

## Ćwiczenie 7

# Układy rozruchowe silników indukcyjnych klatkowych

## 7.1. Program ćwiczenia

1. Wyznaczenie charakterystyk prądu rozruchowego silnika dla przypadków:
  - a) rozruchu bezpośredniego,
  - b) rozruchów przy obniżonym napięciu zasilania dzięki zastosowaniu:
    - przełączania uzwojeń stojana według konfiguracji gwiazda–trójkąt,
    - rozrusznika stojanowego,
    - tyrystorowego sterownika napięcia.
2. Analiza porównawcza metod rozruchu na podstawie wartości prądu rozruchowego i czasu rozruchu.

## 7.2. Wiadomości teoretyczne

Silniki indukcyjne klatkowe znalazły powszechne zastosowanie w układach napędowych dzięki swej prostej budowie, dużej pewności ruchowej, łatwości rozruchu, niskiej cenie. Charakterystykę mechaniczną naturalną silnika klatkowego, w porównaniu do charakterystyki silnika pierścieniowego (ćwiczenie nr 8), cechuje większy moment rozruchowy (przy  $s = 1$ ), większy poślizg krytyczny, mniejsza przeciążalność znamionowa momentem oraz większy poślizg znamionowy. Wartości prądu rozruchowego silnika klatkowego nie można porównywać z analogiczną wartością prądu silnika pierścieniowego, gdyż silniki pierścieniowe uruchamiane są zawsze przy zastosowaniu rozrusznika w obwodzie wirnika. W celu uzyskania jednakowej wartości momentu rozruchowego przez oba silniki, prąd rozruchowy silnika klatkowego ma zdecydowanie większą wartość.

Prąd rozruchowy silników klatkowych osiąga wartość  $4\div 7 I_{sN}$ , gdzie  $I_{sN}$  – prąd znamionowy silnika, i zależy od konstrukcji uzwojenia klatkowego wirnika. Istnieje rodzina tzw. silników z ulepszonym rozruchem, do których należą silniki dwuklatkowe i głębokożłobkowe, budowane w celu zmniejszenia wartości prądu rozruchowego i zwiększenia momentu rozruchowego [3]. W powszechnie stosowanych silnikach jednoklatkowych prąd rozruchowy ma wartość około  $6\div 7 I_{sN}$  oraz moment rozruchowy około  $1,2\div 1,4 M_N$ .

Duża wartość prądu rozruchowego silników klatkowych jest ich podstawową wadą. Powoduje przeciążenia transformatorów elektroenergetycznych, spadki napięć w sieci zasilającej, straty energii elektrycznej. Spadki napięć, niekorzystnie wpływające na pracę innych odbiorników energii, są przyczyną ograniczeń mocy silników zasilanych z publicznej sieci elektroenergetycznej. W warunkach przemysłowych do zasilania silników, zwłaszcza dużej mocy, budowane są wydzielone linie zasilające.

Oprócz przeciążenia toru zasilania, duży prąd rozruchowy silników klatkowych wpływa niekorzystnie na pracę samych silników. Straty energii elektrycznej w uzwojeniach silnika podczas rozruchu powodują zmniejszenie dopuszczalnej liczby włączeń na godzinę (pojęcie określone normą PN), szczególnie przy rozruchach z obciążeniem momentem oporowym maszyny roboczej. Oprócz względów cieplnych, duży prąd rozruchowy jest przyczyną awarii silnika spowodowanych siłami elektrodynamicznymi w uzwojeniach.

Sposobem na zmniejszenie negatywnych skutków występujących podczas rozruchu silnika przez bezpośrednie włączenie do sieci zasilającej jest jego rozruch przy obniżonym napięciu. Stosowanymi w technice metodami obniżania napięcia silnika na czas rozruchu są:

- połączenie uzwojeń stojana w gwiazdę na czas rozruchu i przełączenie w trójkąt po zakończeniu rozruchu,
- zastosowanie rozrusznika stojanowego,
- zastosowanie autotransformatora rozruchowego,
- zastosowanie tyrystorowego sterownika napięcia.

