

ĆWICZENIE 3

REGULACJA PRĘDKOŚCI SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO PIERŚCIENIOWEGO

Program ćwiczenia

3a.1. Wprowadzenie

3a.1. *Zasada regulacji prędkości kątowej silnika pierścieniowego z tranzystorowym modulatorem rezystancji w obwodzie wirnika.*

3a.2. Badania laboratoryjne

3a.2.1. *Zapoznanie się ze schematami i danymi znamionowymi układów laboratoryjnych; wyznaczanie charakterystyk mechanicznych układu napędowego z opornością dodatkową w obwodzie wirnika oraz z tranzystorowym modulatorem rezystancji; omówienie przebiegów prądów i napięć w wybranych punktach układu.*

3b.1. Wprowadzenie

3b.1.1. *Zasada regulacji prędkości kątowej silnika pierścieniowego z tyrystorowym odwrotnie równoległym regulatorem wartości skutecznej napięcia zasilającego.*

3b.2. Badania laboratoryjne

3b.2.1. *Wyznaczenie charakterystyk mechanicznych układu napędowego z regulatorem wartości skutecznej napięcia zasilającego, omówienie przebiegów prądów i napięć w wybranych punktach układu.*

3.3. Pytania kontrolne

LITERATURA

3a.1 Wprowadzenie

Prezentowane w tym ćwiczeniu układy napędowe zapewniają płynną regulację prędkości kątowej silnika pierścieniowego, poprzez oddziaływanie na wartość poślizgu. Mogą być stosowane w układach małej i średniej mocy, tam gdzie napęd wykorzystywany jest okazjonalnie. W takich warunkach obniżona sprawność napędu nie ma dużego znaczenia i rekompensowana jest stosunkowo tanim i prostym w realizacji układem sterowania.

3.1.1. Zasada regulacji prędkości kątowej silnika pierścieniowego z tranzystorowym modulatorem rezystancji w obwodzie wirnika

W zastosowanym układzie regulacji prędkości napędu wykorzystano tę właściwość silnika asynchronicznego, że zdolność do rozwijania momentu maksymalnego T_k nie zależy od wartości oporności dodatkowej w obwodzie wirnika i jest określona zależnością:

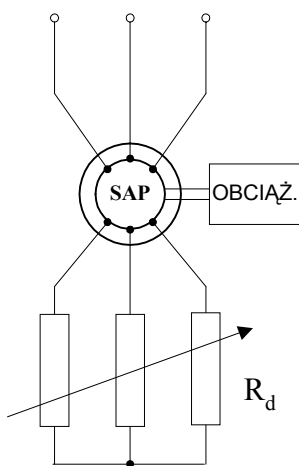
$$T_k [Nm] = k_1 \frac{U_1^2}{X_{s2}}$$

natomiast oporność dodatkowa w obwodzie wirnika bezpośrednio wpływa na wartość poślizgu krytycznego s_k

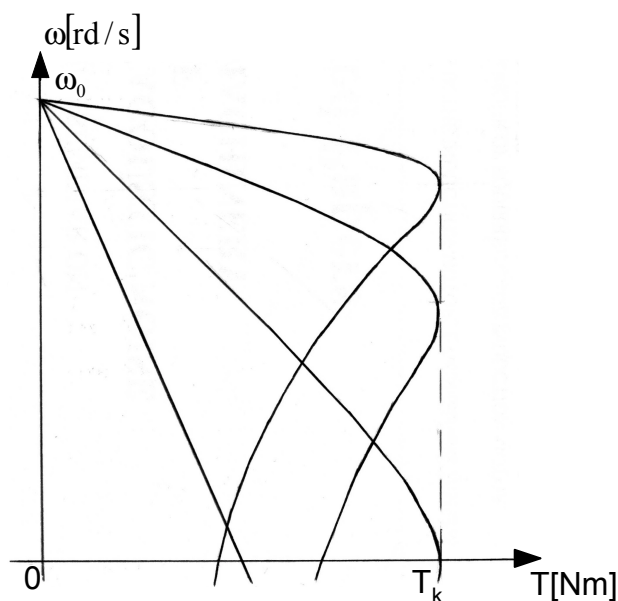
$$s_k [-] = \frac{R_2 + R_d}{X_{s2}}$$

gdzie: k_1 - stała silnika asynchronicznego
 R_2 - rezystancja uzwojenia wirnika
 U_1 - napięcie zasilania
 R_d - rezystancja dodatkowa
 X_{S2} - reaktancja rozproszenia wirnika

Przedstawiony na rys.3a.1 schemat napędowy z wykorzystaniem dodatkowej rezystancji w obwodzie wirnika należy do klasyki napędu silnika asynchronicznego, który powszechnie stosowano w praktyce. Na rys3a.2 przedstawiono charakterystyki mechaniczne tego układu uzyskane przy stałym napięciu zasilania $U_1=U_n; 50$ Hz i zmiennej oporności włączanej do obwodu wirnika.

