

## Ćwiczenie 8

# Układy rozruchowe silników indukcyjnych pierścieniowych

## 8.1. Program ćwiczenia

1. Wyznaczenie charakterystyk prądu rozruchowego silnika dla przypadków:
  - a) zastosowania rozrusznika rezystorowego wielostopniowego sterowanego w funkcji czasu dla różnych nastaw parametrów sterowania oraz wartości momentu bezwładności układu napędowego,
  - b) zastosowania rozrusznika rezystorowego wielostopniowego sterowanego w funkcji prądu dla różnych nastaw parametrów sterowania oraz wartości momentu bezwładności układu napędowego,
  - c) zastosowania rozrusznika wiropędowego dla różnych wartości momentów bezwładności układu napędowego.
2. Analiza porównawcza metod rozruchu jak w punkcie 1. na podstawie kryteriów poprawności rozruchu.

## 8.2. Wiadomości teoretyczne

Silniki indukcyjne pierścieniowe, ze względu na właściwości eksploatacyjne, są stosowane w technice napędowej przede wszystkim do maszyn roboczych o ciągłym charakterze pracy, wymagających dużego momentu rozruchowego oraz narażonych na udarowe przeciążenia momentem oporowym. Przykładem takich maszyn roboczych może być przenośnik taśmowy pracujący w ciągu technologicznym przemysłu wydobywczego.

Oprócz cech wyróżniających silniki pierścieniowe, ich stosowanie determinowane jest także parametrami sieci zasilającej, zwłaszcza w przypadku silników średniej

i dużej mocy. Wartości prądów występujących przy rozruchach silników pierścieniowych, dla porównywalnych mocy znamionowych, są mniejsze od analogicznych prądów silników klatkowych.

Rozruchu silników indukcyjnych pierścieniowych dokonuje się przy użyciu rozrusznika włączonego w obwód wirnika. Zadaniem rozrusznika jest ograniczenie wartości prądu rozruchowego silnika oraz odpowiednie ukształtowanie charakterystyki momentu obrotowego w czasie rozruchu, stosownie do wymagań stawianych przez maszynę roboczą i sieć zasilającą.

Znanych jest wiele rodzajów rozruszników różniących się budową, zasadą działania oraz właściwościami [1], [3]. Do najczęściej stosowanych w przemyśle należą rozruszniki rezystorowe wielostopniowe. Zmiana rezystancji rozrusznika od wartości maksymalnej do zera odbywa się przez zwieranie odpowiednich sekcji rezystorowych za pomocą nastawnika regulowanego ręcznie lub przy użyciu aparatury łączeniowej sterowanej automatycznie. W rozrusznikach ze sterowaniem automatycznym wyposażenie stanowi aparatura stykowa (styczniki, przekaźniki), choć w ostatnich latach rolę wielu przekaźników przejmują mikroprocesorowe sterowniki programowalne, w miejsce styczników instaluje się natomiast łączniki tyrystorowe. Zbudowany w ten sposób rozrusznik zmienia wartość rezystancji w procesie rozruchu w zależności od czasu, prądu silnika, rzadziej od prędkości obrotowej układu napędowego.

Poprawne opracowanie programu czasowego do sterowania rozruchem w funkcji czasu wymaga znajomości charakterystyki mechanicznej maszyny roboczej oraz powtarzalności warunków rozruchu podczas kolejnych uruchomień. Jeżeli rzeczywisty moment obciążenia lub moment bezwładności układu napędowego są mniejsze od wartości przyjętych do obliczeń, to możliwość skrócenia czasu rozruchu, wynikająca z wystąpienia większego przyspieszenia układu, nie jest wykorzystana. W przeciwnym razie, gdy rzeczywisty moment obciążenia lub moment bezwładności są większe od obliczeniowych, maksymalne wartości prądu i momentu silnika, występujące podczas zwierania kolejnych sekcji rozrusznika, mogą przekroczyć dopuszczalne wartości.

Wad tych pozbawiony jest rozruch z zastosowaniem rozrusznika sterowanego w funkcji prądu silnika lub prędkości obrotowej. Czas rozruchu na poszczególnych stopniach ustali się wówczas samoczynnie, stosownie do występującego stopnia obciążenia silnika momentem oporowym oraz wartości momentu bezwładności. Czas ten można uznać wówczas za optymalny dla określonych warunków rozruchu.

Problemu optymalizacji rozruchu nie rozpatruje się w przypadku stosowania rozruszników regulowanych ręcznie. Mają one około dwukrotnie większą liczbę stopni rozruchowych w porównaniu do rozruszników sterowanych automatycznie. Do dyspozycji operatora jest także często amperomierz mierzący prąd w obwodzie stojana silnika, dający informację o przebiegu rozruchu.

Wadą rozruszników rezystorowych wielostopniowych jest skokowy charakter zmian prądu i momentu obrotowego silnika w czasie rozruchu, powstający w wyniku zwierania kolejnych sekcji rezystorów rozrusznika. Udarowy przebieg momentu

wpływa niekorzystnie na trwałość urządzeń pędnych, np. przekładni zębatych. Wad tych pozbawione są rozruszniki o samoczynnej, bezstopniowej zmianie rezystancji. Do nich należą rozruszniki cieczowe (wodne), rozruszniki z modulacją rezystancji oraz rodzina rozruszników indukcyjnych, w tym wiropędowe.

