

PRACOWNIA ENERGOELEKTRONICZNA w ZST  
Radom – 2006/2007

## **ROZRUCH I REGULACJA PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA INDUKCYJNEGO PIERŚCIENIOWEGO**

**Przed wykonaniem ćwiczenia powinieneś znać odpowiedzi na 4 pierwsze pytania i polecenia. Po wykonaniu ćwiczenia powinieneś odpowiedzieć udzielając odpowiedzi na wszystkie poniższe pytania i polecenia:**

1. Objaśnij co oznaczają dla Ciebie określenia silników elektrycznych (odnoszące się do ich budowy oraz zasady działania): indukcyjny, pierścieniowy, klatkowy, synchroniczny, asynchroniczny, komutatorowy.
2. Narysuj schemat układu połączeń uzwojeń i opisz budowę silnika pierścieniowego. Jaką rolę spełniają pierścienie ślizgowe i szczotki w silniku badanym.
3. Narysuj schematy i objaśnij działanie tradycyjnego i badanego w ćwiczeniu rozrusznika silnika pierścieniowego.
4. Narysuj i objaśnij przebieg charakterystyk mechanicznych silnika pierścieniowego dla różnych wartości rezystancji rozrusznika.
5. Narysuj schemat i objaśnij działanie układu rozruchu i regulacji prędkości silnika badanego.
6. Jakie są role tranzystora IGBT, modulatora PWM i prostownika 3-fazowego w badanym układzie rozrusznika dla silnika pierścieniowego.
7. Jak i dlaczego tranzystor IGBT w badanym układzie służył do regulacji prędkości obrotowej silnika.
8. Co rozumiesz przez regulację prędkości obrotowej silnika pierścieniowego przy pomocy rezystora sterowanego pulsacyjnie?
9. Narysuj przewidywane przebiegi napięcia sterującego, prądu kolektora i napięcia kolektor-emiter tranzystora rozruchowego sterowanego impulsami prostokątnymi napięcia o współczynniku wypełnienia ok. 50%.

### 1. Rozruch silników indukcyjnych. Wiadomości ogólne

(Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy przypomnieć sobie budowę i zasadę działania silników indukcyjnych).

Rozruch silnika indukcyjnego przy bezpośrednim włączeniu do sieci charakteryzuje się niekorzystnymi parametrami, przede wszystkim zaś powstaje duże przetężenie prądowe

$\left(\frac{I_s}{I_{sN}} = 6 \dots 8\right)$  przy poślizgu  $s = 1$ . Wartość tego prądu płynie niekorzystnie na sieć

zasilającą. Drugim ważnym problemem jest stosunkowo niewielki moment rozruchowy  $M_l$  zwłaszcza dla silników klatkowych. Umożliwia on rozruch silnika nieobciążonego lub przy niewielkim obciążeniu momentem oporowym  $M_o$ . W zależności od rodzaju silnika indukcyjnego są stosowane różne sposoby rozruchu silników.

### 2. Regulacja prędkości kątowej silników indukcyjnych

Prędkość kątowa silnika indukcyjnego wyraża się wzorem (p:2)

$$\omega = \omega_s(1 - s) = \frac{2\pi f_1}{p} (1 - s). \quad (2)$$

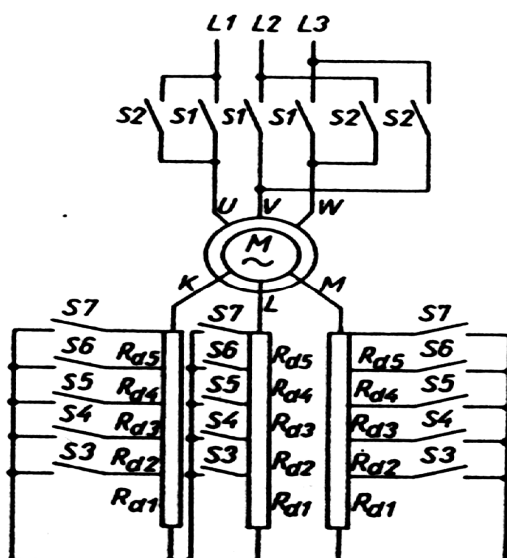
Wszystkie metody regulacji prędkości kątowej można sprowadzić do zmiany trzech parametrów:

- ♦ Zmiany poślizgu  $s$ ,
- ♦ Zmiany liczby par biegunów  $p$ ,
- ♦ Zmiany częstotliwości napięcia zasilania  $f_1$ .