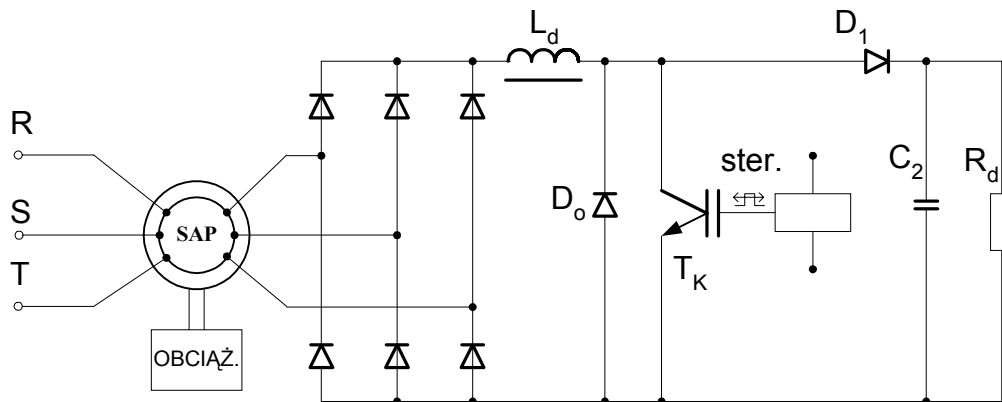


Rys.3a.1 Schemat silnika asynchronicznego pierścieniowego z oporową regulacją obrotów w obwodzie wirnika



Rys.3a.2 Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego przy zmianach oporności włączanej do obwodu wirnika

Przy realizacji tego napędu konieczne było posiadanie symetrycznego 3-fazowego sekcjonowanego opornika o dużej obciążalności cieplnej; przejścia na poszczególne charakterystyki realizowane były w sposób skokowy. Rozwój energoelektronicznych podzespołów sterujących dużej mocy pozwolił na uproszczenie tej koncepcji sterowania. Na prezentowanym ćwiczeniu przebadane zostaną właściwości napędowe silnika asynchronicznego z tranzystorowym modulatorem rezystancji, którego schemat

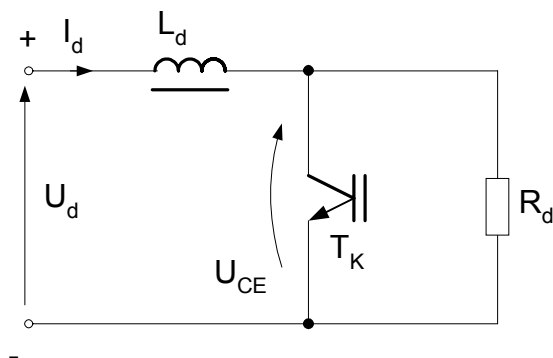


przedstawiono na rys.3a.3.

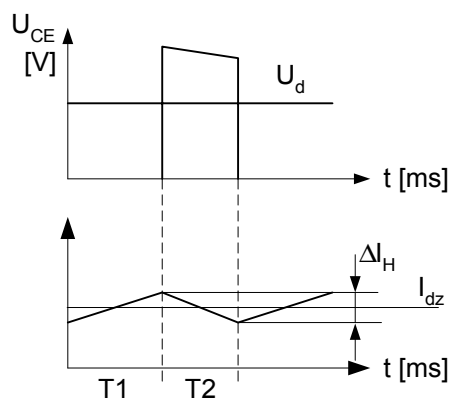
Rys.3a.3 Schemat układu napędowego silnika asynchronicznego z tranzystorowym modulatorem rezystancji w obwodzie wirnika.

- SAP — silnik asynchroniczny pierścieniowy
- OPP — układ ochrony przepięciowej tranzystora Tk
- PD — diodowy prostownik mocy
- D₁ — dioda odcinająca
- L_d — dławik wyrównawczy prądu wirnika
- C₂ — kondensator wyrównawczy
- Do — dioda zwrotna
- R_d — oporność obciążenia obwodu wirnika
- Tk — tranzystor kluczujący ze sterowaniem

Prostownik diodowy PD dokonuje konwersji 3-fazowego obwodu wirnika do obwodu jednofazowego. Umożliwia to zastosowanie pojedynczego opornika obciążenia R_d i modulatora rezystancji zbudowanego na bazie tranzystora Tk. Taka aplikacja powoduje nieznaczne pogorszenie (ok.17%) zdolności silnika do rozwijania momentu maksymalnego. Zastosowany tranzystor mocy IGBT ma parametry U_{CEmax}=600V; J_{Emax}=50A, a układ sterowania zapewnia dwustanową pracę tranzystora. W zastosowanym układzie załączenie tranzystora Tk równoważne jest zwarcie obwodu wirnika poprzez dławik L_d, natomiast odłączenie tranzystora Tk podłącza obwód wirnika poprzez diodę D₁ do opornika obciążającego R_d. Zdolność tranzystora Tk do zmiany stanu pomiędzy zwarcie a rozwarciem z dużą częstotliwością (ok.1kHz) umożliwia uśrednienie oporności wirnika od R_{dmin} ≅ 0 do R_{dmax}= R_d w zależności od czasu przewodzenia i wyłączenia tranzystora Tk. Podstawowe przebiegi związane z dwustanową pracą tranzystora przedstawiono na rys.3a.4.



Rys.3a.4. a) - poglądowy schemat modulatora rezystancji,



Rys.3a.4. b) - podstawowe przebiegi prądu i napięcia w czasie cyklu pracy tranzystora Tk.