Rozruszniki cieczowe znalazły zastosowanie w przemysłowych układach napędowych o rozruchach ciężkich i małych wartościach dopuszczalnych przyśpieszeń. Ich zaletą jest duża pojemność cieplna, co ma znaczenie w przypadku zagrożenia pożarowego (np. dla węglowych młynów kulowych w elektrowniach i elektrociepłowniach).

Wpływ rozrusznika rezystorowego w obwodzie wirnika trójfazowego silnika indukcyjnego pierścieniowego na charakterystyki prądu stojana  $I_s$  i momentu obrotowego  $M_e$  w funkcji poślizgu (statyczne charakterystyki rozruchowe) wynika z zależności:

$$I_s = \frac{U_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r + R'_{rd}}{s}\right)^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2}}, \quad (8.1)$$

$$M_e = \frac{3U_s^2 (R'_r + R'_{rd}) \frac{1}{s}}{\omega_0 \left[ \left(R_s + \frac{R'_r + R'_{rd}}{s}\right)^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2 \right]}, \quad (8.2)$$

w których:

$U_s$  – napięcie fazowe stojana,

$R_s$  – rezystancja uzwojenia stojana,

$R'_r$  – rezystancja uzwojenia wirnika sprowadzona na stronę stojana,

$R'_{rd}$  – rezystancja rozrusznika sprowadzona na stronę stojana,

$X_{\sigma s}$  – reaktancja rozproszenia stojana,

$X'_{\sigma r}$  – reaktancja rozproszenia wirnika sprowadzona na stronę stojana,

$s$  – poślizg silnika,

$\omega_0$  – prędkość synchroniczna silnika.

Wzory (8.1) i (8.2) zawierają uproszczenie, polegające na pominięciu w elektrycznym schemacie zastępczym silnika parametrów gałęzi magnesowania odpowiadającej stratom w żelazie.

Wzór (8.1) wskazuje, że rezystancja  $R_{rd}$  rozrusznika powoduje zmniejszenie wartości prądu rozruchowego. Wykres zależności  $I_s = f(s)$  zachowuje charakter monotonicznie malejący z wartością maksymalną dla  $s = 1$ . Inny wpływ wywiera rezystancja  $R_{rd}$  na kształt charakterystyki mechanicznej  $M_e = f(s)$  silnika (8.2). Powoduje bowiem wzrost nachylenia części prostoliniowej charakterystyki przy niezmienniej wartości momentu maksymalnego. Jeśli przyjąć dla uproszczenia  $R_s = 0$ , poślizg krytyczny wyraża się zależnością

$$s_k = \frac{R'_r + R'_{rd}}{X'_{\sigma s} + X'_{\sigma r}}. \quad (8.3)$$

Oznacza to, że dla  $R'_{rd} = (X'_{\sigma s} + X'_{\sigma r}) - R'_r$ , początkowy (przy  $s = 1$ ) moment rozruchowy silnika jest równy momentowi maksymalnemu. Przez odpowiedni dobór wartości rezystancji  $R'_{rd}$  istnieje możliwość kształtowania charakterystyk rozruchowych silnika.

Rozrusznik rezystorowy projektuje się tak, by wartość poślizgu krytycznego dla pierwszego stopnia rozruchowego wynosiła  $s_k > 1$ , co oznacza, że przy  $s = 1$  silnik pracuje w punkcie znajdującym się na prostoliniowej, statecznej części charakterystyki mechanicznej. Wybór ten jest celowy. Duża wartość rezystancji w obwodzie wirnika powoduje, że impedancja obwodu wirnika przyjmuje charakter rezystancyjny o współczynniku mocy  $\cos \varphi \approx 1$ . Jest to przypadek korzystny dla procesu rozruchu, gdyż współczynnik dobroci rozruchu  $D \approx 1$ , gdzie:

$$D = \frac{\frac{M_r}{I_r}}{\frac{M_N}{I_N}}, \quad (8.4)$$

przy czym:

$M_r, I_r$  – odpowiednio wartość momentu obrotowego i prądu silnika dla  $s = 1$ ,

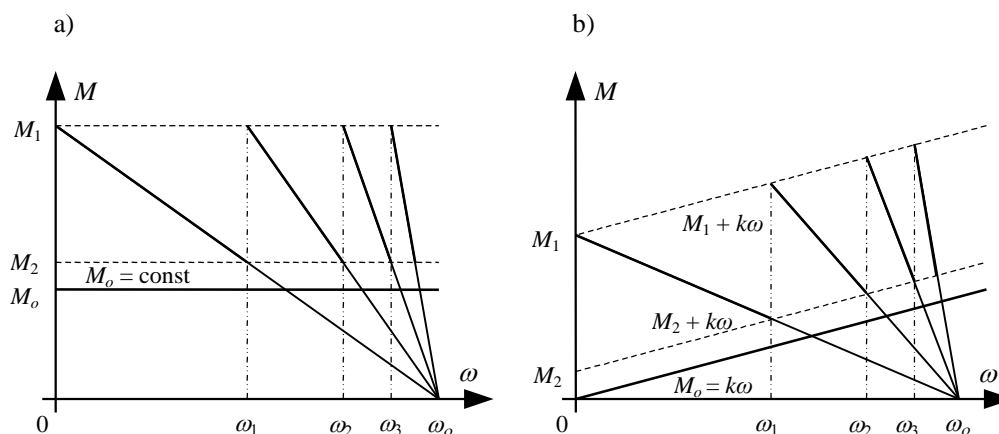
$M_N, I_N$  – odpowiednio znamionowe wartości momentu i prądu.