Następstwem obniżenia napięcia silnika na czas rozruchu jest zmniejszenie wartości prądu i momentu rozruchowego silnika. Obowiązują zależności:

$$I'_r = I_r \frac{U'_s}{U_{sN}}, \quad (7.1)$$

$$M'_r = M_r \left( \frac{U'_s}{U_{sN}} \right)^2, \quad (7.2)$$

w których:

$I'_r, M'_r$  – wartości prądu i momentu rozruchowego dla napięcia obniżonego do wartości  $U'_s$ ,

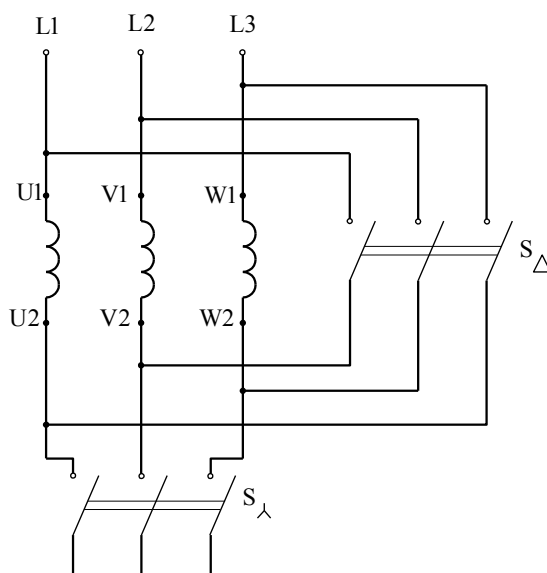
$I_r, M_r$  – wartości prądu i momentu rozruchowego dla napięcia znamionowego  $U_{sN}$ .

### 7.2.1. Przełącznik gwiazda–trójkąt

Uruchomienie silnika klatkowego z przełączaniem uzwojenia stojana z gwiazdy w trójkąt jest najczęściej stosowanym sposobem rozruchu silników małej i średniej mocy o napięciu znamionowym do 1 kV. Rozruch ten może być przeprowadzony po spełnieniu następujących warunków:

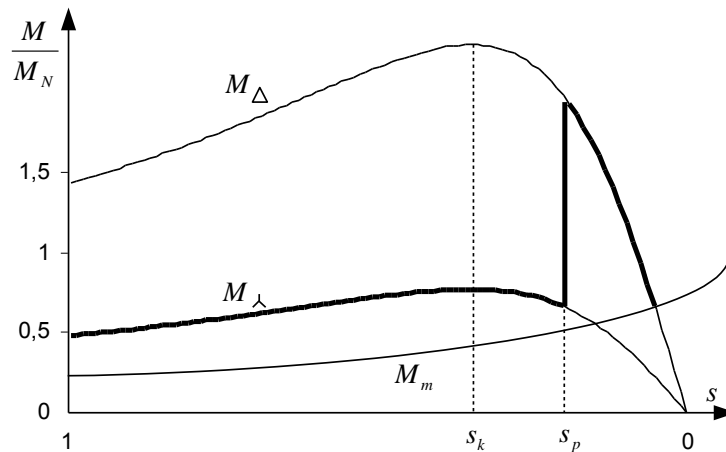
- uzwojenie stojana silnika podczas pracy w warunkach zasilania napięciem znamionowym połączone jest w trójkąt,
- do tabliczki zaciskowej silnika doprowadzone są początki i końce uzwojeń fazowych stojana,
- moment oporowy maszyny roboczej w początkowym okresie rozruchu nie przekracza 20–40% momentu znamionowego silnika.

W pierwszym etapie rozruchu uzwojenie stojana połączone jest w gwiazdę. Po osiągnięciu przez silnik prędkości kątowej zbliżonej do znamionowej, uzwojenie przełącza się w trójkąt. Przykład realizacji układu rozruchu gwiazda–trójkąt przedstawiono na rysunku 7.1. Przy połączeniu uzwojeń stojana w gwiazdę (zgodnie z rys. 7.1.), prąd fazowy silnika jest  $\sqrt{3}$ -krotnie mniejszy w porównaniu do prądu fazowego przy połączeniu uzwojenia w trójkąt. Prądy w obwodach zasilania oraz moment obrotowy silnika są natomiast 3-krotnie mniejsze. Ze względu na małą wartość uzyskanego momentu rozruchowego ten sposób rozruchu może być stosowany w przypadku silnika nieobciążonego lub w napędzie maszyn roboczych o charakterystyce wentylatorowej.



Rys. 7.1. Schemat układu połączeń uzwojeń gwiazda–trójkąt

Charakterystykę momentu rozruchowego silnika z zastosowaniem przełączania uzwojeń gwiazda–trójkąt przedstawiono na rysunku 7.2. W celu obciążenia silnika w czasie rozruchu maszyną roboczą o momencie oporowym  $M_m$ , przełączenie uzwojeń w trójkąt odbywa się przy poślizgu  $s_p$ .



