

## Ćwiczenie 17

### BADANIE SILNIKA TRÓJFAZOWEGO KLATKOWEGO ZASILANEGO Z PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI

#### 1. Wiadomości ogólne

Rozwój napędów elektrycznych jest ściśle związany z rozwojem energoelektroniki. Współcześnie na ogół każdy układ napędowy umożliwiający regulację silnika jest układem energoelektronicznym. Nowe rozwiązania coraz doskonalszych przyrządów półprzewodnikowych mocy, struktur układów półprzewodnikowych i systemów sterowania spowodowały, że technologie energoelektroniczne zostały uznane za najważniejsze w technice przetwarzania energii.

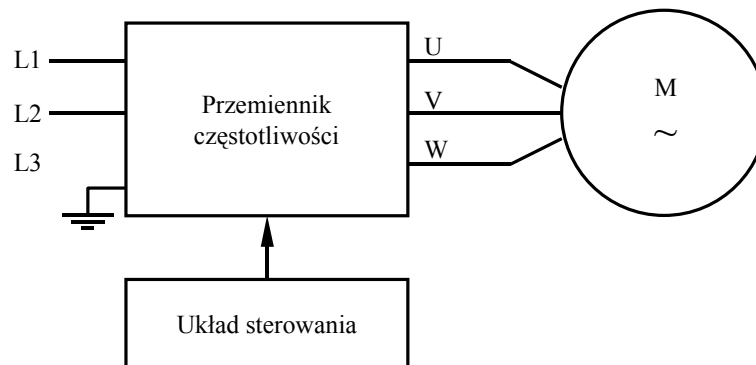
Napędy mają bardzo różne moce silników elektrycznych, od bardzo małej, np. kilkadziesiąt watów w sprzęcie domowym, kilkaset watów jako serwonapędy robotów przemysłowych, rzędu kilowatów i dziesiątków kilowatów w obrabiarkach, pompach, wentylatorach, do bardzo dużej rzędu kilkunastu megawatów do napędu wentylatorów kopalnianych, młynów kruszywa itp.

W zależności od wymagań technicznych, związanych z procesem technologicznym urządzeń napędowych, określających zakres regulacji prędkości, warunków rozruchu i pożądaną dynamikę napędu oraz warunków eksploatacji związanych z rodzajem źródeł zasilania i środowiskiem, w którym pracują, są stosowane napędy z silnikami prądu stałego (obcowzbudnymi i szeregowymi) albo z silnikami prądu przemiennego (asynchroniczne i synchroniczne).

Ze względu na część praktyczną ćwiczenia omówiony zostanie silnik asynchroniczny trójfazowy oraz jego współpraca z przemiennikiem częstotliwości.

##### 1.1. Przemiennik częstotliwości

Przemiennik częstotliwości stosowany w ćwiczeniu zamienia napięcie trójfazowe o częstotliwości sieciowej 50 HZ na napięcie trójfazowe o zmiennej wartości, częstotliwości i kierunku wirowania. Umożliwia zatem regulację prędkości i momentu obrotowego oraz sterowanie procesami rozruchu, hamowania i nawrotami silnika. Przemiennik częstotliwości, nazywany często falownikiem włącza się pomiędzy siecią zasilającą a silnikiem (rys. 1).



Rys. 1. Układ elektryczny zasilania silnika z przemiennika częstotliwości

## 1.2. Silnik asynchroniczny trójfazowy.

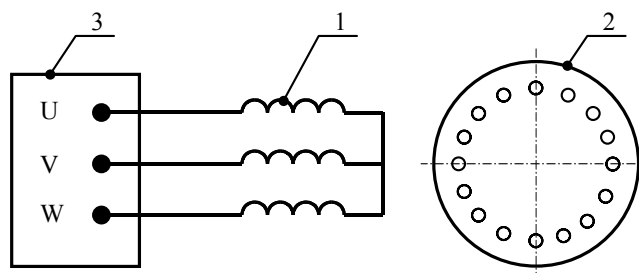
### Ogólna budowa i zasada działania

Silnik asynchroniczny składa się ze stojana i ułożyskowanego wirnika. Stojan to sprasowany pakiet blach prądnicowych uformowany w postaci wydrążonego walca z naciętymi na wewnętrznej części żłobkami i osadzony na sztywno w kadłubie silnika. W żłobkach umieszczone są trzy uzwojenia fazowe rozmieszczone symetrycznie na obwodzie.