Dla typowych silników indukcyjnych klatkowych współczynnik dobroci rozruchu  $D \approx 0,2$ .

Proporcjonalność pomiędzy względną wartością momentu i prądu rozruchowego dla prostoliniowej części charakterystyki mechanicznej silnika pierścieniowego z rozrusznikiem rezystorowym wykorzystuje się do obliczania rozruszników. Zmienność momentu obrotowego silnika podczas rozruchu wielostopniowego z rozrusznikiem rezystorowym i z pominięciem elektromagnetycznych i elektromechanicznych procesów przejściowych, przedstawiono na rysunku 8.1. Przebiegi te w przybliżeniu odpowiadają zmienności prądu rozruchowego silnika.

Moment obrotowy silnika zmienia się od wartości maksymalnej  $M_1$  do wartości momentu przełączenia  $M_2$ , większego od momentu obciążenia  $M_o$  podczas rozruchu. Ze względu na zależność momentu silnika od kwadratu napięcia sieci zasilającej, zazwyczaj przyjmuje się  $M_1 \leq 0,85 M_k$ , gdzie  $M_k$  – moment krytyczny silnika. O wyborze wartości  $M_1$  decydują ponadto: rodzaj rozruchu (lekki, średni, ciężki), dopuszczalna wartość współczynnika nierównomierności rozruchu  $\varepsilon = M_1/M_2$ , dopuszczalne przyśpieszenie chwilowe układu oraz wymagania sieci zasilającej ze względu na dopuszczalną wartość prądu. Wartość momentu  $M_2$  przyjmuje się na poziomie  $M_2 \geq 1,1 \div 1,2 M_o$ , co oznacza, że przełączenie na kolejny stopień rozruchowy następuje przed osiągnięciem przez układ napędowy stanu ustalonego na stopniu poprzednim.

Zazwyczaj dąży się do zapewnienia stałej wartości średniej momentu dynamicznego, czego skutkiem jest stała wartość średnia przyspieszenia układu. Oznacza to, że przyjmowanie  $M_1 = \text{const}$ ,  $M_2 = \text{const}$  dla wszystkich stopni rozruchowych jest słuszne jedynie wówczas, gdy moment oporowy maszyny roboczej  $M_o = \text{const}$  (rys. 8.1a). W innych przypadkach wartości momentów  $M_1$  i  $M_2$  dla poszczególnych stopni należy dobierać stosownie do charakterystyki mechanicznej maszyny roboczej  $M_o = f(\omega)$  (rys. 8.1b).



Rys. 8.1. Wykres charakterystyki rozruchowej  $M = f(\omega)$  silnika indukcyjnego pierścieniowego z rozrusznikiem rezystorowym trzystopniowym: a) dla maszyny roboczej o charakterystyce  $M_o = \text{const}$ , b) dla maszyny roboczej o charakterystyce  $M_o = k\omega$

Z wartością współczynnika nierównomierności rozruchu  $\varepsilon$  wiąże się zagadnienie liczby stopni rozruchowych  $m$ . Dla przypadku  $M_o = \text{const}$ , liczbę tę wyznacza się z zależności

$$m \geq \frac{\log \frac{R_r + R_{rd}}{R_r}}{\log \varepsilon} = \text{liczba całkowita}, \quad (8.5)$$

w której:

$R_r$  – rezystancja uzwojenia wirnika,  $\Omega/\text{fazę}$ ,

$R_{rd}$  – początkowa rezystancja rozrusznika (przy  $s = 1$ ),  $\Omega/\text{fazę}$ .

W celu uzyskania wartości  $m$  równej liczbie całkowitej, koryguje się wartość współczynnika  $\varepsilon$ , ściślej wartość momentu maksymalnego  $M_1$ . Moment przełączenia  $M_2$  jest bowiem określony wartością momentu obciążenia  $M_o$ . Pierwotny wybór wartości  $M_1$  na etapie obliczeń wstępnych następuje zgodnie z zaleceniami projektowymi [1], uwzględniającymi moc silnika, wymaganą płynność rozruchu oraz dopuszczalne przyspieszenia maszyny roboczej. Płynność rozruchu jest tym większa, im

mniejsza jest wartość współczynnika  $\varepsilon$ , czyli większa liczba stopni rozruchowych  $m$ . Wraz ze wzrostem liczby  $m$  rośnie koszt rozrusznika, szczególnie z powodu większej ilości aparatury układu sterowania. Dla przykładu, w układach napędowych pomp wirnikowych z silnikami średniej mocy, nie wyposażonych w przekładnię zębatą, liczba stopni rozruchowych wynosi  $m \leq 4$ .

Rozruch z zastosowaniem rozrusznika ze sterowaniem w funkcji czasu wymaga znajomości czasów pracy dla kolejnych stopni rozruchowych. W przypadku  $M_o = \text{const}$  czas rozruchu dla  $i$ -tego stopnia określa zależność (oznaczenia jak na rysunku 8.1a)

$$t_i = J \frac{\omega_o - \omega_{i-1}}{M_1} \ln \frac{(M_1 - M_o)(\omega_o - \omega_{i-1})}{M_1(\omega_o - \omega_i) - M_o(\omega_o - \omega_{i-1})}, \quad (8.6)$$

gdzie  $J$  – zastępczy moment bezwładności układu (założono, że  $J = f(\omega) = \text{const}$ ).