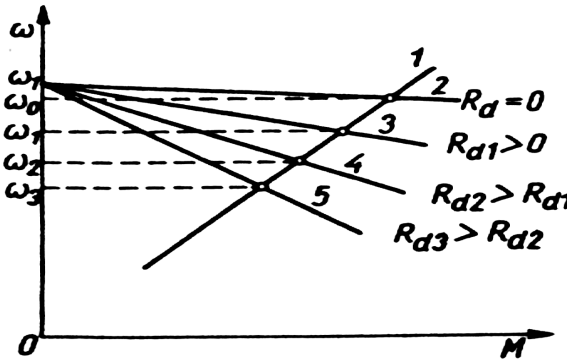
### 3. Rozruch i regulacja prędkości silnika pierścieniowego.

**A. Zmiana poślizgu.** Najprościej uzyskuje się ją przez zmianę rezystancji w obwodzie wirnika, jak na rys.1. Jest ona prosta w realizacji, ale wiąże się z dużymi stratami energii oraz z małą sztywnością charakterystyk mechanicznych (rys. 2). Prąd rozruchowy ogranicza się włączając w obwód każdej fazy wirnika identyczny rezystor  $R_d$  (rys. 1). Moment maksymalny silnika nie ulega przy tym zmniejszeniu. Należy pamiętać, że rozrusznik jest przeznaczony do pracy dorywczej, natomiast rezystor regulacyjny pracuje przy obciążeniu ciągłym, musi mieć więc znacznie większą moc a zatem i gabaryty.

Rezystor  $R_d$  składa się z kilku sekcji  $R_{d1} \dots R_{d5}$ , które w czasie rozruchu są zwierane stycznikami. Liczba sekcji rezystorów  $R_d$  zależy od rodzaju silnika i od wartości dopuszczalnego przeciążenia silnika podczas rozruchu.

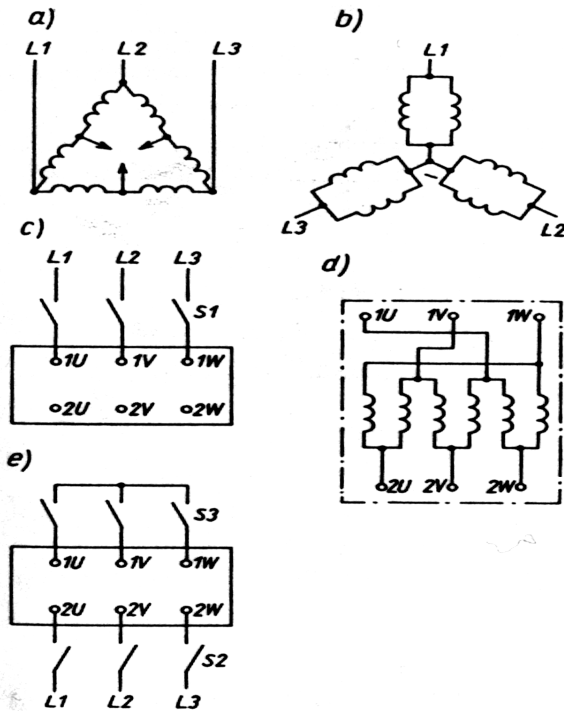


Rys. 1. Rozruch silnika pierścieniowego za pomocą rezystorów: S1 - stycznik dla pracy w prawo, S2 stycznik dla pracy w lewo, S3...S7- styczniki rozruchowe,  $R_{d1} \dots R_{d5}$  - sekcje rezystancji dodatkowej



**Rys. 2.** Regulacja prędkości kątowej przez zmianę rezystancji dodatkowej w obwodzie wirnika silnika pierścieniowego  
 1 - krzywa obciążenia maszyny roboczej,  $M_o = f(\omega)$ ,  
 2..5- moment silnika  $M_o$ , przy różnych wartościach  $R_d$ .