U_{CE} — napięcie kolektor - emiter tranzystora Tk

U_d — wartość średnia napięcia obwodu wirnika

I_d — prąd wirnika na wyjściu mostka diodowego PD

I_{dz} — wartość zadana prądu wirnika w układzie sterowania tranzystora Tk

ΔI_H — szerokość histerezy w histerezowym regulatorze prądu tranzystora Tk

$T_1; T_2$ — czasy załączenia i odłączenia tranzystora Tk

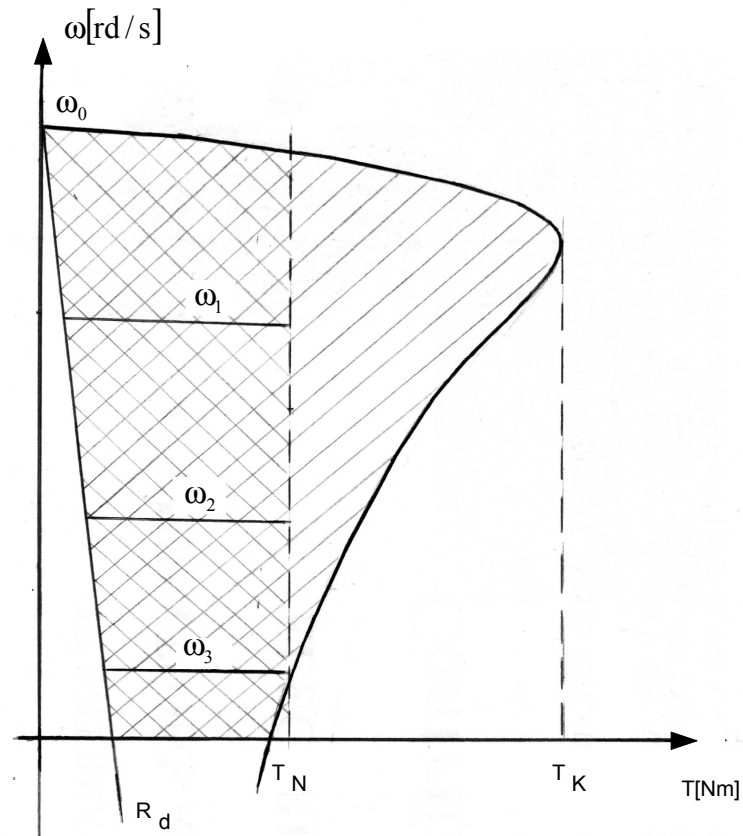
W przedziale T_1 występuje załączenie tranzystora Tk. W wyniku zaistniałego zwarcia pod wpływem napięcia wirnika U_d rośnie prąd I_d w obwodzie wirnika. Gdy osiągnie wartość $I_{dz} + 1/2\Delta I_H$ układ sterowania powoduje odłączenie tranzystora. Wówczas obwód wirnika zostaje załączony na rezystancję obciążenia R_d . W czasie cyklu T_2 gdy tranzystor Tk jest odłączony, pod wpływem napięcia $U_{CE} - U_d$ następuje obniżanie prądu wirnika do wartości $I_{dz} - 1/2\Delta I_H$. Regulator histerezowy w tym momencie ponownie załączy tranzystor Tk prowadząc do kolejnego narastania prądu I_d w obwodzie wirnika. Wartość wypadkowej tak zmodulowanej oporności obwodu wirnika R_{dm} określa zależność:

$$R_{dm} = (1-\varepsilon) * R_d \quad (3.3)$$

gdzie ε jest współczynnikiem przewodzenia tranzystora Tk

$$\varepsilon = \frac{T_1}{T_1 + T_2}$$

W zależności od warunków obciążenia i zadanych obrotów układ sterowania posiada zdolność do płynnej zmiany współczynnika ε (od $\varepsilon = 0$ do $\varepsilon = 1$). W efekcie daje to płynną regulację modulowanej oporności R_{dm} w przedziale : $0 \leq R_{dm} \leq R_d$. Płynna zmiana modulowanej rezystancji R_{dm} umożliwia płynną regulację charakterystyk mechanicznych silnika, której zakres przedstawiono na rys.3a.5.



Rys.3a.5 Zakres regulacji charakterystyk mechanicznych silnika asynchronicznego z modulatorem rezystancji w obwodzie wirnika.

- 1 — charakterystyka mechaniczna silnika dla $R_{dm} = 0$
- 2 — charakterystyka mechaniczna silnika dla $R_{dm} = R_d$
- zakres praktycznej regulacji obrotów związanych ze znamionowym momentem obciążenia T_N
- zakres regulacji obrotów przy przeciążeniu
- $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ — charakterystyki mechaniczne układu napędowego z wykorzystaniem ujemnego sprzężenia prędkościowego w układzie sterującym dla trzech zadanych poziomów prędkości

Płynna regulacja oporności wirnika pozwala na elastyczne kształtowanie charakterystyk mechanicznych silnika w zależności od zastosowanych regulatorów sterujących pracą tranzystora T_k .