Rys. 7.2. Charakterystyka momentu rozruchowego silnika z zastosowaniem przełącznika uzwojeń gwiazda–trójkąt

### 7.2.2. Rozruch z zastosowaniem rozrusznika stojanowego

Zastosowanie rozrusznika stojanowego do obniżenia napięcia zasilania silnika na czas rozruchu stwarza możliwość optymalizowania procesu rozruchu. W przeciwieństwie do przełączania uzwojeń gwiazda–trójkąt, rozruszniki stojanowe pozwalają na obniżenie napięcia zasilania silnika w stopniu dowolnym. Budowane są z reguły jako jednostopniowe.

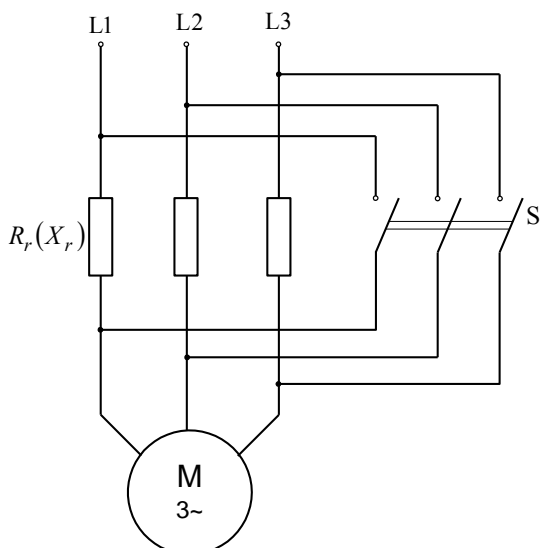
Rolę rozruszników stojanowych pełnią rezystory, w przypadku silników małej mocy, oraz dławiki – w przypadku silników średniej i dużej mocy. O zastosowaniach decydują straty mocy podczas rozruchu oraz charakter impedancji zwarciowej silnika. Silniki dużej mocy cechuje mała wartość współczynnika mocy przy poślizgu  $s = 1$ , czyli stosunkowo duża wartość reaktancji zastępczej.

Rozruszniki stojanowe stosuje się do silników o dowolnym napięciu znamionowym. Budowane są z reguły jako symetryczne. Rozruszniki niesymetryczne mają zastosowanie jedynie wówczas, gdy zadaniem rozrusznika jest ograniczenie momentu rozruchowego silnika, bez troski o wartość prądu rozruchowego. W przypadku włączenia rezystora lub dławika w jedną fazę uzwojenia stojana, prąd rozruchowy w tej fazie ulegnie zmniejszeniu. W pozostałych fazach będzie miał wartość zbliżoną do prądu przy zasilaniu napięciem znamionowym. Niesymetria zasilania jest przyczyną wystąpienia składowej przeciwbieżnej pola wirującego, zmniejszającej moment silnika.

Rys. 7.3. Schemat układu połączeń silnika klatkowego i rozrusznika stojanowego

Schemat układu połączeń silnika i symetrycznego rozrusznika stojanowego przedstawiono na rysunku 7.3. Rozrusznik o rezystancji  $R_r$  lub reaktancji  $X_r$  po dokonaniu rozruchu zwiera się łącznikiem (stycznikiem) S1, co powoduje włączenie silnika do bezpośredniego zasilania z sieci.

W celu ograniczenia wartości prądu rozruchowego (przy  $s = 1$ ) do wartości  $I'_r = k_r I_{sN}$  za pomocą rozrusznika symetrycznego należy w każdej fazie stojana włączyć rezystancję  $R_r$  lub reaktancję  $X_r$  o wartościach:



$$R_r = \sqrt{\left(\frac{U_{sN}}{k_r I_{sN}}\right)^2 - X_z^2 - R_z}, \quad (7.3a)$$

$$X_r = \sqrt{\left(\frac{U_{sN}}{k_r I_{sN}}\right)^2 - R_z^2 - X_z^2}, \quad (7.3b)$$

gdzie  $R_z$ ,  $X_z$  – odpowiednio: rezystancja i reaktancja zwarcia silnika.