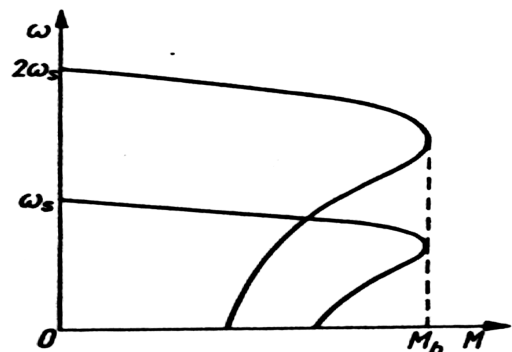
**. B. Regulacja prędkości przez zmianę liczby par biegunów** jest bardzo ekonomiczna tam, gdzie wymagana liczba stopni prędkości nie przekracza 2...4.[1]. Do takiej regulacji stosuje się silniki wielobiegunowe, których uzwojenie stojana musi być przełączalne na dwie liczby biegunów. Mogą też być dwa uzwojenia w stojanie, co umożliwi zwiększenie liczby stopni prędkości kątowej. Klatkowy wirnik nadaje się do każdej liczby par biegunów. Na rys.3[1] pokazano sposób podłączenia silnika dwubiegunowego (pracującego przy dwóch prędkościach znamionowych) do sieci.



**Rys. 3.** Schemat połączeń silnika 2-biegunowego: a) schemat podłączenia uzwojeń w trójkąt, b) schemat podłączenia uzwojeń w podwójną gwiazdę, c) połączenie silnika w trójkąt, e) podłączenie silnika w podwójną gwiazdę.

Charakterystyki mechaniczne silnika z przełączaną liczbą par biegunów przedstawiono na rys. 4. Znaczenie praktyczne tego sposobu regulacji jest niezbyt duże.

**C. Regulacja prędkości przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego** dzięki rozwojowi techniki przekształtnikowej jest ona powszechnie stosowana zwłaszcza dla silników indukcyjnych zwartych (klatkowych). Jest ona regulacją płynną w bardzo szerokim zakresie. Jest



**Rys. 4.** Regulacja prędkości kątowej silnika za pomocą zmiany liczby par biegunów

to regulacja ekonomiczna. Zmiana częstotliwości napięcia zasilania wywołuje zmianę momentu krytycznego  $M_b$  silnika (wraz ze zmianą częstotliwości zmienia się  $\omega$  oraz reaktancja stojana  $X_s = \omega L_s$ ). Aby utrzymać stałą wartość momentu krytycznego  $M_b$ , konieczna jest zmiana amplitudy napięcia zasilającego tak, aby został spełniony warunek  $U/f = \text{const}$  w przedziale częstotliwości od wartości znamionowej „w dół” ( $f < f_s$ ). Zapewnia to utrzymanie stałego strumienia w tym zakresie regulacji. Jedynie w zakresie małych częstotliwości należy zwiększyć napięcie, to znaczy pomnożyć wartość  $U/f$  przez współczynnik  $k_w$ , który wyznacza się z wykresu podanego dla danej maszyny [1]. Konieczność zwiększenia tego napięcia dla małych częstotliwości wynika stąd, że reaktancja silnika  $X_s$  maleje wraz z częstotliwością i wpływ rezystancji  $R$  uzwojeń uwydatnia się wyraźnie w stosunku do wpływu reaktancji  $X_s$ .