W silnikach o mocach większych od 4 kW, początki U1; V1; W1 i końce U2; V2; W2 z poszczególnych uzwojeń fazowych wyprowadzone są na tabliczkę zaciskową. Dostępność początków i końców umożliwia kjarzenie uzwojeń w gwiazdę „Y” lub w trójkąt „Δ” (rozruch silnika za pomocą przełącznika gwiazda-trójkąt).

W silnikach o mocach do 4 kW włącznie, uzwojenia stojana są połączone w gwiazdę wewnątrz a na tabliczkę zaciskową wyprowadzane są tylko trzy początki opisane literami U; V; W.

Wirnik silnika to również odpowiednio sprasowany pakiet blach prądnicowych z naciętymi na zewnętrznej części żłobkami i osadzony na sztywno na wale. W silnikach zwartych żłobki wirnika i połączenia czołowe są zalewane aluminium.



Rys. 2. Silnik asynchroniczny trójfazowy

- 1 – uzwojenia stojana połączone w gwiazdę,
- 2 – wirnik klatkowy silnika,
- 3 – tabliczka zaciskowa

Trójfazowe uzwojenie stojana skojarzone w gwiazdę lub w trójkąt zasilane z sieci trójfazowej wytwarza wirujące pole magnetyczne, którego prędkość obrotowa względem stojana wyraża się wzorem:

$$n_s = \frac{60f}{p}, \quad (1)$$

gdzie:  $n_s$ - prędkość obrotowa pola wirującego, obr/min.,  
 $f$ - częstotliwość napięcia zasilającego, Hz,  
 $p$  - liczba par biegunów magnetycznych uzwojeń stojana.

Wirujące pole magnetyczne przecinające pręty klatki wirnika indukuje w nich siły elektromotoryczne, które powodują przepływ przez te pręty prądu  $I_2$  (pręty wirnika poprzez pierścienie czołowe tworzą obwody zamknięte). Wzajemne oddziaływanie prądu  $I_2$  w prętach klatki i wirującego pola magnetycznego na siebie, daje moment napędowy, który powoduje obrót wirnika w kierunku wirowania pola.

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \Psi_2 \quad (2)$$

gdzie:  $C_M$  - stała wynikająca z danych konstrukcyjnych,  
 $\Phi$  - strumień magnetyczny,  
 $\Psi_2$  - opóźnienie prądu wirnika  $I_2$  względem siły elektromotorycznej  $E_2$ ,  
 $I_2$  - prąd w prętach klatki wirnika.

Napięcia fazowe  $U_{1f}$  zasilające uzwojenia stojana są kompensowane przez siły elektromotoryczne  $E_1$  indukowane w tych uzwojeniach;

$$E_1 = 4,44 f z_1 \Phi k_{g1} \quad (3)$$

gdzie:  $k_{g1}$  - wypadkowy współczynnik uzwojeń stojana,  
 $z_1$  - liczba zwojów jednego uzwojenia stojana,  
 oraz przez spadki napięć na oporach uzwojeń;

$$U_{1f} = \underline{E}_1 + \underline{I}_1 R_1 + \underline{I}_1 X_1, \quad (4)$$

gdzie:  $R_1, X_1$  - rezystancja i reaktancja jednego uzwojenia stojana.