Dla maszyny roboczej o charakterystyce mechanicznej  $M_o = k\omega$ , analogiczny czas rozruchu oblicza się ze wzoru (oznaczenia jak na rys. 8.1b)

$$t_i = J \frac{\omega_o - \omega_{i-1}}{M_1 + k\omega_o} \ln \frac{M_1(\omega_o - \omega_{i-1})}{M_1(\omega_o - \omega_i) - k\omega_o(\omega_i - \omega_{i-1})}. \quad (8.7)$$

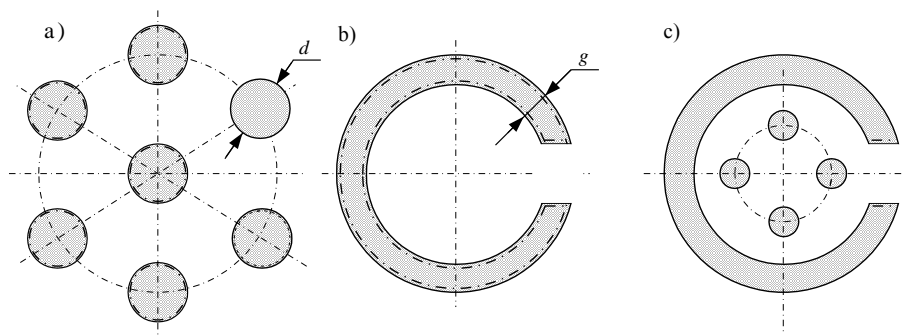
Przy sterowaniu rozruchem w funkcji prądu, wartość prądu przełączenia, odpowiadającego momentowi  $M_2$ , wyznacza się analitycznie lub odczytuje z wykresu charakterystyk rozruchowych. W warunkach przemysłowych zarówno czasy  $t_i$ , jak i prądy przełączenia koryguje się przez pomiary eksploatacyjne, podobnie jak w przedstawionym ćwiczeniu laboratoryjnym.

Do rozruszników o bezstopniowej i samoczynnej zmianie impedancji w czasie rozruchu silnika należą rozruszniki wiropądowe. Ich prezentacja w laboratorium dydaktycznym jest wynikiem opracowania w Instytucie prototypów rozruszników oraz prowadzenia dalszych prac badawczych i projektowych.

Zasada działania rozruszników wiropądowych jest oparta na zjawisku powstawania strat mocy od prądów wirowych w ferromagnetyku przewodzącym o strukturze litej, umieszczonym w przemiennym polu magnetycznym. Rozrusznik ten swoją budową przypomina dławik trójfazowy, którego kolumny rdzenia są wykonane z odpowiednich elementów stalowych (rys. 8.2).

Uzwojenia fazowe rozruszników, wykonane z przewodu miedzianego lub aluminiowego, są umieszczone na kolumnach i połączone w gwiazdę. Początki uzwojeń fazowych podłącza się do obwodu wirnika silnika. Prąd rozruchowy wirnika przepływający przez trójfazowe uzwojenie rozrusznika wytwarza w kolumnach rdzenia przemienny strumień magnetyczny. Strumień ten indukuje siłę elektromotoryczną w stalowych elementach rdzenia, pod wpływem której płyną prądy wirowe. Na skutek zjawiska wypierania prądu rozkład gęstości prądów wirowych w przekroju elementów jest nierównomierny, przy czym największa nierównomierność występuje na początku rozruchu (przy  $s = 1$ ). W miarę zwiększania się prędkości kątowej silnika maleje czę-

stotliwość prądu wirnika, w wyniku czego gęstość prądów wirowych w elementach stalowych rdzenia staje się bardziej równomierna. Powstające straty mocy czynnej i biernej, spowodowane przepływem prądów wirowych, zmieniają się samoczynnie i płynnie w zależności od poślizgu silnika. Straty mocy, a tym samym zastępcza impedancja rdzenia sprowadzona na stronę uzwojenia rozrusznika, mają wartość największą przy poślizgu silnika  $s = 1$ . Zmniejszają się one do wartości minimalnej w końcowej fazie rozruchu. Impedancję rozrusznika stanowi wówczas praktycznie rezystancja i reaktancja uzwojeń fazowych. Po dokonaniu rozruchu rozrusznik zwiiera się za pomocą stycznika, powodując przejście silnika do pracy na charakterystyce naturalnej. Reaktancja i rezystancja uzwojeń fazowych stanowi zaledwie kilka procent wartości rezystancji i reaktancji rdzenia przy  $s = 1$ .