#### **D. Zmiana poślizgu a zatem i prędkości obrotowej silnika pierścieniowego przy pomocy rezystora sterowanego pulsacyjnie**

##### **Budowa, sposób działania układu.**

Przez włączone szeregowo do obwodu wirnika rezystory można w szerokich granicach zmieniać charakterystykę momentu obrotowego w zależności od prędkości obrotowej maszyn asynchronicznych z wirnikiem pierścieniowym. Duża wartość rezystancji w obwodzie wirnika, powoduje małą wartość prądu w uzwojeniach wirnika, przez co moment siły obracającej wirnik jest niewielki. Razem z charakterystyką momentu oporowego maszyny roboczej nastawia się prędkość obrotowa. Podczas biegu jałowego, tak jak przy sterowaniu napięcia stojana, zmiana prędkości obrotowej jest praktycznie niemożliwa. Stopniowo i w sposób ciągły zmieniane oporniki, włączone szeregowo z uzwojeniami wirnika, stosowane są często w do rozruchu silników pierścieniowych. Ich obecność ograniczenia pobór prądu po stronie sieci. Przy odpowiednich wymiarach dają się zastosować również w pracy ciągłej.

**Elektroniczny nastawnik rezystancji (rys.8)** daje technicznie lepszą możliwość bezstopniowej zmiany prędkości obrotowej

W uzwojeniach wirnika indukują się napięcie 3-fazowe, które jest prostowane przez niesterowany prostownik trójfazowy w układzie mostkowym. Wyprostowany prąd wirnika przepływa poprzez dławik wygładzający  $L_d$  i poprzez rezystancję obciążenia prostownika  $R$ . Elektroniczny łącznik tyrystorowy włączony jest równolegle i jest okresowo włączany, zwierając rezystor  $R$  i wyłączany.

Przez zmianę stosunku włączania :  $\alpha = t_c / T$ , zmienia się średnia wartość prądu wyprostowanego, co daje efekt zmian rezystancji w obwodzie wirnika wprost proporcjonalnie do wartości  $\alpha$ . Dzięki temu uzyskujemy efekt zmiany rezystancji obciążającej obwód wirnika:  $R^* = \alpha \cdot R$ . Przez zmianę współczynnika  $\alpha = t_c / T$  uzyskuje się płynną zmianę rezystancji: od zera (gdy tyrystor  $Ty1$  włączony) do wartości znamionowej  $R$  gdy tyrystor wyłączony (**pulsacyjnie sterowany opornik**).

Stała czasowa  $\tau = L_d / R$  obwodu obciążenia powinna być przy tym duża w stosunku do czasu trwania okresu pulsacji (taktowania)  $T$ .

Układ połączeń i charakterystyki momentu obrotowego w zależności od prędkości obrotowej napędu z rezystorem sterowanym pulsacyjnie za pośrednictwem tyrystorowego przerywacza prądu stałego, przedstawiono na rysunku 8.

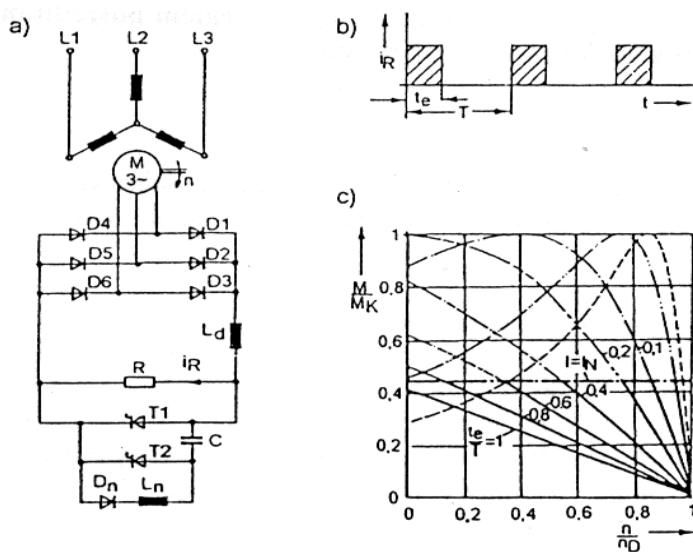
#### **Zamiast przerywacza tyrystorowego, mogą być stosowane prostsze układowo przerywacze tranzystorowe tak jak w ćwiczeniu.**

##### **Zalety układu :**

- energia poślizgu przetworzona zostaje przeważnie w zewnętrznym rezystorze,
- potrzebne jest tylko nieznaczne przewymiarowanie silnika,
- niedrogi układ napędowy,
- można pominąć wyższe harmoniczne momentu przy wysokiej częstotliwości pulsacji,
- współczynnik mocy tylko nieznacznie mniejszy niż przy normalnej pracy .