Jak wynika z zależności (3) i (4) wartość strumienia magnetycznego jest warunkowana wartością napięcia fazowego zasilającego silnik:

$$\Phi \approx \frac{U_{1f}}{4,44 f z_1 k_{g1}} \quad (5)$$

Silnik asynchroniczny wytwarza moment napędowy tylko wówczas, jeśli obroty wirnika  $n$  są mniejsze od obrotów pola wirującego  $n_s$ . Wówczas występuje przecinanie prętów klatki wirnika przez wirujące pole magnetyczne i pojawia się w prętach wirnika  $E_2$  a pod jej wpływem  $I_2$ . Opóźnianie się wirnika względem wirującego pola magnetycznego nazywa się poślizgiem, który wyraża się zależnością:

$$s_{\%} = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\% \quad (6)$$

Poślizg w silnikach asynchronicznych w warunkach znamionowych zasilania i obciążenia wynosi kilka %.

Prędkość obrotowa wirnika w zależności od poślizgu;

$$n = n_s (1 - s) = \frac{60f}{p} (1 - s) \quad (7)$$

### Obciążenie silnika

Przy zmianach obciążenia na wale silnik samoczynnie dostosowuje moment napędowy do momentu oporowego przez zmianę prędkości obrotowej wirnika (obciążenie wzrasta, prędkość obrotowa maleje).

Silnik pobiera z sieci moc pozorną  $S$ :

$$S = \sqrt{3} U I \quad (8)$$

gdzie:  $U, I$  - wartości przewodowe napięcia i prądu,  
która decyduje o stopniu obciążenia linii zasilającej silnik.

Składowa czynna  $P_1$  mocy pozornej  $S$ :

$$P_1 = S \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad (9)$$

pokrywa zapotrzebowanie na moc  $P$  na wale silnika oraz straty mocy  $\Delta P$  w samym silniku.

Moc  $P$  na wale silnika w zależności od momentu  $M$  i prędkości obrotowej  $n$  wynosi:

$$P = \omega M = 2\pi n M \quad (10)$$

gdzie:  $P$  - W;  $M$  - N·m;  $n$  - obr/s;  $\omega$  - rad/s.

Moc bierna  $Q$ ;

$$Q = S \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} U I \sin \varphi \quad (11)$$

charakteryzuje wytwarzane w silniku pole magnetyczne warunkujące jego pracę.

Moc bierna nieznacznie wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia silnika.

Współczynnik mocy  $\cos \varphi$ ;

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q^2}} \quad (12)$$

jest warunkowany przede wszystkim stopniem obciążenia silnika. Najmniejszą wartość posiada przy biegu jałowym ( $\cos \varphi_0 = 0,1 \div 0,3$ ).

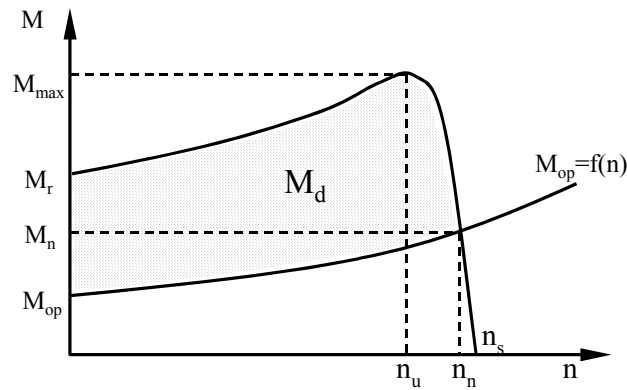
Sprawność silnika:

$$\eta = \frac{P}{P_1} \cdot 100\% \quad (13)$$

zależy również od obciążenia.

### Charakterystyka mechaniczna silnika

Podstawową charakterystyką ruchową silnika jest charakterystyka mechaniczna przedstawiająca zależność momentu napędowego  $M$  w funkcji prędkości obrotowej wirnika  $n$ ;  $M = f(n)$ , przy znamionowym napięciu zasilającym i znamionowej częstotliwości (rys.3).



Rys. 3. Charakterystyka mechaniczna silnika asynchronicznego

Przeciążalność mechaniczna silnika;

$$p_m = \frac{M_{\max}}{M_n} \quad (14)$$

Dla silników asynchronicznych klatkowych wynosi  $p_m = 1,8 \div 3$ .