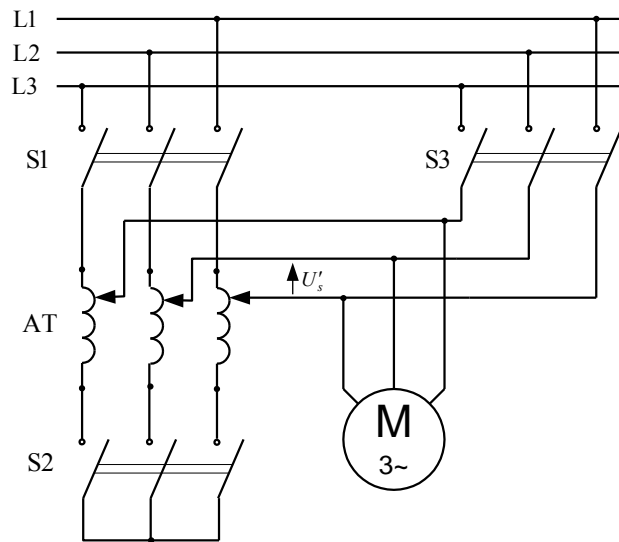
Dobór wartości współczynnika  $k_r$  wymaga identyfikacji układu napędowego ze względu na wymaganą minimalną wartość momentu rozruchowego silnika.

W ostatnich latach coraz częściej buduje się stojanowe rozruszniki wiropądowe (patrz ćwiczenie nr 8). Pozwalają one dostosować charakter impedancji rozrusznika do impedancji silnika. Optymalnym rozwiązaniem jest, gdy współczynnik mocy rozrusznika jest równy współczynnikowi mocy silnika przy rozruchu, wówczas suma wektorowa napięcia na zaciskach silnika i spadku napięcia na impedancji rozrusznika jest równa sumie algebraicznej, co gwarantuje minimalne wymiary geometryczne rozrusznika wiropądowego.

### 7.2.3. Rozruch z zastosowaniem autotransformatora rozruchowego

Rozruch za pomocą autotransformatora AT jest stosowany do silników klatkowych wysokonapięciowych średnich i dużej mocy. Napięcie zasilania na czas rozru-

chu należy dobrać stosownie do wymagań układu napędowego ze względu na wymagany minimalny moment rozruchowy. Najbardziej rozpowszechnionym układem rozruchowym silnika z autotransformatorem jest układ Korndorfera, przedstawiony na rysunku 7.4. Pozwala on na przechodzenie z charakterystyki rozruchowej na charakterystykę naturalną silnika bez przerw w zasilaniu.



Rys. 7.4. Układ Korndorfera do rozruchu silnika klatkowego z zastosowaniem autotransformatora

W początkowej fazie rozruchu silnik zasilany jest napięciem obniżonym do wartości  $U'_s$ . W tym celu należy włączyć łączniki (styczniki) S1 i S2. Po dokonaniu rozruchu wyłącza się S2, co powoduje, że silnik zostaje zasilany przez część uzwojenia autotransformatora, spełniającego rolę dławika. Uzyskuje się w ten sposób pośredni stopień rozruchowy, łagodzący procesy przełączania silnika do pracy przy napięciu znamionowym. W końcowej fazie rozruchu następuje załączenie S3 i wyłączenie S1.

Znamienną cechą rozruchu silnika za pomocą autotransformatora jest zmniejszenie w tym samym stosunku prądu rozruchowego pobieranego z sieci oraz momentu rozruchowego. Wartość tego stosunku jest równa kwadratowi zastosowanej przekładni autotransformatora:

$$I'_r = I_r \left( \frac{U'_s}{U_{sN}} \right)^2 = I_r \frac{1}{g_e^2}, \quad (7.4)$$

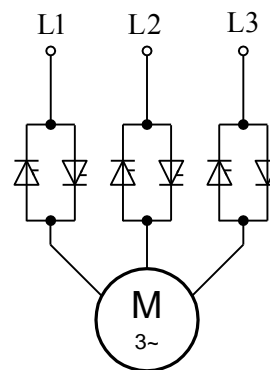
$$M'_r = M_r \left( \frac{U'_s}{U_{sN}} \right)^2 = M_r \frac{1}{g_e^2}.$$

W Polsce budowane są autotransformatory rozruchowe o mocy 800÷11500 kVA dla pracy dorywczej z czasem  $t_d = 80\div 180$  s oraz napięciu znamionowym 6 kV.