##### **Wady:**

- niski współczynnik sprawności przy sterowaniu częściowym ~ energia poślizgu jest energią straconą,
- spadek napięcia w prostowniku nie pozwoli na całkowite osiągnięcie „naturalnej” charakterystyki  $M = f(n)$ ...



Rys.8. Układ silnika z pulsacyjnie zwierzanym rezystorem w obwodzie wirnika silnika pierścieniowego: a) układ połączeń, b) Wyidealizowany przebieg czasowy prądu obciążenia prostownika, c) rodzina charakterystyk mechanicznych silnika.

Przykłady zastosowania :

- napędy o małej mocy
- napędy z krótkotrwałym obniżeniem prędkości obrotowej

### Bibliografia:

1. S.Januszewski, A. Pytlak, M.R.-Nowaczyk, H. Świątek-Napęd elektryczny, WSiP 1994.
2. S.Januszewski, A. Pytlak, M.R.-Nowaczyk, H. Świątek-Urządzenia energoelektroniczne, WSiP, W-wa 1995.

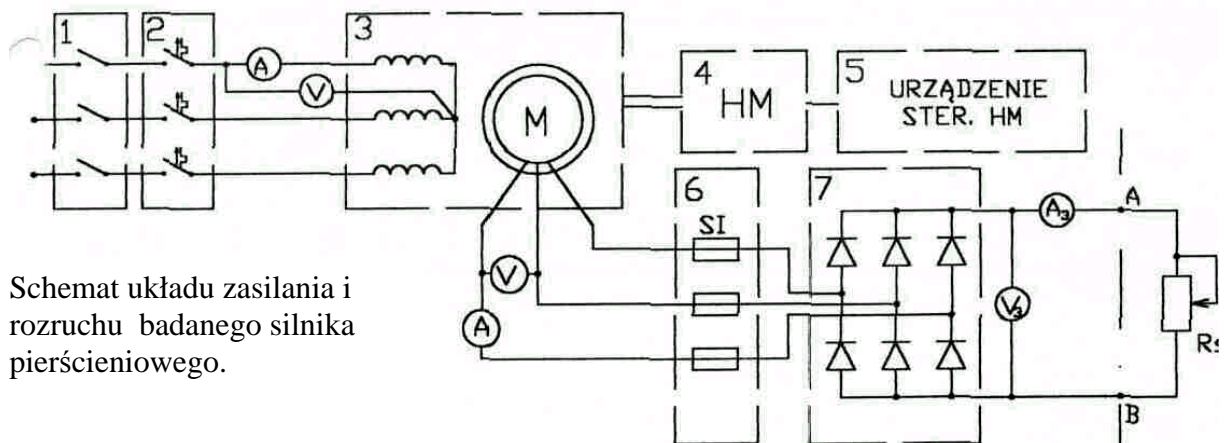
**ROZRUCH I REGULACJA PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ SILNIKA PIERŚCIENIOWEGO****Cel ćwiczenia**

Celem ćwiczenia jest głębsze zrozumienie i praktyczne zapoznanie się z rozruchem i regulacją prędkości kątownej silnika asynchronicznego pierścieniowego poprzez zmianę rezystancji w obwodzie wirnika tego silnika i z pulsacyjnie sterowanym rezystorem.

**. Przebieg ćwiczenia.****I. Rozruch i regulacja prędkości silnika pierścieniowego z nastawianą rezystancją w obwodzie wirnika.**

- Przygotowanie układu napędowego do badań:

1. Wyłącznik 3F
2. Zabezpieczenie B6;S191x3
3. Silnik pierścieniowy 0,33 kW
4. Hamownica magnetyczna
5. Urządzenie sterujące hamownicę magnetyczną
6. Zabezpieczenie DO-2 10AGR
7. Prostownik 6-pulsowy 10A



Schemat układu zasilania i rozruchu badanego silnika pierścieniowego.

