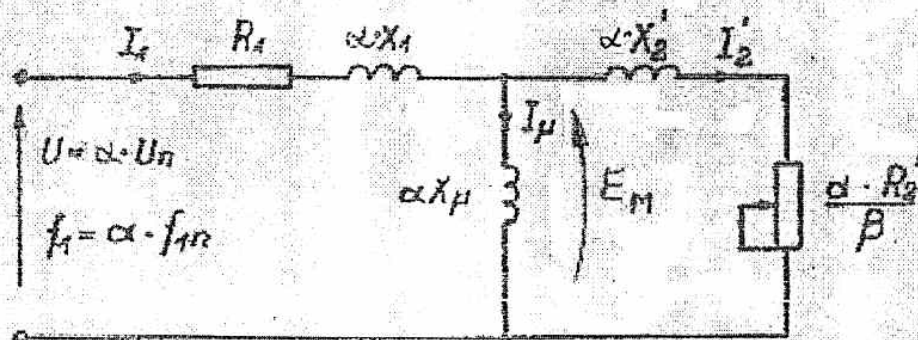


## STEROWANIE CZĘSTOTLIWOŚCIOWE SILNIKÓW ASYNCHRONICZNYCH KLATKOWYCH ; ĆWICZENIE 4.

Nowoczesny napęd elektryczny powinien zapewnić płynną regulację prędkości kątowej, pełną obciążalność momentem w całym zakresie regulowanej prędkości oraz wysoką sprawność przetwarzania energii elektrycznej w energię mechaniczną. Przez długie lata warunki te spełniał silnik bocznikowy prądu stałego sterowany napięciowo. Rozwój energoelektronicznych układów sterowania umożliwił budowę statycznych przetwornic częstotliwości służących do zasilania silników indukcyjnych. Taki rodzaj zasilania oddziałuje bezpośrednio na prędkość pola wirującego w maszynie i jest to najbardziej naturalna regulacja prędkości dla tego silnika. Silnik asynchroniczny klatkowy w porównaniu do silnika prądu stałego nie posiada komutatora jest tańszy i prostszy w konstrukcji i jest najchętniej stosowanym w napędzie elektrycznym rodzajem silnika.

*Częstotliwościowa regulacja prędkości kątowej silnika asynchronicznego sterowanego wg zasady  $U/f = \text{const}$*

W celu zapewnienia pełnej obciążalności momentem amplituda strumienia głównego  $\Psi_M$  silnika asynchronicznego w całym zakresie regulowanej częstotliwości powinna pozostawać stała. W przybliżeniu warunek ten spełnia zachowanie stosunku  $U/f = \text{const}$ . Na rys. 4a.1 przedstawiono schemat zastępczy silnika asynchronicznego sterowanego częstotliwościowo. Z rysunku tego wynika jednoznacznie, że wszystkie jego parametry można traktować jako propor-



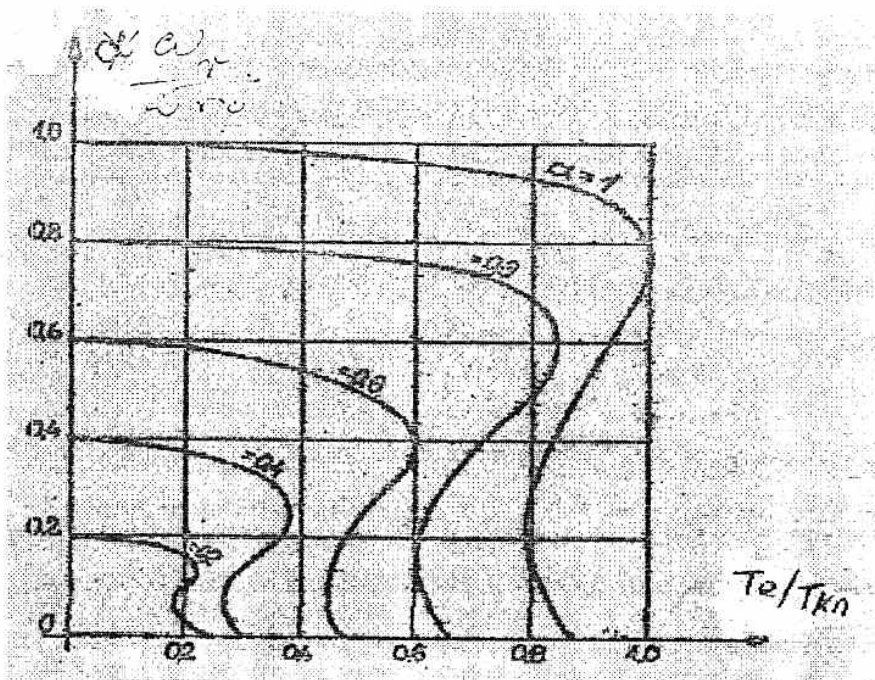
Rys. 4a. 1. Schemat zastępczy silnika asynchronicznego przy sterowaniu częstotliwościowym, gdzie:

- $U_n, f_{1n}$  - znamionowe napięcie i częstotliwość zasilania; na ogół 380V, 50Hz.
- $U$  - napięcie zasilania dla częstotliwości  $f_1$
- $\alpha$  - częstotliwość względna określona jako:  $\alpha = f_1/f_{1n}$
- $I_1, I_\mu, I_2'$  - prąd stojana, prąd magnesujący i prąd wirnika sprowadzony do obwodu stojana
- $R_1, R_2'$  - rezystancja stojana i wirnika
- $X_1, X_2, X_\mu$  - reaktancje indukcyjne rozproszenia stojana i wirnika oraz reaktancja główna związana z wytwarzaniem strumienia głównego silnika  $\Psi_M$
- $E_M$  - siła elektromotoryczna związana ze strumieniem głównym  $\Psi_M$
- $\beta$  - poślizg bezwzględny określony jako:

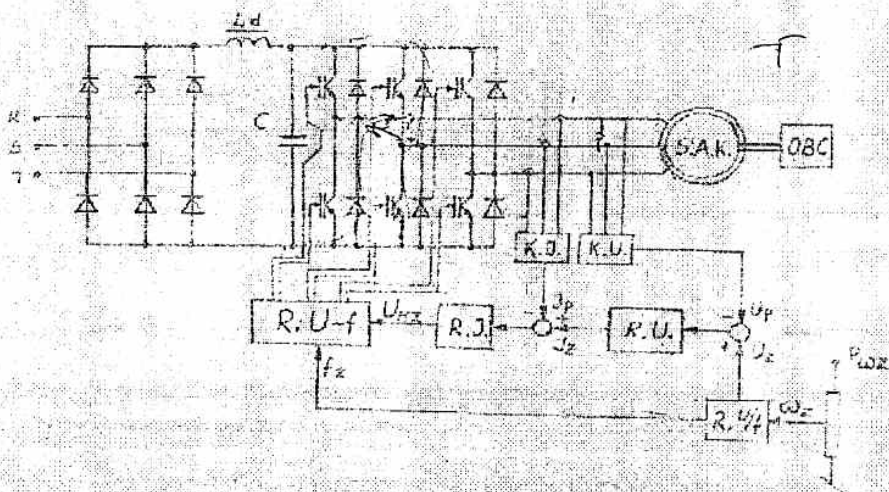
$$\beta = (\omega_s - \omega) / \omega_{sn} \text{ gdzie:}$$

- $\omega_s, \omega$  - prędkość pola wirującego i prędkość kątowa wału silnika dla częstotliwości  $f_1$
- $\omega_{sn}$  - prędkość pola wirującego w odniesieniu do znamionowej częstotliwości zasilania  $f_{1n}$





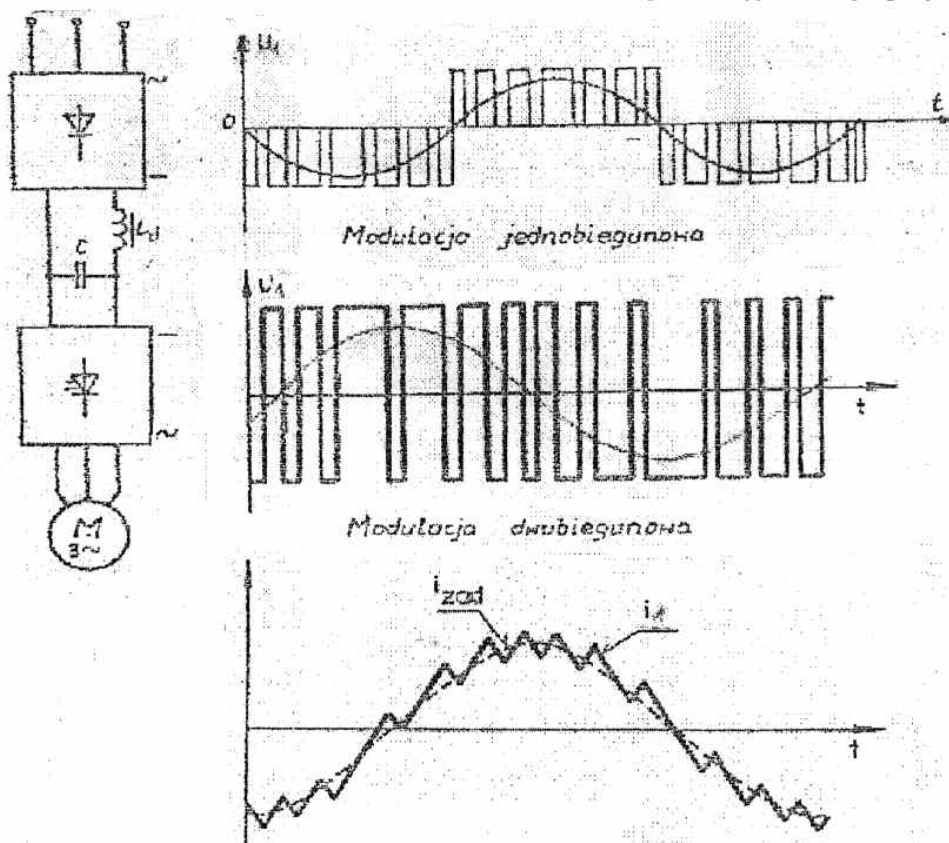
Rys. 4a.2. Przebieg charakterystyk mechanicznych silnika asynchronicznego sterowanego częstotliwościowo wg zasady  $U/f = \text{const}$ , gdzie:  
 $T_e$  - moment elektromagnetyczny silnika  
 $T_{kn}$  - wartość momentu krytycznego przy zasilaniu częstotliwością znamionową  $f_{in}$