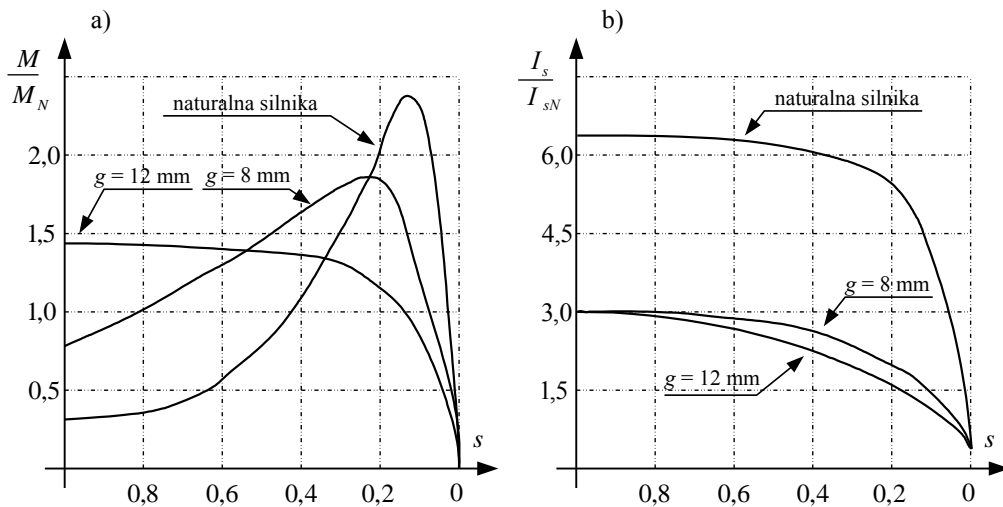


Rys. 8.2. Przekroje poprzeczne kolumny rdzenia rozrusznika wiroprądowego z rdzeniem trójfazowym:  
a) wiązka prętów, b) rura z osiową szczeliną powietrzną, c) rdzeń kombinowany

Podstawowym parametrem konstrukcyjnym rozrusznika wiroprądowego stosowanym do kształtowania charakterystyk rozruchowych silnika jest grubość elementów rdzenia kolumny (grubość ścianki rury  $g$  – rys. 8.2b lub średnica pręta  $d$  – rys. 8.2a). Dla natężenia pola magnetycznego w kolumnie przy  $s = 1$  wynoszącym  $H_p \approx 40 \cdot 10^3$  A/m, elementy wykonane ze stali zwykłej jakości (R35 – dla rur, St3 – dla prętów) mają wymiary:  $g \leq 12$  mm,  $d \leq 20$  mm. Stosowanie elementów o większych grubościach jest uzasadnione w razie potrzeby zwiększenia pojemności cieplnej rozrusznika. Dla przykładu na rysunku 8.3 przedstawiono przybliżone charakterystyki momentów i prądów rozruchowych silnika SZUre136 o mocy 630 kW z rozrusznikami o kolumnach rurowych, różniącymi się grubościami ścianek  $g$ .

Do zalet rozruszników wiroprądowych należą:

- płynna, samoczynna zmiana impedancji rozrusznika w funkcji poślizgu silnika, powodująca bezstopniowe przebiegi momentu i prądu rozruchowego silnika,
- samoczynne dostosowanie czasu rozruchu układu napędowego do stopnia obciążenia silnika,
- prosta budowa, małe wymiary, niski koszt wytworzenia, duża niezawodność pracy.



Rys. 8.3. Charakterystyki rozruchowe silnika SZUre136 o mocy 630 kW z rozrusznikami wiroprądowymi rurowymi różniącymi się grubościami ścianek  $g$ : a) momentu rozruchowego, b) prądu rozruchowego

Do ujemnych cech zalicza się:

- rezystancyjno-reaktancyjny charakter impedancji, co w porównaniu z rozrusznikami rezystorowymi powoduje zmniejszenie wartości współczynnika dobroci rozruchu (do wartości  $D = 0,6 \div 0,8$ ),
- złożony proces projektowania rozruszników z uwagi na uwikłane zależności rezystancji i reaktancji rdzenia od wartości częstotliwości i prądu wirnika [1], [2],
- potrzeba indywidualnego projektowania rozrusznika do układu napędowego.

## 8.3. Instrukcja

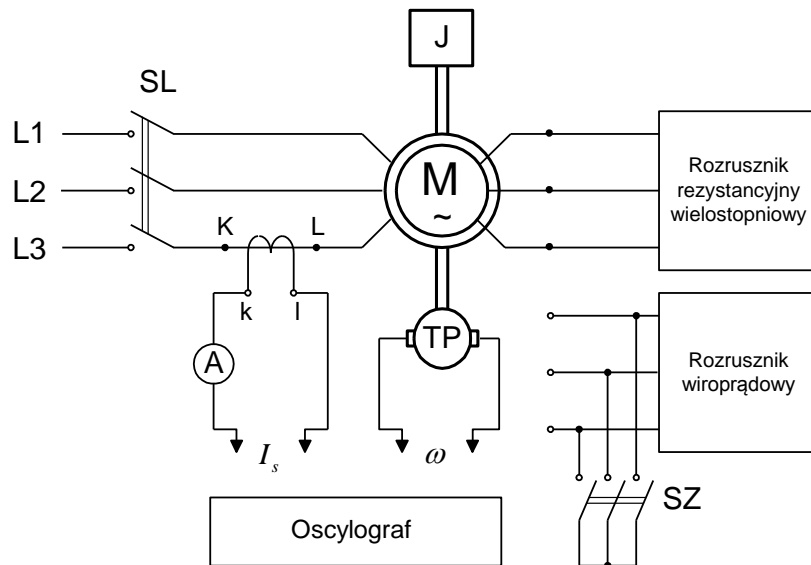
### 8.3.1. Opis stanowiska pomiarowego

Schemat układu pomiarowego stanowiska przedstawiono na rysunku 8.4.