3a.2 Badania laboratoryjne

3a.2.1. *Zapoznanie się ze schematami i danymi znamionowymi układów laboratoryjnych; wyznaczanie charakterystyk mechanicznych układu napędowego z opornością dodatkową w obwodzie wirnika oraz z tranzystorowym modulatorem rezystancji; omówienie przebiegów prądów i napięć w wybranych punktach układu*

Na istniejącym stanowisku badawczym należy zapoznać się z danymi znamionowymi badanych maszyn oraz układami sterowania. Zgodnie z rys.3a.6 obwód wirnika silnika asynchronicznego podłączony zostaje do opornika trójfazowego i dla trzech wartości oporności dodatkowej wyznacza się charakterystyki mechaniczne układu napędowego $\omega=f(T_b)$. Maszynę prądu stałego łączy się w układ silnika. Pracuje on w warunkach hamowania przeciwprądowego wytwarzając moment hamujący T_b przeciwny do momentu napędowego silnika asynchronicznego. Wartość momentu hamującego T_b wyznacza się z zależności:

$$T_b[\text{Nm}] = C \cdot I_t$$

Stałą maszyny C wyznacza się dla ustalonego prądu magnesującego $I_m \cong 0,72 \text{ A}$ wg zależności

$$C[\text{Vs}] = (U_t - I_t \cdot R_t) / \omega$$

pulsację układu napędowego wyznacza się z odczytu obrotów n wg zależności:

$$\omega[\text{rd/s}] = 2 \cdot \pi \cdot n / 60 ;$$

gdzie: $I_t[\text{A}]$ – prąd twornika

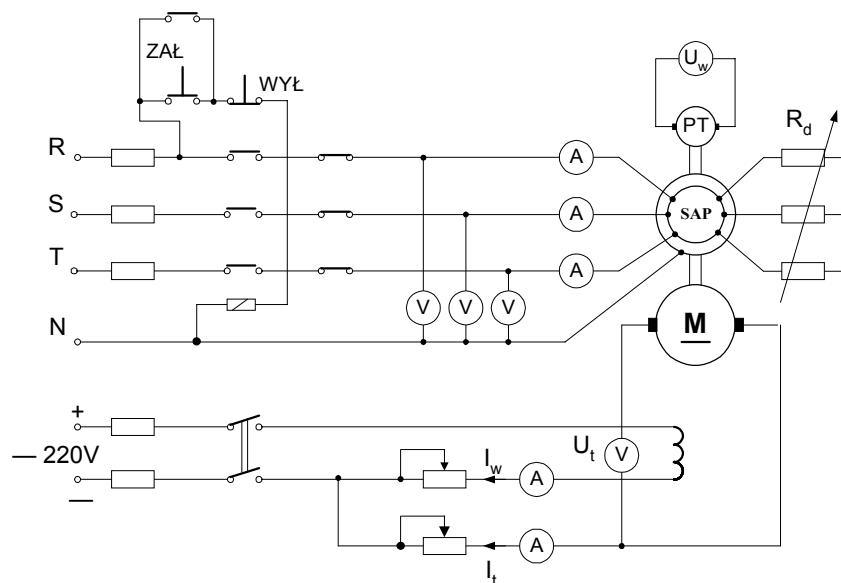
$C[\text{Nm/A}]$ lub $\{\text{Vs}\}$ – stała maszyny

$U_t[\text{V}]$ – napięcie twornika

$R_t[\Omega]$ – rezystancja twornika

$\omega[\text{rd/s}]$ – prędkość kątowa układu badanego; n [obr/min] – obroty

Po wyznaczeniu charakterystyk mechanicznych w klasycznym układzie napędowym, obwód wirnika silnika asynchronicznego podłączony zostaje do układu tranzystorowego modulatora rezystancji, którego schemat pokazano na rys.3a.7. Układ wyzwala UW tranzystora mocy T_k sterowany jest sygnałem z regulatora histerezy RH. Podporządkowany regulator prądu RI jest regulatorem proporcjonalno - całkującym PI, który z regulatora nadrzędnego prędkości R_ω otrzymuje wartość zadaną prądu I_{dz} . Ujemne sprzężenie zwrotne pomiędzy prądem zadanym I_{dz} , a prądem pomierzonym I_{dp} wymusza w obwodzie stałoprądowym wirnika równość prądu zadanego I_{dz} i prądu pomierzonego I_{dp} . Nadrzędny regulator prędkości R_ω porównuje sygnał zadany prędkości ω_z z potencjometru P_ω oraz sygnał prędkości pomierzonej ω_p z prądniczy tachometrycznej PT. Podobnie i w tym regulatorze ujemne sprzężenie pomiędzy sygnałami ω_z i ω_p prowadzi w silniku asynchronicznym do wymuszenia zmian generowanego momentu na zadanym poziomie prędkości ω_z . W efekcie otrzymuje się przebieg charakterystyk mechanicznych $\omega = f(T_b)$ analogiczny jak w silniku bocznikowym prądu stałego z napięciową regulacją obrotów.



Rys.3a.6 Schemat pomiarowy układu napędowego z silnikiem asynchronicznym pierścieniowym do wyznaczenia charakterystyk mechanicznych ze zmienną opornością R_d w obwodzie wirnika.