Rys. 4a.3. Struktura sterowania przemiennika częstotliwości z modulacją sinusoidalną napięcia wyjściowego i wewnętrzną regulacją napięcia, gdzie:  
 $P_{\omega_z}$ ;  $\omega_z$  - potencjometr prędkości zadanej i prędkość zadana  
 K.I.; K.U. - kalibratory pomiarowe prądu i napięcia pomierzonego  
 R.I.; R.U. - regulatory prądu i napięcia  
 R.U/f - regulator stosunku napięcia zadanej i częstotliwości zadanej  
 R.U-f - sprzężony regulator napięcia wyjściowego i częstotliwości wyjściowej falownika  
 $I_z$ ,  $U_z$ ,  $f_z$  - wartości zadane prądu, napięcia i częstotliwości  
 $I_p$ ,  $U_p$  - wartości pomierzone prądu i napięcia  
 $U_{Mz}$  - wartość zadana amplitudy sinusoidy wzorcowej



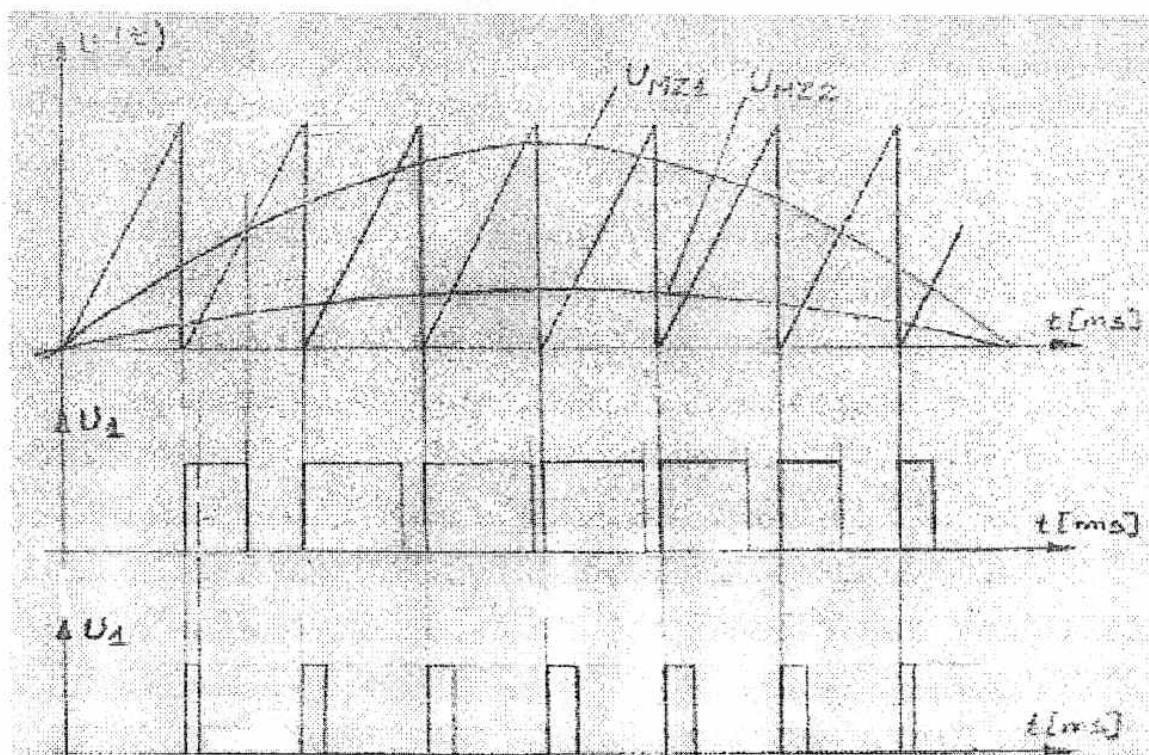
cyjonalne do częstotliwości z wyjątkiem oporności stojana, która w całym zakresie regulowanej częstotliwości pozostaje stała. Przy obniżaniu częstotliwości napięcia zasilającego staje się ona względnie coraz większa w stosunku do pozostałych reaktancji i ma względnie coraz większy wpływ na wewnętrzne spadki napięcia przy zmianach obciążenia. Jest to podstawowa przyczyna obniżania zdolności do wytwarzania momentu, którego przebieg przedstawiono na rys.4a.2. Spośród wielu możliwych konfiguracji układów przemienników częstotliwości najczęściej stosowanym jest falownik napięcia z pośredniczącym obwodem prądu stałego z wewnętrzną regulacją napięcia i częstotliwości, którego schemat przedstawiono na rys.4a.3. Sygnał zadany  $\omega_z$  z zadajnika prędkości  $P_{\omega z}$  w regulatorze stosunku napięcia do częstotliwości R.U/f. wyznacza zależność pomiędzy napięciem zadanym  $U_z$ , a częstotliwością zadaną  $f_z$ . Sygnał częstotliwości zadanej  $f_z$  określa wartość częstotliwości wyjściowej falownika w regulatorze sprzężonym napięcia i częstotliwości R.U-f. Sygnał napięcia zadanego  $U_z$  w regulatorze napięcia R.U. wraz z ujemnym sprzężeniem sygnału napięcia pomierzonego  $U_p$  określa wartość prądu zadanego  $I_z$ . Podporządkowany regulator prądu R.I. w powiązaniu z ujemnym sprzężeniem prądu mierzonego  $I_p$  określa wartość amplitudy średniej wartości generowanego napięcia wyjściowego  $U_{Mz}$ . Taka struktura sterowania upodabnia zasilanie silnika do dobrej, sztywnej sieci przemysłowej z ograniczeniem maksymalnej wartości prądu wyjściowego. Na rys. 4a.4 przedstawiono przykłady generowania zmodulowanych napięć wyjściowych w zależności od przyjętego algorytmu kluczowania tranzystorów mocy falownika oraz prądu wyjściowego przy obciążeniu.