Silnik indukcyjny pierścieniowy jest sprzęgnięty z urządzeniem stanowiącym zespół wymiennych mas wirujących (tarcz stalowych), nie wytwarzającym statycznego momentu oporowego (straty mechaniczne pomija się). Zmiana wartości momentu bezwładności  $J$  mas wirujących ma zatem wpływ na czas trwania rozruchu zespołu napędowego przy określonym momencie rozruchowym silnika. Do obwodu wirnika silnika można alternatywnie podłączyć rozrusznik rezystorowy wielostopniowy lub rozrusznik wiroprądowy, zwierany w końcowej fazie rozruchu za pomocą stycznika SZ, sterowanego przekaźnikiem czasowym. Silnik włączany jest do sieci zasilającej za



pomocą stycznika SL. Przebiegi prądu rozruchowego  $I_s$  oraz prędkości kątowej  $\omega$  zapisywane są jednocześnie za pomocą oscylografu wielokanałowego. Amperomierz włączony do obwodu wtórnego przekładnika prądowego służy do skalowania oscylogramu. Sygnał napięciowy, proporcjonalny do prędkości kątowej, uzyskuje się z tachoprądnicy TP.



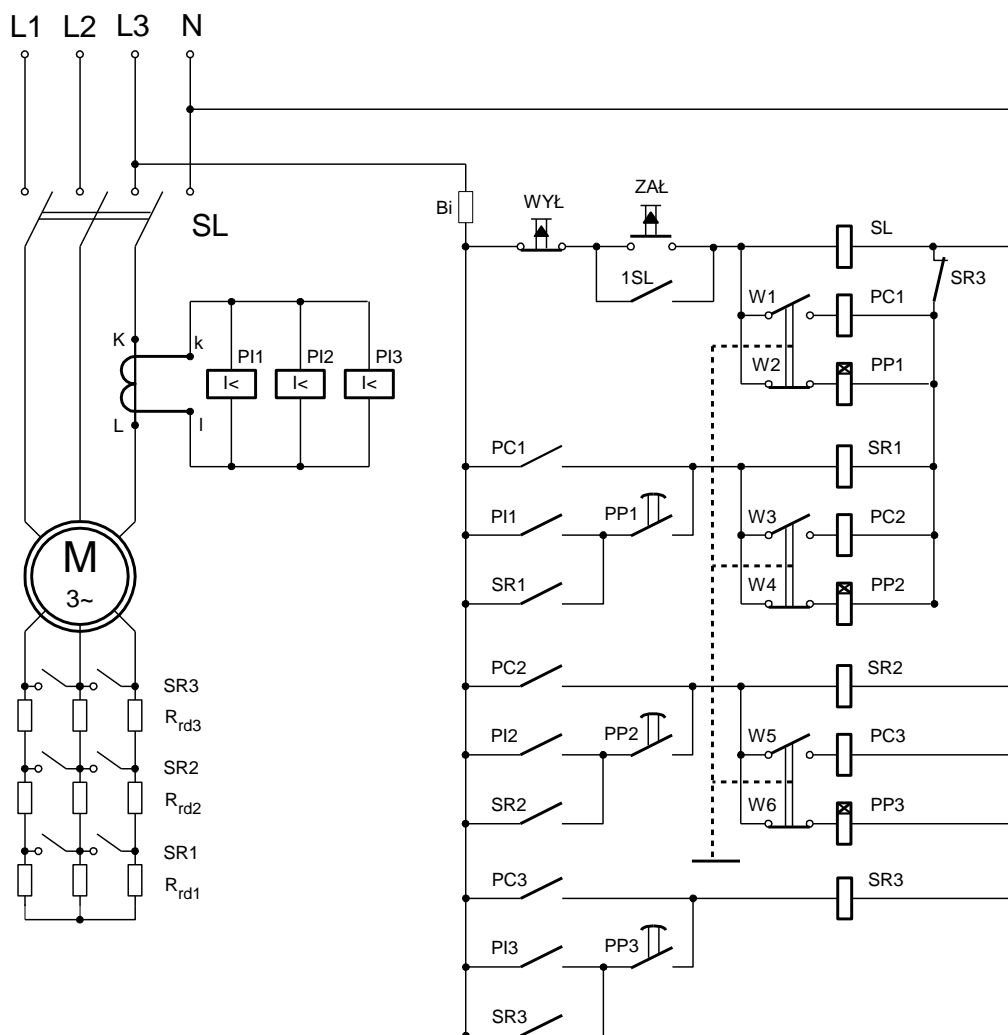
Rys. 8.4. Schemat układów pomiarowych do badań rozruchów silników indukcyjnych pierścieniowych

Schemat ideowy trójstopniowego rozrusznika rezystorowego przedstawiono na rysunku 8.5. Trójfazowy rozrusznik rezystorowy ma trzy sekcje rezystorów:  $R_{rd1}$ ,  $R_{rd2}$ ,  $R_{rd3}$ , zwierane kolejno stycznikami SR1, SR2, SR3. Oznacza to, że rezystancja pierwszego stopnia rozruchowego wynosi:  $R_{rd1} + R_{rd2} + R_{rd3}$ , odpowiednio drugiego:  $R_{rd2} + R_{rd3}$ , trzeciego:  $R_{rd3}$ .