Zapas momentu napędowego zapewnia silnikowi stabilną pracę w przypadku pojawienia się chwilowych przeciążeń. Silnik ruszy jeśli będzie miał spełniony warunek:

$$M_r \succ M_{op} \quad (15)$$

gdzie:  $M_r$  - moment rozruchowy silnika,

$M_{op}$  - moment oporowy maszyny napędzanej przy  $n = 0$ .

Różnica pomiędzy momentem napędowym  $M$  silnika i momentem oporowym  $M_{op}$  maszyny napędzanej nazywa się momentem dynamicznym;

$$M_d \succ M - M_{op} \quad (16)$$

Im większy jest moment dynamiczny tym, np. czas rozruchu silnika jest krótszy.

### 1.3. Współpraca silnika z przetwornicą częstotliwości

W silnikach asynchronicznych o wirniku klatkowym, najczęściej stosowanych w napędach, płynną regulację prędkości obrotowej, zgodnie z (7)

$$n = \frac{60f}{p} (1 - s)$$

można uzyskać jedynie przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego.

Ze względu na wytwarzany przez silnik moment napędowy,

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \Psi_2$$

regulacja prędkości obrotowej jest najkorzystniejsza wtedy, gdy odbywa się przy stałej znamionowej wartości strumienia magnetycznego. Przy zaniedbaniu oporów uzwojeń stojana ( $R_1; X_1$ ), jak wynika z zależności (4) i (3), napięcie fazowe zasilające silnik jest w przybliżeniu równe indukowanej w uzwojeniu sile elektromotorycznej:

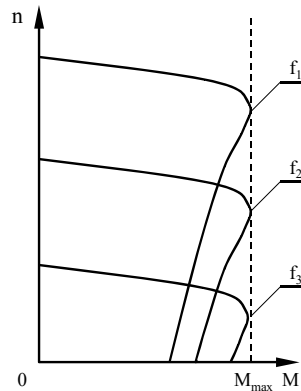
$$U_{1f} \approx E_1 = c f \phi . \quad (17)$$

Stąd wynika warunek stałości strumienia w maszynie ( $\phi = \text{const.}$ ):

$$\frac{U}{f} = \text{const.} \quad (18)$$

Oznacza to, że przemiennik częstotliwości przeznaczony do zasilania silnika asynchronicznego powinien być urządzeniem o regulowanym zarówno napięciu jak i częstotliwości.

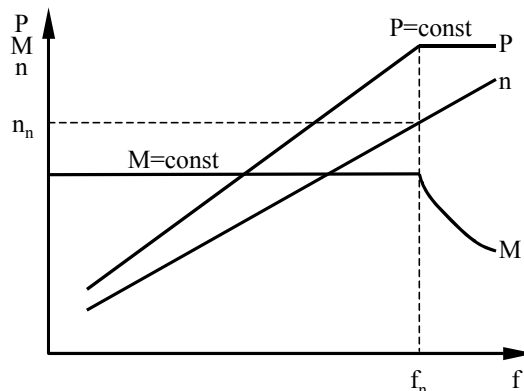
Charakterystyki mechaniczne silnika dla różnych częstotliwości napięcia zasilającego przy  $U/f = \text{const.}$  pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego trójfazowego dla różnych częstotliwości napięcia zasilającego przy zachowaniu warunku  $U/f = \text{const.}$

Warunek stałości strumienia magnetycznego może być zachowany przy powiększaniu częstotliwości a tym samym i wartości napięcia zasilającego do wartości znamionowych.

Przy stałym stosunku  $U/f$  regulacja prędkości obrotowej może odbywać przy stałym momencie a zmiennej mocy na wale. Dalszy wzrost prędkości obrotowej ponad prędkość znamionową może odbywać się tylko przez zmianę częstotliwości przy znamionowym napięciu zasilającym. Silnik pracuje wtedy w warunkach osłabienia pola magnetycznego przy stałej mocy, ale przy malejącym momencie (rys. 5)



Rys. 5. Charakterystyki regulacyjne silnika asynchronicznego trójfazowego zasilanego z przemiennika częstotliwości.