Rys.4a.4. Przykładowe przebiegi napięcia i prądu falownika z modulacją sinusoidalną częstotliwości wyjściowej



zeniu silnikiem asynchronicznym. Na rys. 4a.5 zobrazowano zasadę regulacji napięcia i częstotliwości w sprzężonym regulatorze R.U-f jako jedną z wielu możliwości realizacji praktycznej.



Rys. 4a.5. Generacja przebiegów zmodulowanego sinusoidalnie napięcia wyjściowego w sprzężonym regulatorze R.U-f dla wysokiej i niskiej wartości amplitudy sinusoidy wzorcowej  $U_{MZ}$

Piłokształtny przebieg częstotliwości nośnej rzędu kilohertza jest porównywany w komparatorze z przebiegiem sinusoidy wzorcowej, której częstotliwość określa sygnał  $f_z$ , natomiast amplitudę sygnał  $U_{MS}$  z wyjścia regulatora prądu R.I. Przebieg piłokształtny i sinusoida wzorcowa podana jest na wejścia komparatora dwustanowego, który generuje impulsy zmodulowane sinusoidalnie mogące służyć do wysterowania tranzystorów mocy falownika. Uśredniona wartość tak otrzymanego przebiegu jest sinusoidalna. Przedstawiono przykładowe impulsy wyjściowe dla dwu wartości amplitudy sinusoidy wzorcowej  $U_{MZ1}$  i  $U_{MZ2}$ , która prowadzi bezpośrednio do regulacji wartości skutecznej napięcia wyjściowego falownika. Na obecnym poziomie rozwoju techniki nie ma problemów generowania sygnałowych przebiegów sinusoidalnych o kontrolowanej amplitudzie i częstotliwości. Do generacji napięć trójfazowych w układzie sterowania należy posiadać trójfazowy układ sinusoid wzorcowych. Tak elastyczny sposób pracy regulatora R.U-f umożliwia zastosowanie nieregulowanego pośredniczącego obwodu prądu stałego, który najczęściej realizowany jest z wykorzystaniem mostka diodowego. Zaletą takiej konfiguracji jest obciążenie sieci z wysokim  $\cos\phi$  i małym zniekształceniem prądu. Zasilanie silnika asynchronicznego zmodulowanym sinusoidalnym napięciem wyjściowym daje sinusoidalny przebieg prądu z niewielką zawartością subharmonicznych, które ze względu na wysoką częstotliwość i małą amplitudę mają pomijalny wpływ na wartość wypadkowego momentu silnika. Istnieje obszerna literatura na temat metod modulacji napięcia wyjściowego, która zapewniłaby minimalne zniekształcenia generowanych przebiegów i na obecnym etapie rozwoju techniki obróbka sygnałów w sprzężonym regulatorze R.U-f w zdecydowanej



większości przypadków realizowana jest w technice cyfrowej z wykorzystaniem sterowników mikroprocesorowych.

### Badania laboratoryjne

Na stanowisku badawczym silnik asynchroniczny klatkowy zasilany jest falownikiem napięcia firmy Toyo-Denki VF5100HG. Daje on regulację częstotliwościową obrotów silnika z zachowaniem stosunku  $U/f = \text{const}$ . Należy zapoznać się z instrukcją użytkownika falownika i danymi znamionowymi badanych maszyn i urządzeń. Układ sterowania falownika posiada sterownik mikroprocesorowy i stąd bogaty zestaw funkcji do realizacji nawrotów i ograniczeń wartości zadanych, które będą określane w czasie ćwiczenia. Na rejestratorze będą obserwowane prądy i napięcia w wybranych punktach obwodu ukazujące principia pracy silnika zasilanego napięciem zmodulowanym. Schemat połączeń przedstawiono na rys.(..). W celu wyznaczenia charakterystyk mechanicznych silnika  $\omega = f(T_b)$  należy wyznaczyć stałą maszyny obciążającej wg zależności:

$$k\Phi = C = \frac{U_s - I_s * R_t}{\omega}$$

Wartość momentu obciążającego określa się jako:

$$T_b = C * I_s$$

Gdzie:  $U_s$ [V] – napięcie twornika silnika prądu stałego

$I_s$ [A] – prąd obciążenia

$R_t$ [ $\Omega$ ] – oporność twornika

$\omega$ [rd/s] – prędkość kątowna badanego zespołu napędowego

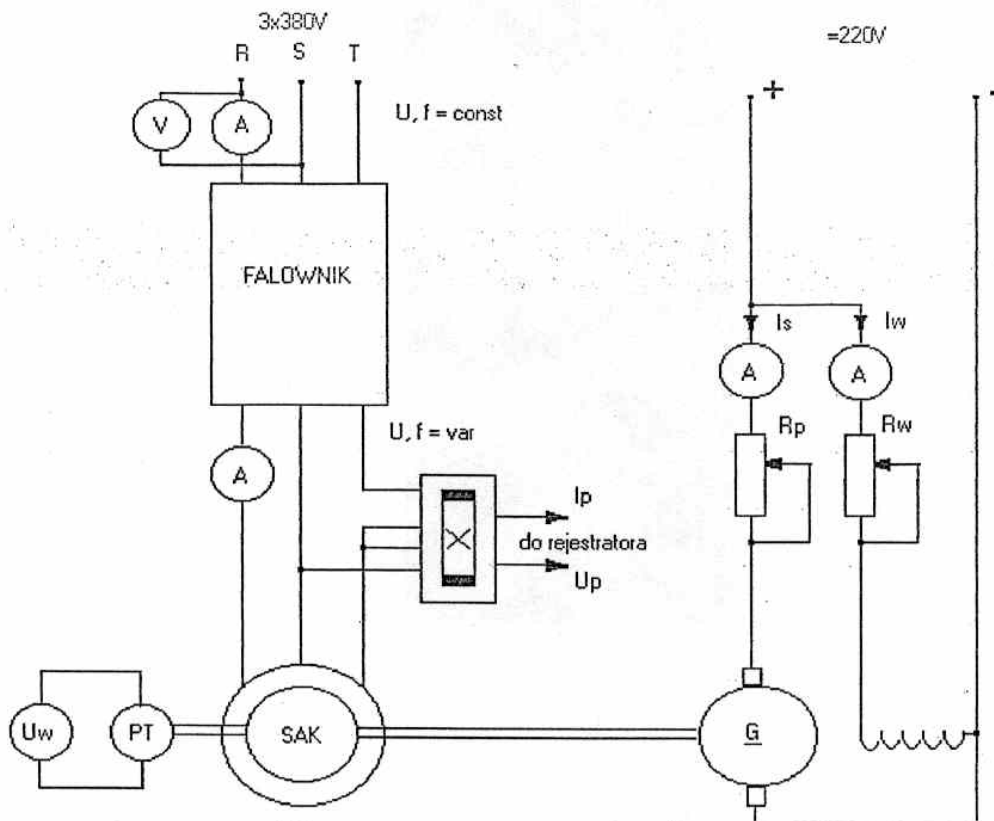
$k\Phi$ ;  $C$ [Nm/A] – stała maszyny

$T_b$  – wyznaczony moment obciążenia

Dla trzech poziomów wartości zadanej obrotów należy wyznaczyć przebieg charakterystyk mechanicznych  $\omega = f(T_b)$ , które obrazują reakcję silnika asynchronicznego na zmianę obciążenia.

#### 4b.1. STEROWANIE CZĘSTOTLIWOŚCIOWE SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO ZE STABILIZACJĄ STRUMIENIA GŁÓWNEGO $\Psi_M$

Przebadany falownik Toyo-Denki realizuje najprostsze w realizacji praktycznej kryterium sterowania częstotliwościowego silnika asynchronicznego, które zapewnia jego poprawną pracę. Jak wspomniano wyżej, takie sterowanie nie zapewnia pełnej obciążalności momentem w zakresie niskich częstotliwości napięcia zasilającego. Drugi falownik do przebadania na stanowisku Eurotherm 620 posiada układ sterowania, który zapewnia stabilizację strumienia głównego  $\Psi_M$  maszyny. Sposób modulacji napięcia wyjściowego jest analogiczny jak w wyżej opisanym falowniku. Dla zapewnienia stabilizacji strumienia wykorzystano cyfrowy enkoder do pomiaru prędkości obrotowej wału  $\omega_p$ . Cyfrowy pomiar prędkości pozwala na bardzo dokładne wyznaczenie poślizgu silnika asynchronicznego  $\beta$  jako, że w układzie sterowania wartość zadana częstotliwości też ma reprezentację cyfrową i określa prędkość wirowania pola magnetycznego  $\omega_s$ . Z równań opisujących własności maszyny asynchronicznej wynika, że stała wartość strumienia głównego  $\Psi_M$  może być jednoznacznie odwzorowana prądem stojana  $I_1$ , który uzależniony jest



