f - zadana częstotliwość wektora napięcia stojana (zakres $-0,7 \dots -0,01$ oraz $+0,01 \dots +0,7$ j.w.) - na rys. 8 oznaczona jako $\omega_u^{\text{zad}2}$
omegaU_mod_MIN	Ograniczenie minimalnego napięcia charakterystyki U/f (dopuszczalny zakres 0,00 ... 0,15 j.w.)
omega_sof	Prędkość kątowa silnika estymowana w obserwatorze prędkości
me	Moment elektromagnetyczny
frx_so, fry_so	Składowe strumienia wirnika (układ współrzędnych $\alpha\beta$ )
fr	Moduł strumienia wektora wirnika
usx_zad, usy_zad	Składowe zadanego wektora napięcia zasilania silnika (układ współrzędnych $\alpha\beta$ )
us_zad_mod	Moduł napięcia zasilania silnika
PmF	Moc czynna stojana w [W]
Qm	Moc bierna stojana w [Var]

Wybrane zmienne określone są w jednostkach względnych odniesionych do wielkości bazowych podanych w tabeli 3.

Tabela 3. Jednostki bazowe

<b>UWAGA:</b> W sprawozdaniu należy wyznaczyć jednostki bazowe dla silnika wykorzystywanego w ćwiczeniu a wyniki umieścić w tabelce	
Napięcie	$U_b = \sqrt{3}U_{n\text{fazowe}} = U_{n\text{przewodowe}}$
Prąd	$I_b = \sqrt{3}I_n$
Impedancja	$Z_b = U_b / I_b$
Strumień magnetyczny	$\Psi_b = U_b / \omega_o$
Pulsacja elektryczna	$\omega_o = 2\pi f_n$
Pulsacja mechaniczna (bazowa prędkość kątowa wał silnika)	$\omega_b = \omega_o / p$
Moment	$m_b = \Psi_b \cdot I_b \cdot p$
Indukcyjność	$L_b = \Psi_b / I_b$

gdzie:  $f_n$  – znamionowa częstotliwość zasilania silnika

## Zagadnienia

1. Kształtowanie charakterystyki mechanicznej silnika indukcyjnego.
2. Częstotliwościowa regulacja obrotów silnika indukcyjnego.
3. Zasada sterowania skalarne  $U/f = \text{const}$  silnikiem indukcyjnym.
4. Wyjaśnić problemy związane ze sterowaniem skalarne przy niskiej częstotliwości napięcia silnika.
5. Wyjaśnić dlaczego przy niskiej częstotliwości napięcia silnika indukcyjnego nie jest utrzymywany stały stosunek  $U/f$ ?
6. W jakim celu utrzymywany jest stały stosunek napięcia do częstotliwości w napędzie silnika indukcyjnego zasilanego z falownika?
7. Jakie są wady i zalety sterowania skalarne  $U/f$ ?
8. W jaki sposób można poprawić właściwości układu napędowego silnika indukcyjnego przy sterowaniu  $U/f = \text{const}$ ?
9. W jakim celu ogranicza się szybkość zmian sygnału zadanego częstotliwości w układzie sterowania skalarne silnikiem indukcyjnym?

## Literatura uzupełniająca

1. Koczara W.: Wprowadzenie do napędu elektrycznego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
2. Zawirski K., Deskur J., Kaczmarek T.: Automatyka napędu elektrycznego, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012. Grunwald Z. (red): Napęd Elektryczny. WNT, Warszawa 1987.
3. Grunwald Z. (red): Napęd Elektryczny. Warszawa, WNT 1987.

4. Szklarski L., Dziadecki A., Strycharz J., Jaracz K.: Automatyka napędu elektrycznego. Wyd. AGH, Kraków 1987.
5. Tunia H., Kaźmierkowski M. Automatyka napędu przekształtnikowego. PWN, Warszawa 1987.
6. Orłowska-Kowalska T: Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi. Wrocław, Oficyna Wydawnicza PW 2003.