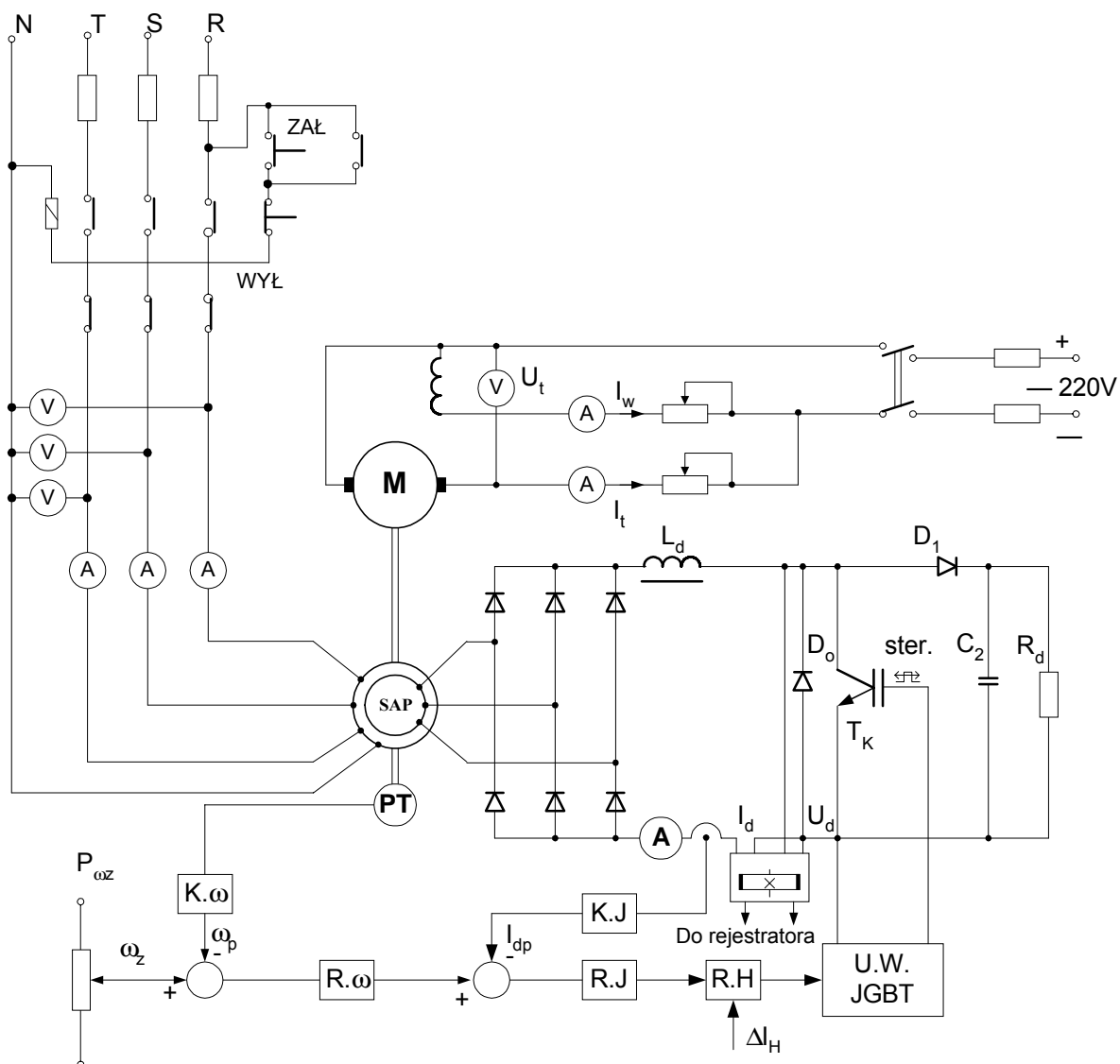
Celem tego ćwiczenia jest zapoznanie się z układem sterowania tranzystorowego modulatora rezystancji oraz wyznaczenie charakterystyk mechanicznych $\omega = f(T_b)$ dla trzech zadanych poziomów prędkości kątowych badanego zespołu napędowego. Korzystając z komputerowego rejestratora należy dokonać obserwacji, interpretacji przebiegów prądów i napięć w wybranych punktach obwodu elektrycznego.

3b.1 Wprowadzenie

3b.1.1 Zasada regulacji prędkości kątowej silnika pierścieniowego z tyrystorowym odwrotnie równoległym regulatorem wartości skutecznej napięcia zasilającego.

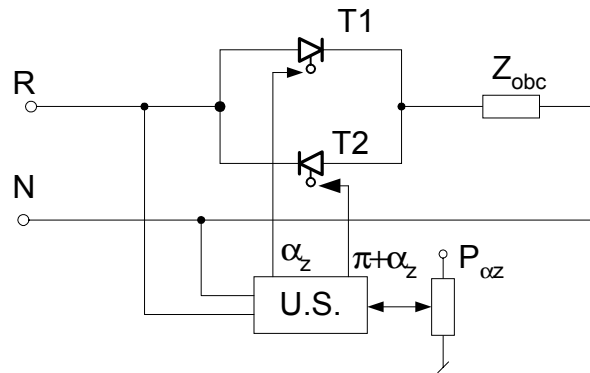
W tym układzie napędowym do regulacji obrotów wykorzystuje się 3-fazowy regulator wartości skutecznej napięcia zasilającego, który w sposób płynny umożliwia zmianę jej wartości od $U_{1min} = 0V$ do $U_{1max} \cong U_{1N}$. Głównym elementem wykonawczym jest para odwrotnie równoległych tyrystorów w każdej z faz R, S, T. Podłączenie przewodu zerowego do punktu neutralnego gwiazdy uzwojeń stojana badanego silnika sprawia, że impulsy zapłonowe każdej pary tyrystorów są zsynchronizowane napięciem danej fazy i mogą pracować niezależnie od siebie.