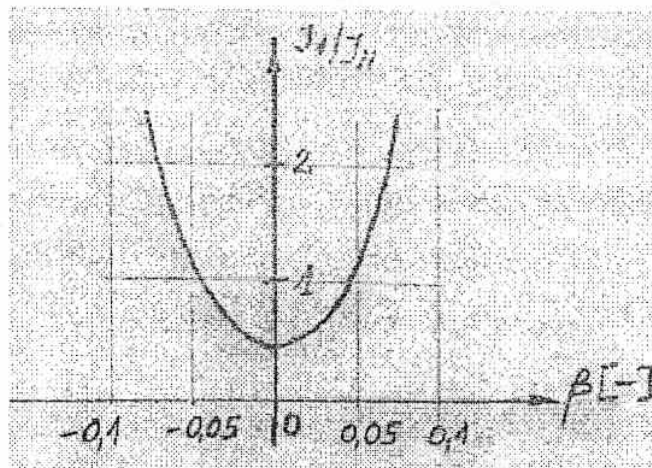
Rys.4a.6. Schemat połączeń silnika asynchronicznego z falownikiem Toyo-Denki VF 5100HG do wyznaczenia charakterystyk mechanicznych  $\omega=f(T_b)$  oraz przebiegów prądów i napięć w wybranych punktach obwodu

od parametrów stałych maszyny i wartością poślizgu wg zależności:

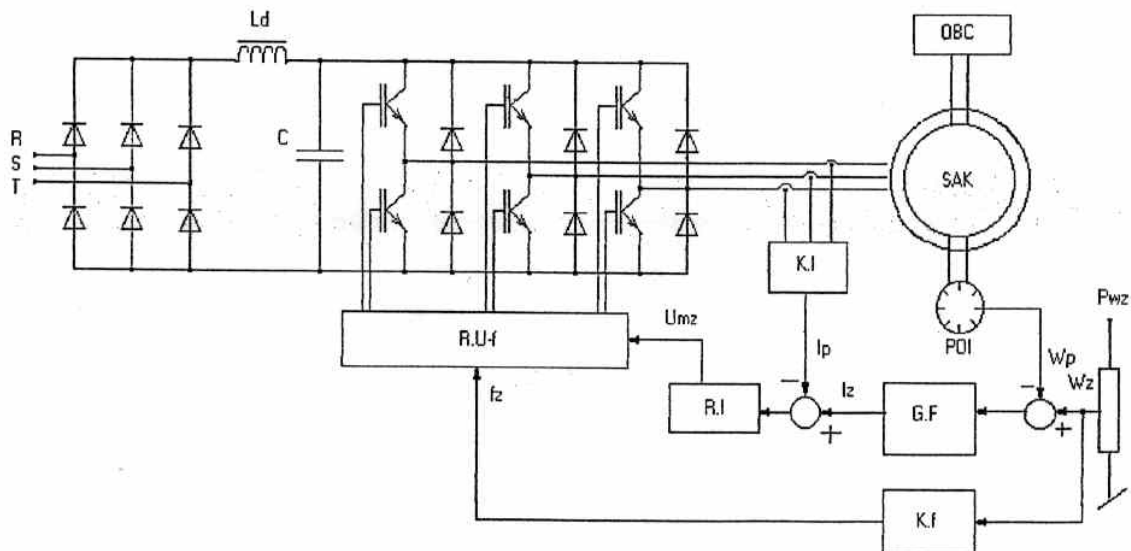
$$|I_1| = \frac{1}{X_\mu} \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{X_2 * \beta}{R_2}\right)^2}{1 + \left(\frac{X_1 * \beta}{R_2}\right)^2}}$$

Zaletą tak wyznaczonego kryterium sterowania jest to, że wartość strumienia  $\Psi_M$  nie zależy od napięcia i częstotliwości. Na rys.4b.1 przedstawiono przebieg zależności  $I_1=f(\beta)$ , która spełnia warunek stabilizacji strumienia  $\Psi_M$ . Stabilizacja strumienia  $\Psi_M$  wiąże się ze stabilizacją napięcia wewnętrznego  $E_M$ , które jest indukowane od tego strumienia i w tym kryterium sterowania spełniony jest warunek  $E_M/f=const$ . Taki sposób sterowania wymusza na napięciu zasilającym uwzględnianie kompensacji wektorowych spadków napięcia na impedancji stojana  $\Delta U_1=I_1*(R_1+j*\alpha*X_1)$ . To sprawia, że charakterystyki  $U_1=f(f)$  stają się nieliniowe i zależne od obciążenia. Ich przykładowy przebieg przedstawiono na rys.4b.3 Przedstawiona na rys.4b.2 struktura regulacji zapewnia podporządkowanie napięcia zasilania, które jest wymuszane zadaną wartością prądu  $I_1$  tak, by zapewnić stabilizację strumienia silnika  $\Psi_M=const$ . Zaletą tak realizowanego kryterium sterowania jest to, że obciążalność momentem w całym zakresie regulowanej częstotliwości pozostaje stała i na rys. (→ 4b, 4





Rys.4b.1. Przebieg prądu stojana  $I_1$  silnika asynchronicznego w funkcji poślizgu  $\beta$  dla kryterium stabilizacji strumienia  $\Psi_M$



Rys.4b.2. Struktura układu sterowania falownika dla kryterium stabilizacji strumienia magnetycznego silnika  $\Psi_M$  z wykorzystaniem pomiaru prędkości za pomocą przetwornika obrotowo impulsowego (enkodera) POI.