### 7.2.4. Rozruch z zastosowaniem tyrystorowego sterownika napięcia

Rozruch silników indukcyjnych klatkowych z zastosowaniem tyrystorowego sterownika napięcia dotyczy silników niskiego napięcia, małej i średniej mocy. Włączenie w obwód uzwojenia stojana symetrycznych układów tyrystorowych prowadzi do obniżenia napięcia na jego zaciskach. Podstawowym wyposażeniem tych układów jest zespół przeciwobnie równoległych tyrystorów w każdej fazie zasilania jak pokazano na rysunku 7.5 (układ z sześcioma tyrystorami).

Przystosowanie sterownika napięcia do wykorzystania w warunkach rozruchu silnika polega na uzależnieniu sterowania zespołu tyrystorów od czasu. Przez regulację wartości początkowej napięcia oraz czasu narastania napięcia od wartości początkowej do znamionowej, możliwe jest optymalizowanie rozruchu ze względu na wartość początkową prądu i momentu silnika oraz przyspieszenia układu napędowego. Po dokonaniu rozruchu stosuje się zwieranie (bocznikowanie) sterownika napięcia dodatkowym łącznikiem ( stycznikiem) w celu odciążenia zespołu tyrystorów podczas pracy silnika.



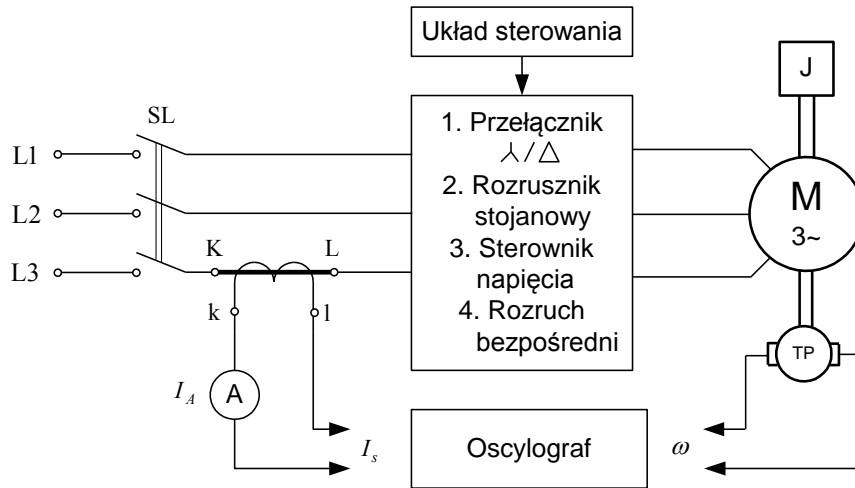
Rys. 7.5. Układ ze sterownikiem napięcia z zespołem przeciwobnie równoległych tyrystorów

Sterowniki napięcia przystosowane do rozruchu silników noszą nazwę układów do łagodnego rozruchu silników indukcyjnych (tzw. *soft-start*). Umożliwiają programowanie procesu rozruchu. Ich wadą jest generowanie wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia i prądu silnika.

## 7.3. Instrukcja

### 7.3.1. Opis stanowiska pomiarowego

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 7.6. Silnik indukcyjny klatkowy sprzęgnięty jest z urządzeniem stanowiącym zespół wymiennych mas wirujących (tarcz stalowych), umożliwiających zmianę momentu bezwładności  $J$  układu napędowego. Uzwojenie stojana silnika zasilane jest z sieci poprzez panel laboratoryjny, umożliwiający wybór sposobu rozruchu silnika oraz nastawę parametrów rozruchu.



Rys. 7.6. Uproszczony schemat układu pomiarowego do badań rozruchów silników indukcyjnych klatkowych

Przebiegi prądu pobieranego z sieci  $I_s$  oraz prędkości kątowej  $\omega$  są rejestrowane jednocześnie za pomocą oscylografu wielokanałowego. Amperomierz włączony do obwodu wtórnego przekładnika prądowego służy do skalowania rejestrowanego przebiegu prądu. Zapis przebiegu napięcia tachoprądnicy TP, proporcjonalnego do chwilowej wartości prędkości kątowej silnika, służy do wyznaczania poślizgu silnika w dowolnej chwili procesu rozruchu.

### 7.3.2. Badania laboratoryjne

Badania mają na celu doświadczalne określenie wpływu sposobu rozruchu, nastaw parametrów rozruchu oraz wartości momentu bezwładności na przebieg procesu rozruchu układu napędowego z silnikiem indukcyjnym klatkowym. Poprawność rozruchu należy ocenić przez porównanie charakterystyk prądu  $I_s$  pobieranego z sieci w funkcji poślizgu silnika, uzyskanych przez badania kolejnych sposobów rozruchu.