Na rys. 3b.1 przedstawiono minimalną strukturę obwodu energoelektronicznego zapewniającą prawidłowość regulacji napięcia w jednej fazie. Zasady pracy sterowników w pozostałych fazach są jednakowe. Zdolność układu sterowania U.S. do płynnej zmiany kąta zapłonu α z od 0 do π dla każdego tyrystora umożliwia płynną regulację napięcia wyjściowego. Zapewnienie symetrii wyzwala pary tyrystorów T1 i T2 pozwala na uniknięcie składowej stałej w uzwojeniach silnika asynchronicznego.

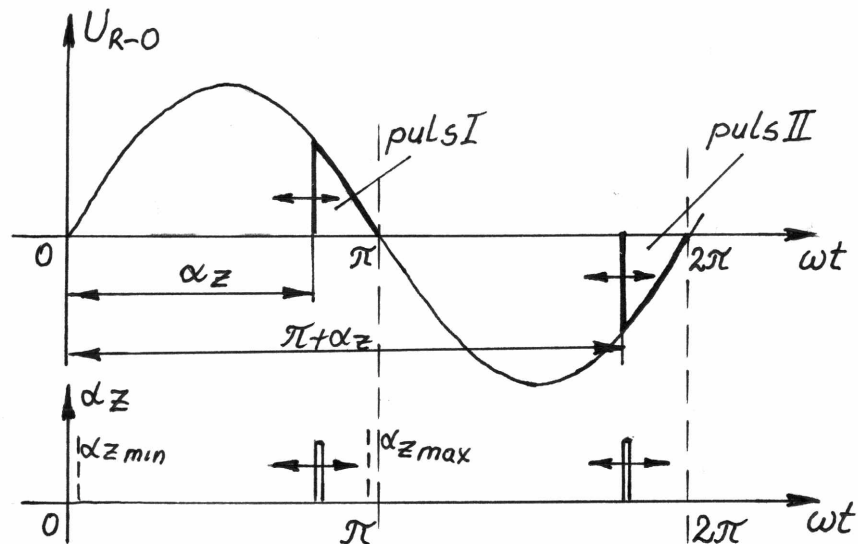


Rys. 3a.7. Schemat połączeń silnika asynchronicznego pierścieniowego z tranzystorowym modulatorem oporności wirnika do badań i wyznaczenia charakterystyk mechanicznych napędu

- M – silnik prądu stałego jako obciążenie,
- SAP – silnik asynchroniczny pierścieniowy,
- PT – prądnica tachometryczna,
- K.ω - kalibrator prędkości kątowej,
- Rω - regulator prędkości kątowej
- K.J; R.J – kalibrator i regulator prądu
- R.H – regulator histerezowy
- U.W. JGBT – układ sterowania tranzystora mocy T_K



Rys. 3b.1. Podstawowy układ sterowania wartości skutecznej napięcia jednej fazy.
 T1, T2 – para odwrotnie równoległych tyrystorów Z_{obc} – impedancja obciążenia U.S. – układ synchronizacji i formowania impulsów zapłonowych P α_z – zadajnik kąta zapłonu tyrystorów α_z – impulsy zapłonowe



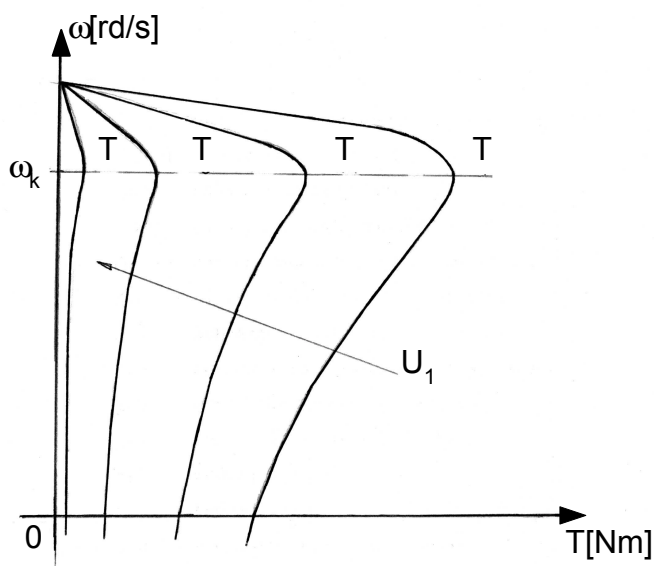
Rys. 3b.2. Przebiegi regulowanego napięcia zasilania i impulsów zapłonowych puls I – powstaje w tyrystora T2-wyniku załączenia tyrystora T1 puls II – powstaje w wyniku załączenia

Regulacja wartości skutecznej napięcia zasilania przy stałej częstotliwości 50Hz w silniku asynchronicznym powoduje zmianę amplitudy strumienia magnetycznego przy zachowaniu stałej prędkości jego wirowania. Gdy nie uwzględnia się odkształcenia napięcia zasilania można wówczas powiedzieć, że w tak sterowanym silniku wartość momentu krytycznego jest proporcjonalna do kwadratu napięcia zasilającego