$P_{\omega z}$  – zadajnik prędkości obrotowej falownika

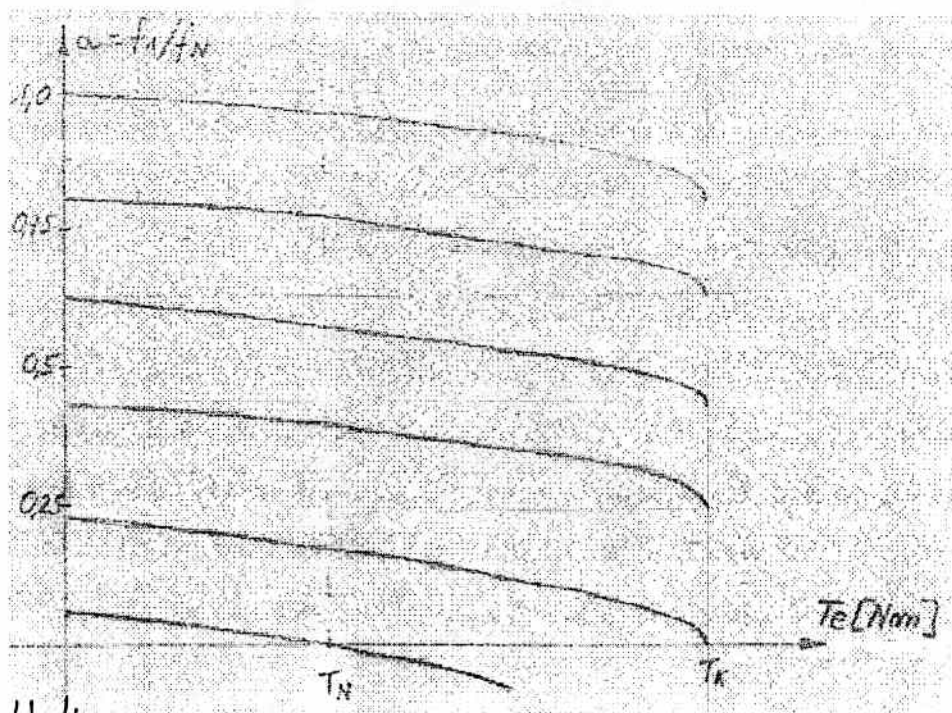
G.F – generator funkcji  $I_1=f(\beta)$

K.I; R.I – kalibrator i regulator prądu stojana

R.U-f – sprzężony regulator częstotliwości i napięcia wyjściowego falownika

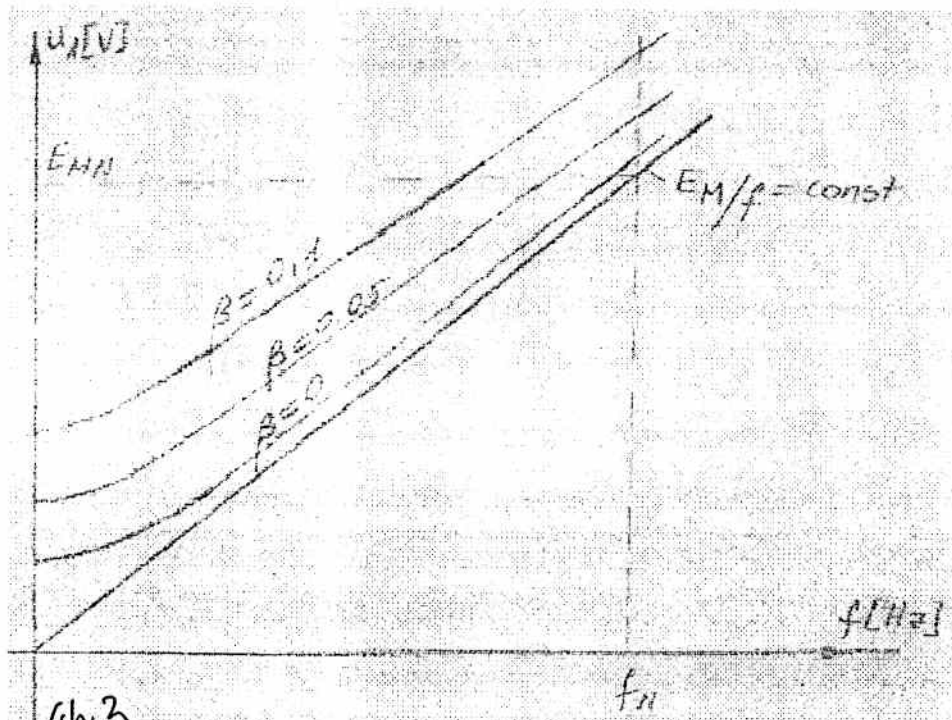
K.f – kalibrator częstotliwości zadanej

przedstawiono przebieg charakterystyk mechanicznych  $\omega=f(T_b)$  dla tak sterowanego silnika. Zaprezentowany układ napędowy nie stanowi kresu doskonalenia napędu częstotliwościowego sterowania silnika asynchronicznego. Kontrola i stabilizacja modułu strumienia daje pełną obciążalność momentem w całym zakresie regulowanej częstotliwości, nie pozwala jednak na ujawnienie pełni własności dynamicznych silnika. Dalsza rozbudowa metod sterowania z wykorzystaniem kontroli fazy strumienia prowadzi do tzw. sterowania półowo-zorientowanego.