Prąd  $I_s$  można oscylografować bezpośrednio z przekładnika prądowego lub z zastosowaniem przetwornika prądu AC/DC. Na rysunku 7.7 przedstawiono przykładowy zapis oscylograficzny prądu  $I_s$  przy użyciu przetwornika AC/DC oraz zarejestrowany przebieg prędkości kątowej  $\omega$ .

Skalowanie oscylogramu prądu  $I_s$  wykonuje się na podstawie odczytu wskazań amperomierza w stanie ustalonym (po dokonaniu rozruchu). Zgodnie z oznaczeniami na rysunku 7.7 stała oscylogramu prądu

$$C_I = \frac{I_A g_I}{\alpha'_I} \left[ \frac{\text{A}}{\text{mm}} \right],$$



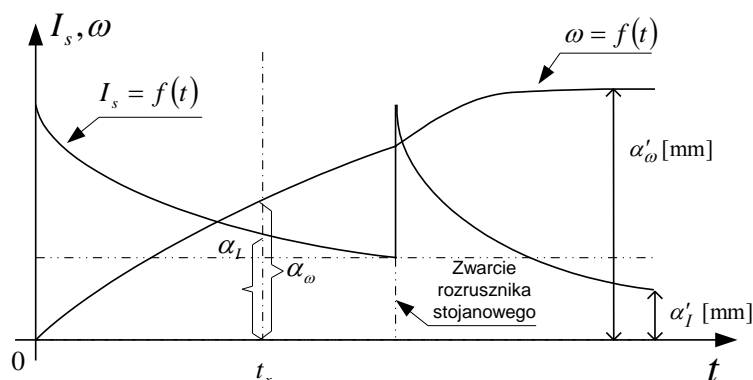
gdzie:

$I_A$  – wskazanie amperomierza,

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

Do skalowania prędkości kątowej  $\omega$  przyjęto, że silnik po rozruchu, przy braku statycznego momentu obciążenia, osiąga prędkość ustaloną zbliżoną do prędkości synchronicznej  $\omega_0$ . Stała oscylogramu prędkości kątowej wynosi zatem

$$C_\omega = \frac{\omega_0}{\alpha'_\omega} \left[ \frac{1}{\text{s} \cdot \text{mm}} \right].$$



Rys. 7.7. Oscylogramy  $I_s$ ,  $\omega = f(t)$  w czasie rozruchu silnika klatkowego z rezystorowym rozrusznikiem stojanowym

Wartości prądu  $I_s$  i prędkości kątowej  $\omega$  w chwili  $t_x$  (rys. 7.7) wyznacza się następująco:

$$I_s = \alpha_I C_I \text{ [A]},$$

$$\omega = \alpha_\omega C_\omega \left[ \frac{1}{\text{s}} \right].$$

Dokonując odczytów dla kolejno przyjętych wartości  $t_x$ , otrzymuje się punkty charakterystyki prądu

$$i_s = f(s),$$

gdzie:

$i_s = \frac{I_s}{I_{sN}}$  – względna wartość prądu silnika ( $I_{sN}$  – wartość znamionowa prądu stojana),

$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  – poślizg silnika.

Wyniki pomiarów i obliczeń dla przypadków przyjętych w programie ćwiczenia należy zamieścić w tabeli 7.1 oraz przedstawić graficznie w postaci charakterystyk  $i_s = f(s)$ . Wykresy należy odpowiednio zgrupować w celu umożliwienia analizy porównawczej.

Tabela 7.1

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

## 7.4. 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 metod rozruchu objętych programem ćwiczenia. W celu umożliwienia analizy porównawczej, charakterystyki należy przedstawić na wspólnym rysunku.
6. Uwagi i wnioski.

## 7.5. Zagadnienia kontrolne

1. Przedstawić negatywne skutki wywołane przez bezpośrednie włączenie silnika indukcyjnego klatkowego do sieci zasilającej.
2. Określić wpływ wartości napięcia zasilania na kształt charakterystyki prądu i momentu rozruchowego silnika indukcyjnego klatkowego.
3. Omówić cel stosowania i metody realizacji rozruchu silnika przy obniżonym napięciu.
4. Porównać efekty stosowanych metod rozruchu silnika przy obniżonym napięciu.

## 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.