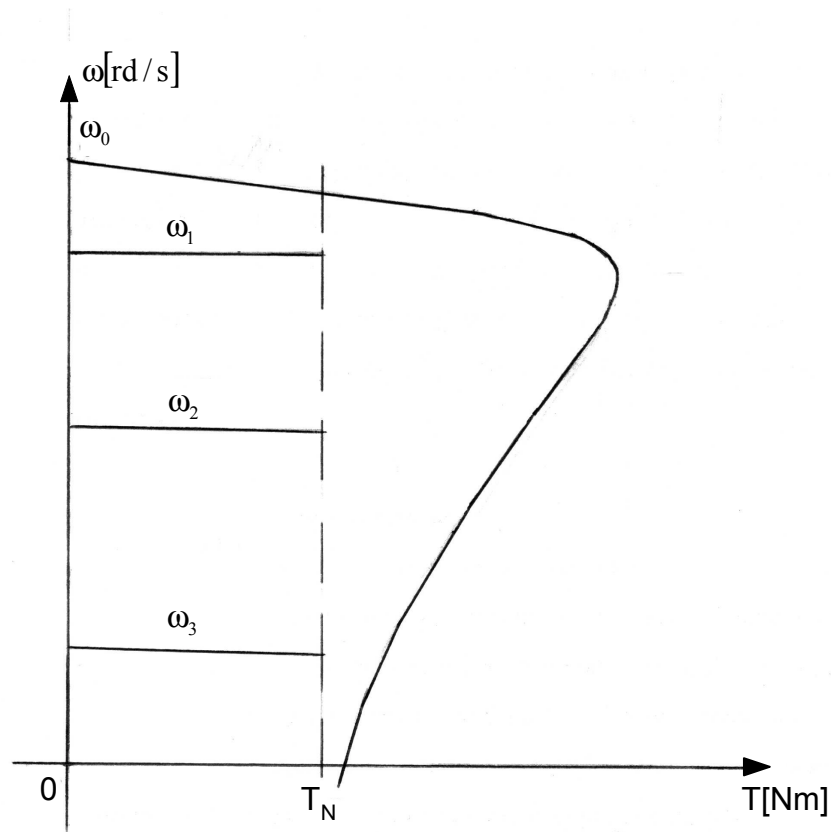
$$M'_K = M_K * \left(\frac{U_1}{U_N}\right)^2$$

- gdzie: M_K — wartość momentu krytycznego dla zasilania napięciem znamionowym
 M'_K — wartość momentu krytycznego dla skutecznej wartości pierwszej harmonicznej przy danym kącie wysterowania tyrystorów α_z
 U_N — znamionowa skuteczna wartość napięcia zasilania
 U_1 — skuteczna wartość pierwszej harmonicznej regulowanego napięcia

Oddziaływując na wartość skuteczną napięcia zasilania można otrzymać rodzinę charakterystyk mechanicznych silnika asynchronicznego jak na rys.3b.3. W zamkniętym układzie regulacji napięcia zasilającego przy wykorzystaniu sygnału sprzężenia prędkościowego można wymusić zmiany momentu silnika asynchronicznego na zadanym poziomie prędkości zadanej, których przebieg pokazano na rys.3b.4. W ten sposób sterowany silnik asynchroniczny ma możliwość otrzymania sztywnych i zarazem korzystnych charakterystyk napędowych. Jakkolwiek w niskim zakresie regulacji obrotów w celu lepszego dopasowania prądowego do rozwijanego momentu i rozpraszania energii poślizgu na zewnątrz silnika asynchronicznego zaleca się dołączenie niewielkiej oporności dodatkowej R_d do obwodu wirnika.