4b.4

Rys. 4b.3. Przebieg charakterystyk mechanicznych silnika asynchronicznego sterowanego wg kryterium stabilizacji strumienia głównego  $\Psi_M$ .



4b.3

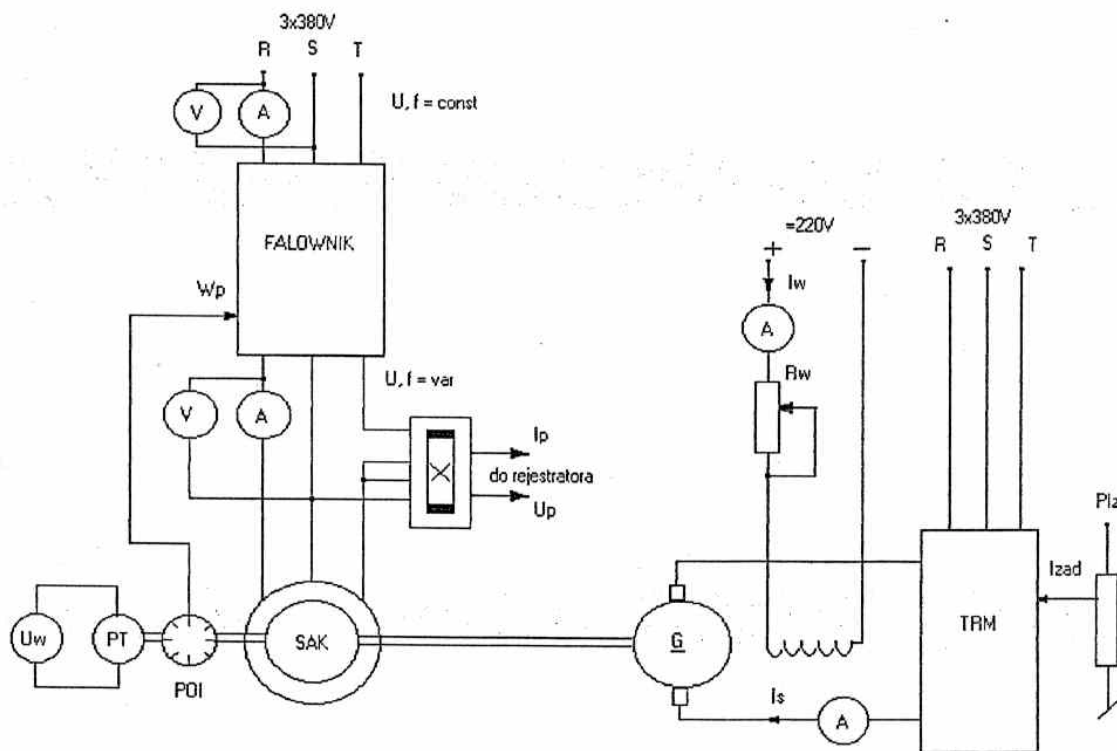
Rys. 4b.4. Charakterystyki napięcia zasilającego  $U_1=f(f)$  dla różnych poślizgów spełniający warunek stabilizacji napięcia wewnętrznego  $E_M$ .



Wówczas ujawnienia się pełnia własności dynamicznych silnika asynchronicznego, która jest nawet lepsza niż w silniku prądu stałego. Na obecnym etapie rozwoju mamy do czynienia z intensywnym udoskonalaniem tego sposobu sterowania na polu realizacji praktycznej i teoretycznej. W tym ćwiczeniu tego typu sterowanie nie będzie badane.

## BADANIA LABORATORYJNE.

Należy zapoznać się z instrukcją obsługi falownika Eurotherm 620VD i z danymi znamionowymi badanych maszyn i urządzeń. Na rys.4b.5 przedstawiono schemat połączeń falownika z badanym zespołem napędowym. Do wyznaczenia charakterystyk mechanicznych  $\omega=f(T_b)$  należy wykorzystać te same zależności jak w pierwszej części ćwiczenia. Przeprowadzać się będzie obserwację przebiegów prądów i napięć w wybranych punktach układu za pomocą rejestratora, a także zmiany napięcia zasilania w funkcji obciążenia, które oznaczają kompensację spadków napięcia na impedancji stojana.



Rys.4b.5. Schemat podłączenia falownika sterowania wektorowego Eurotherm 620VD do wyznaczenia charakterystyk mechanicznych  $\omega=f(T_b)$  oraz przebiegów prądów i napięć w wybranych punktach układu.

TRM - tyrystorowy regulator momentu obciążenia

## PYTANIA KONTROLNE

Omówić właściwości silnika asynchronicznego sterowanego częstotliwościowo wg kryterium  $U/f=\text{const}$ .

Wyjaśnić zasady sinusoidalnej modulacji napięcia wyjściowego falownika w sprzężonym regulatorze napięcia i częstotliwości R.U-f.

Porównać właściwości silnika asynchronicznego sterowanego wg zasady  $U/f=\text{const}$  i wg kryterium stabilizacji strumienia głównego  $\Psi_M$  silnika.