- Dobór aparatury kontrolno-pomiarowej na podstawie danych znamionowych silnika. Odczytaj z tabliczki i zanotuj dane znamionowe badanego silnika.

**I. Rozruch silnika i pomiar prądu rozruchowego.**

Wykonaj pomiar zanotuj wartości napięć i prądów w układzie jw. dla 2 wartości rezystora rozruchowego, wyniki zanotuj w tabeli.

$U_1$  napięcie fazowe stojana  $I_1$  prąd fazowy stojana,  $U_2$  napięcie przewodowe wirnika

$I_2$  prąd fazowy wirnika,  $U_3$  napięcie stałe wirnika,  $I_3$  prąd stały wirnika

	$I_1$ [A]	$U_1$ [V]	$I_2$ [A]	$U_2$ [V]	$I_3$ [A]	$U_3$ [V]
$R_{S1} =$						
$R_{S2} =$						

**II. Regulacja prędkości przez zmianę rezystancji w obwodzie wirnika, wyznaczanie charakterystyki  $n(R_S)$ .**

Regulując wartość rezystora  $R_S$  zbadaj zależność  $n(R_S)$ .

I[A]							
U[V]							
$R_S[\Omega]=U/I$							
$n[\text{obr}/\text{min}]$							



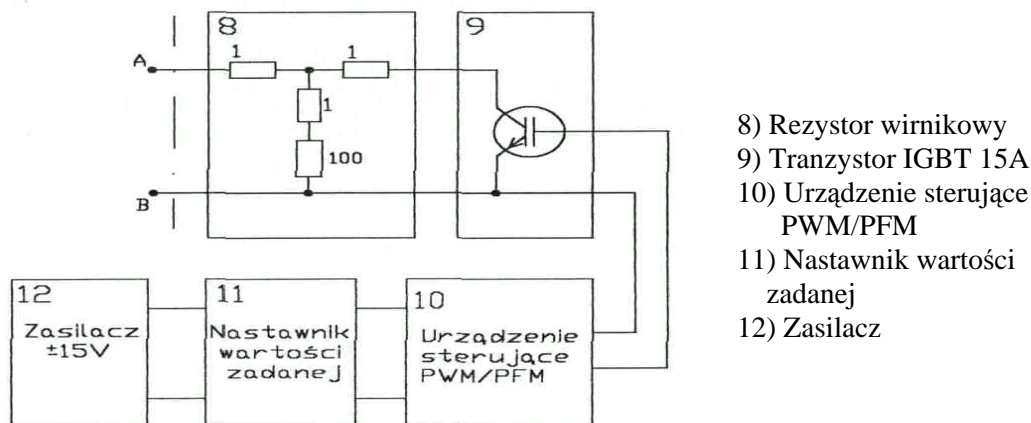
**III. Rozruch i regulacja prędkości silnika pierścieniowego z pulsacyjnie sterowanym rezystorem w obwodzie wirnika.**

Wyznaczanie charakterystyk  $R_0 = f(t_H/T)$ ,  $n = f(t_H/T)$

Po dołączeniu układu jak niżej do zacisków AB, zbadaj zależność prądu, napięcia i rezystancji  $R_0$  od czasu trwania impulsów sterujących pracą tranzystora IGBT.

Wyniki zanotuj w tabeli.

Wykreśl uzyskane charakterystyki  $R_0 = f(t_H/T)$ ,  $n = f(t_H/T)$ , uzasadnij uzyskane wyniki.