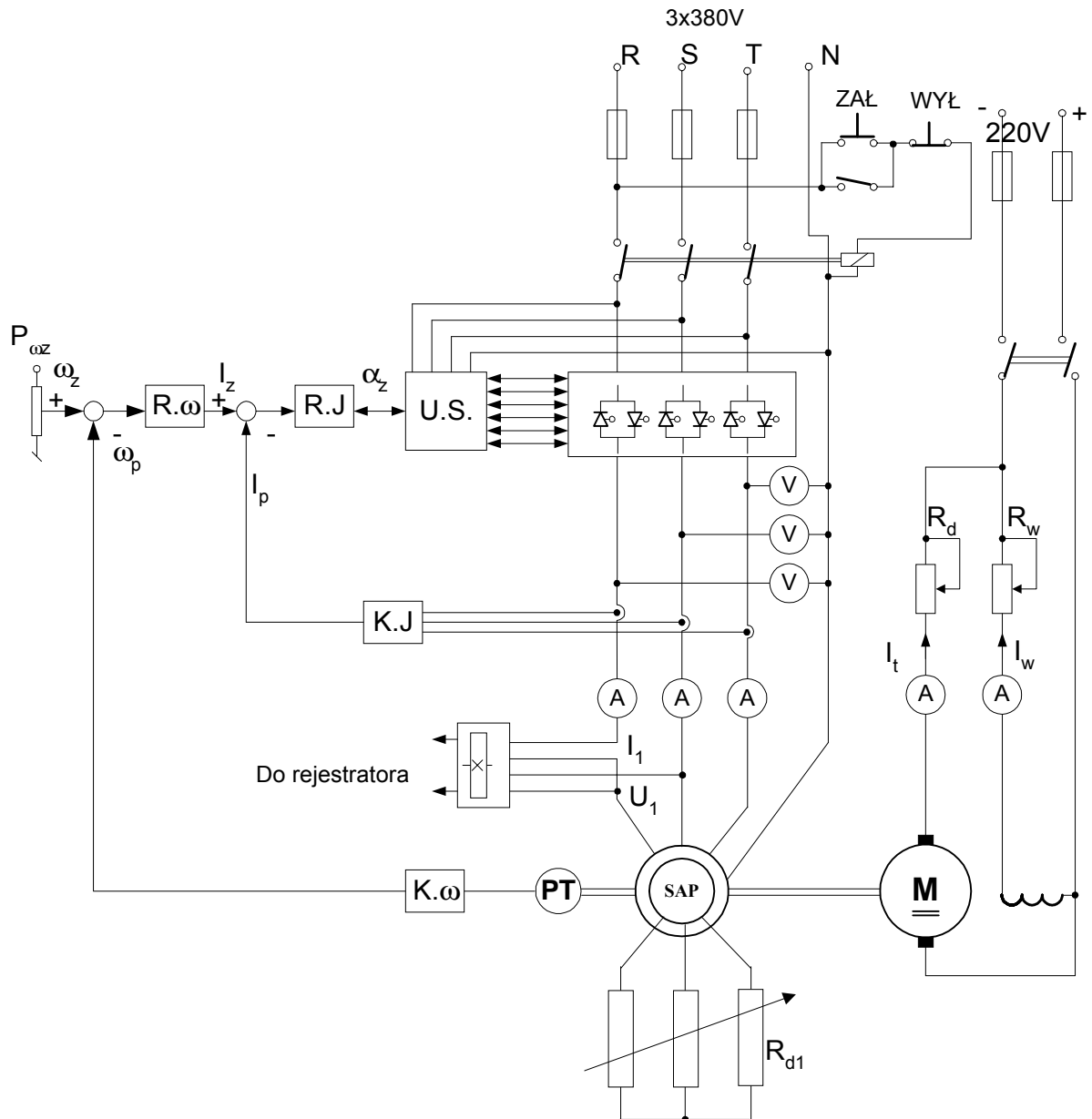
Rys.3b.3. Charakterystyki mechaniczne silnika synchronicznego przy regulacji skutecznej wartości napięcia zasilania i jej stabilizacji.



Rys.3b.4. Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego przy regulacji napięciowej z wykorzystaniem ujemnego sprzężenia prędkości zamkniętym układzie regulacji.

3b.2 Badania laboratoryjne

Badanie właściwości napędowych regulacji napięciowej silnika asynchronicznego przeprowadza się na tym samym stanowisku i zespole napędowym jak w p.3a.2. Obowiązują zatem te same wielkości związane z wyznaczeniem charakterystyk mechanicznych $\omega = f(T_b)$. Należy dokonać przełączenia układu zasilania zgodnie z rys.3b.5. Na tym rysunku w postaci blokowej przedstawiono strukturę regulatorów związanych ze sterowaniem 3-fazowego sterownika wartości skutecznej napięcia zasilającego. Podporządkowany regulator prądu R.I. w wyniku zastosowanego ujemnego sprzężenia zwrotnego prądu I_p wymusza w obwodzie stojana wartość zadaną prądu I_z . Nadrzędny regulator prędkości R. ω określa wartość zadaną prądu I_z wykorzystując sygnał ujemnego sprzężenia prędkościowego ω_p . W tak sterowanym silniku następuje dopasowanie momentu do bieżących zmian obciążenia na zadanym poziomie prędkości ω_z , których poglądowy przebieg zaprezentowano na rys.3b.4. W zakresie niewielkich obciążeń pojawia się strefa braku stabilizacji obrotów będąca efektem istnienia skończonej oporności R_d w obwodzie wirnika. Celem ćwiczenia jest wyznaczenie charakterystyk mechanicznych silnika $\omega = f(T_b)$ dla trzech zadanych poziomów prędkości ω_z . Wykorzystując rejestrator przebiegów należy dokonać interpretacji prądów i napięć w wybranych punktach układu sterowania.



4.3. Pytania kontrolne

- 1.a Właściwości regulacyjne silnika pierścieniowego ze zmienną opornością w obwodzie wirnika.
- 2.a Zasada modulacji oporności wirnika z pomocą elementów pracy dwustanowej.
- 3.a Charakterystyki mechaniczne $\omega=f(T_b)$ uzyskane w układzie modulatora rezystancji w obwodzie wirnika.
- 1.b Właściwości regulacyjne silnika pierścieniowego przy zmianie skutecznej wartości napięcia zasilającego i stałej częstotliwości $f=50\text{Hz}$.
- 2.b Zasada regulacji wartości skutecznej w tyrystorowym układzie odwrotnie równoległym.
- 3.b Charakterystyki mechaniczne $\omega=f(T_b)$ uzyskane w układzie regulatora wartości skutecznej napięcia zasilającego.

LITERATURA

- [1] Barlik R., Nowak M.: Technika tyrystorowa. WNT, W-wa.

- [2] Bitel H. I inni: Laboratorium Napędu Elektrycznego. PWN.
- [3] Tunia H., Kaźmierkowski M.: Automatyka napędu przekształtnikowego. PWN.