Rodzaj sterowania wybiera się przełącznikiem ręcznym, wyposażonym w trzy pary przełączalnych styków *no/nz* oznaczonych W1–W6. Zamknięcie styków W1, W3, W5 powoduje przełączenie układu sterowania do rozruchu w funkcji czasu. Rozruch układu następuje po załączeniu przycisku ZAŁ, powodującym zadziałanie stycznika SL i włączenie silnika do sieci zasilającej w stanie, gdy rezystancja rozrusznika ma wartość maksymalną (pierwszy stopień rozruchowy). Jednocześnie następuje podtrzymanie przycisku ZAŁ stykami pomocniczymi 1SL oraz zasilanie przekaźnika czasowego PC1. Po czasie nastawy dla pierwszego stopnia rozruchowego, przekaźnik PC1 powoduje zamknięcie stycznika SR1, zwierającego sekcję rezystorów  $R_{rd1}$  rozrusznika. Silnik dokonuje rozruchu na drugim stopniu rozruchowym, a układ sterowania załącza zasilanie przekaźnika czasowego PC2. Dalszy proces rozruchu odbywa się

analogicznie aż do zamknięcia stycznika SR3, czyli przejścia silnika do pracy na charakterystyce naturalnej. Jednocześnie z chwilą zamknięcia stycznika SR3 następuje odłączenie stykiem pomocniczym SR3 zasilania cewek przekaźników czasowych PC1, PC2 i PC3 oraz styczników SR1 i SR2, co ma znaczenie ze względu na oszczędność energii elektrycznej.

Przejście do sterowania rozruchem w funkcji prądu następuje po przełączeniu przełącznika ręcznego w pozycję zamkniętych styków W2, W4, W6 (otwarcie styków W1, W3, W5).



Rys. 8.5. Schemat ideowy trójstopniowego rozrusznika rezystorowego sterowanego w funkcji czasu lub prądu

Do sterowania zastosowano trzy niezależne przekaźniki prądu dolnego (podprądowe) PI1, PI2, PI3, przez co możliwa jest realizacja rozruchu przy różnych, niezależnych nastawach wartości prądów przełączeń dla kolejnych stopni rozruchowych. Jest to istotne dla przypadku rozruchu układu napędowego z maszyną roboczą o charakterystyce  $M_o \neq \text{const}$ , np.  $M_o = k\omega$  (rys. 8.1b). W celu zapewnienia czasu zwłoki na otwarcie styków *no* przekaźników PI przy skokowych wzrostach prądu rozruchowego dla kolejnych stopni, zastosowano przekaźniki pomocnicze PP1, PP2, PP3 ze zwłoką czasową przy zamykaniu. Z chwilą włączenia silnika do sieci zasilającej następuje otwarcie styków przekaźnika PI1 i zamknięcie z opóźnieniem przekaźnika PP1, a tym samym rozruch na pierwszym stopniu rozruchowym. Gdy prąd silnika zmniejszy się do wartości prądu nastawy przekaźnika PI1, zadziała stycznik SR1, powodując jednocześnie przejście na drugi stopień rozruchowy oraz wyeliminowanie wpływu przekaźnika PI1 na dalszy przebieg procesu rozruchu. Przy kolejnym zmniejszeniu się wartości prądu silnika przekaźnik PI2 powoduje zadziałanie stycznika SR2 i rozruch silnika na trzecim stopniu rozruchowym. Przejście na charakterystykę naturalną silnika i odłączenie zasilania cewek przekaźników PP1, PP2, PP3 oraz styczników SR1, SR2 nastąpi po zadziałaniu stycznika SR3 pobudzonego przekaźnikiem PI3. Odłączenie silnika od sieci zasilającej oraz powrót układu sterowania do stanu wyjściowego dokonuje się przyciskiem WYŁ.

Układ pomiarowy i sterowania rozruchem za pomocą trójstopniowego rozrusznika rezystorowego umożliwia badania przewidziane programem ćwiczenia: dla zmiennych wartości momentu bezwładności układu, dowolnych nastaw czasów pracy stopni rozruchowych (PC1, PC2, PC3) i dowolnych nastaw prądów przełączeń (PI1, PI2, PI3). W przypadku badań rozruchów z zastosowaniem rozrusznika wiropądowego należy dokonać wymiany rozruszników zgodnie z rysunkiem 8.4.

### 8.3.2. Badania laboratoryjne

Badania mają na celu doświadczalne określenie wpływu rodzaju zastosowanego rozrusznika, zmiennych nastaw parametrów układu sterowania rozruszników rezystorowych wielostopniowych oraz wartości momentu bezwładności na przebieg procesu rozruchu układu napędowego z silnikiem indukcyjnym pierścieniowym. Uzyskane wyniki badań pozwolą pogłębić wiedzę teoretyczną oraz osiągnąć umiejętności formułowania kryteriów oceny poprawności rozruchu na podstawie charakterystyk prądu stojana  $I_s$  w funkcji poślizgu silnika.

Przebiegi prądu stojana  $I_s$  można oscylografować bezpośrednio lub z zastosowaniem przetwornika prądu AC/DC. Na rysunku 8.6 przedstawiono przykładowy zapis oscylograficzny prądu  $I_s$  z zastosowaniem przetwornika AC/DC oraz prędkości kątowej  $\omega$ .