$t_H[\text{ms}]$							
$t_H/T$							
I[A]							
U[V]							
$R_0[\Omega]=U/I$							
$n[\text{obr}/\text{min}]$							

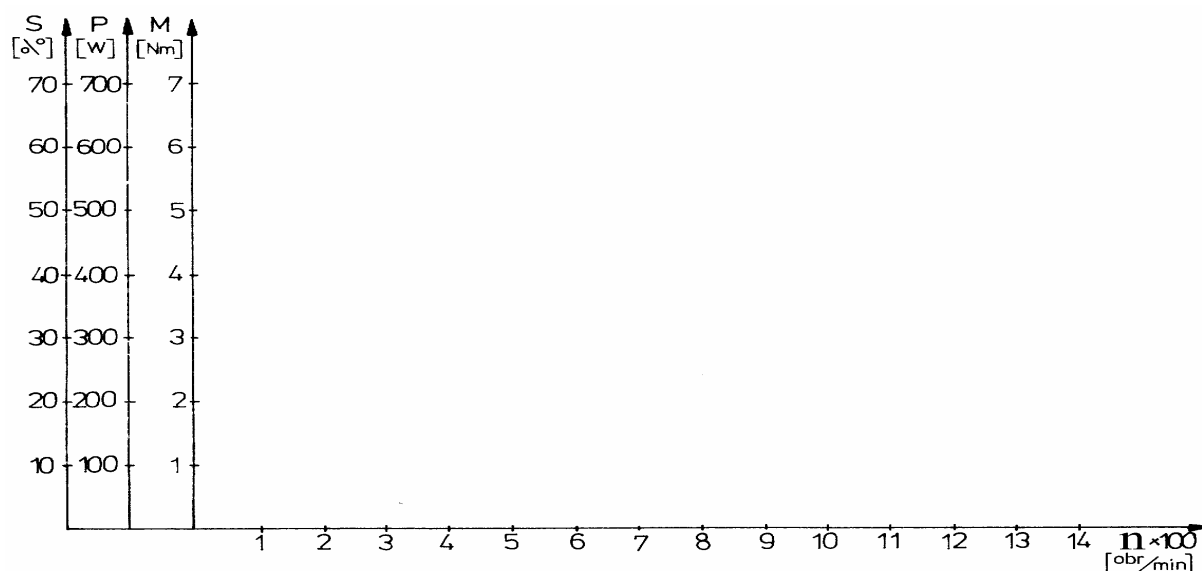
#### IV. Obserwacja przebiegów prądów i napięć w układzie.

Zanotuj w porządku chronologicznym oscylogramy napięcia sterującego pracą tranzystora, napięcia CE, prądu wyprostowanego, prądu kolektora. Podaj logiczne uzasadnienie uzyskanych przebiegów.

#### - V. Wyznaczanie charakterystyk mechanicznych silnika pierścieniowego

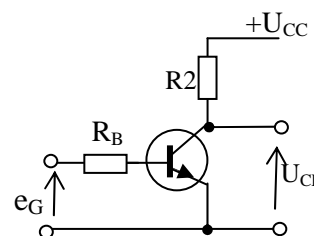
$$M = f(n), P = f(n), s = f(n).$$

Zanotuj podane wyżej charakterystyki używając hamownicy współpracującej z komputerem. Zbadaj wpływ rezystora wirnika na przebieg charakterystyk silnika.



#### Pytania sprawdzające.

1. Podaj uzasadnienie nazwy „silnik indukcyjny”.
2. Jak powstaje moment obrotowy silników indukcyjnych?
3. Jaką rolę spełniają pierścienie w silniku badanym?
4. Co oznacza skrót IGBT?
5. Podaj definicje poślizgu i momentu napędowego silnika.
6. Wymień i scharakteryzuj sposoby rozruchu i regulacji obrotów silnika pierścieniowego.
7. Dla układu jak na rys. B4 określ przybliżone wartości amplitud  $i_B$ ,  $i_C$ ,  $u_{CE}$ , narysuj ich przebiegi czasowe wiedząc, że prostokątne napięcie sterujące  $e_G$  o amplitudzie 10V dodatnimi impulsami wprowadza tranzystor w nasycenie.  $U_{CC} = 24V$ ,  $R_1 = 1k\Omega$ ;  $R_2 = 100\Omega$ . Jaka minimalną wartością współczynnika  $h_{21E}$  powinien charakteryzować się tranzystor?



Rys. B4.