Skalowanie oscylogramu prądu  $I_s$  wykonuje się na podstawie odczytu wskazań amperomierza w stanie ustalonym (po dokonanych rozruchach). Zgodnie z oznaczeniami jak na rysunku 8.6, stała oscylogramu prądu wynosi

$$C_I = \frac{I_A \mathcal{G}_I}{\alpha'_I},$$

gdzie:

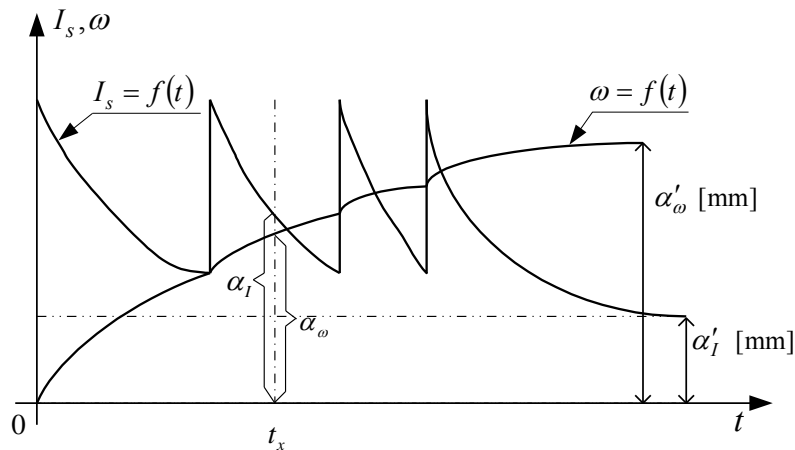
$I_A$  – wskazanie amperomierza,

$\mathcal{G}_I$  – przekładnia przekładnika prądowego.

Skalowanie prędkości kątowej odbywa się dla założenia, że po dokonany rozruchu silnik osiągnął prędkość zbliżoną do synchronicznej  $\omega_0$ . Stała oscylogramu prędkości kątowej

$$C_\omega = \frac{\omega_0}{\alpha'_\omega}.$$

Skalę osi czasu wyznacza się na podstawie wartości posuwu oscylogramu. Wyznaczenie wartości mierzonych wielkości dla czasu  $t_x$  trwania rozruchu polega na pomiarze odległości krzywej oscylogramu od osi  $t$  odpowiadającej ich wartościom równym zero oraz pomnożeniu wyniku pomiaru odległości przez stałe oscylogramu.



Rys. 8.6. Oscylogramy  $I_s$ ,  $\omega = f(t)$  w czasie rozruchu silnika indukcyjnego pierścieniowego z trójstopniowym rozrusznikiem rezystorowym (do zapisu  $I_s$  zastosowano przetwornik AC/DC)

Dla przykładu, dla  $t = t_x$  (rys. 8.6) wyznaczono  $\alpha_I$  oraz  $\alpha_\omega$  i obliczono

$$I_s = \alpha_I C_I \quad [\text{A}], \quad \omega = \alpha_\omega C_\omega \quad \left[ \frac{1}{\text{s}} \right].$$

Po analogicznym odczycie dla kolejnych wartości czasu  $t$  otrzymuje się punkty charakterystyki względnej wartości prądu rozruchowego  $i_s = f(s)$ , gdzie

$$i_s = \frac{I_s}{I_{sN}}, \quad s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0},$$

przy czym  $I_{sN}$  – wartość znamionowa prądu stojana.

Wyniki pomiarów i obliczeń dla przypadków przewidzianych w programie ćwiczenia należy zamieścić w tabeli 8.1 oraz przedstawić graficznie w postaci charakterystyk rozruchowych  $i_s = f(s)$ , odpowiednio zgrupowanych w celu umożliwienia ich porównania.

Tabela 8.1

Lp.	$t$	$\alpha$	$\alpha_\omega$	$I_s$	$I_s/I_{sN}$	$\omega$	$s$	Uwagi
	s	mm	mm	A	–	1/s	–	
1								$C_I =$
2								$C_\omega =$
...								$\omega_0 =$
$n$								$I_{sN} =$

Obliczenia należy wykonać dla  $n$  wybranych punktów pomiarowych każdego oscylogramu, umożliwiających wykreślenie charakterystyk  $i_s = f(s)$ . Dla prędkości kątowej silnika (poślizgu), przy której nastąpiło przełączenie silnika na kolejny stopień rozruchowy, należy wyznaczyć wartość prądu rozruchowego  $i_s$  przed i po przełączeniu. Otrzymane wyniki badań charakterystyki  $i_s = f(s)$  służą do oceny porównawczej efektów stosowania wyszczególnionych rozruszników.

## 8.4. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Wykaz parametrów i danych znamionowych badanego układu napędowego.
2. Spis aparatury pomiarowej.
3. Schematy ideowe układów pomiarowych zastosowanych do badań.
4. Tabele z wynikami pomiarów oraz wielkościami obliczonymi na podstawie pomiarów.
5. Charakterystyki prądu rozruchowego silnika  $i_s = f(s)$  dla wszystkich rodzajów zastosowanych rozruszników. Charakterystyki należy zgrupować na rysunkach według zaleceń prowadzącego zajęcia.
6. Uwagi i wnioski.

## 8.5. Zagadnienia kontrolne

1. Wyjaśnić rolę rozrusznika w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi pierścieniowymi.

2. Opisać budowę rozruszników rezystorowych wielostopniowych oraz wiroprądowych.
3. Przedstawić konsekwencje stosowania rozruszników rezystorowych sterowanych w funkcji czasu w przypadkach rozruchów układów napędowych z maszynami roboczymi o losowo zmiennych warunkach obciążenia.
4. Porównać właściwości rozruszników rezystorowych wielostopniowych i wiroprądowych.
5. Opisać działanie układu sterowania laboratoryjnego rezystorowego rozrusznika wielostopniowego.

## Literatura

- [1] Kędzior W., *Podstawy napędu elektrycznego*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980.
- [2] *Laboratorium napędu elektrycznego*, praca zbiorowa pod redakcją W. Kędziora, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1986.
- [3] *Napęd elektryczny*, praca zbiorowa pod redakcją Z. Grunwalda, WNT, Warszawa 1987.