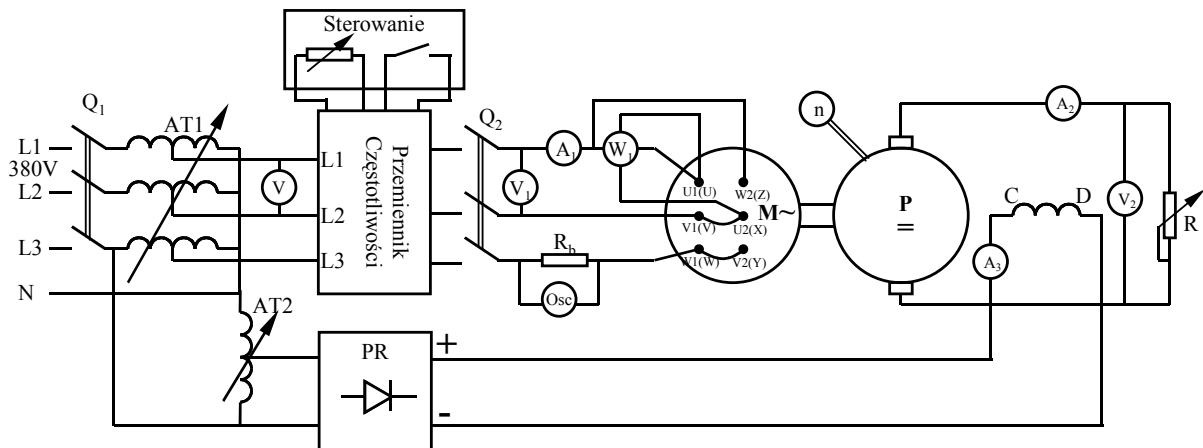
## 2. Wykonanie ćwiczenia

Część praktyczna ćwiczenia obejmuje:

- pomiary charakterystyk mechanicznych silnika dla kilku częstotliwości,
- regulację prędkości obrotowej przy stałym momencie.

### 2.1. Układ pomiarowy

Badania silnika trójfazowego zostaną przeprowadzone w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 6.



Rys. 6. Układ pomiarowy do badań silnika asynchronicznego trójfazowego przy zasilaniu z przebiegnika częstotliwości

Obwód badanego silnika trójfazowego M zasilany jest z przebiegnika częstotliwości zasilanego za pomocą autotransformatora trójfazowego AT. Woltomierz V służy do kontroli napięcia zasilającego przebiegnik częstotliwości, przy czym należy pamiętać, że stosowany model przebiegnika zbudowany jest na napięcie przewodowe (międzyfazowe) o wartości 220 V. Woltomierz  $V_1$  mierzy wartość skuteczną napięcia przewodowego zasilającego silnik. Występowanie napięcia i jego wartość uzależniona jest od załączenia włącznika sterującego pracą przebiegnika i położenia potencjometru regulacji częstotliwości. Amperomierz  $A_1$  mierzy prąd płynący w obwodzie jednej fazy silnika, zaś watomierz  $W_1$  moc pobieraną przez jedno uzwojenie silnika. Rezystor  $R_b$  zainstalowano w celu umożliwienia oglądania na ekranie oscyloskopu przebiegów prądu zasilającego silnik.

Do obciążenia silnika M zastosowano prądnicę bocznikową obcowzbudną prądu stałego P oddającą moc do rezystora wodnego R. Amperomierz  $A_2$  i woltomierz  $V_2$  mierzą parametry prądu w obwodzie twornika prądnicy P. Amperomierz  $A_3$  służy do pomiaru prądu w obwodzie wzbudzenia. Obwód wzbudzenia prądnicy prądu stałego zasilany jest poprzez autotransformator AT2 i prostownik PR.

Po zapoznaniu się z konfiguracją układu i poprawnością połączeń zestawić dane znamionowe maszyn w tabeli 1.

Tabela 1.

Wielkość	Jednostka	Silnik prądu zmiennego	Prądnicza hamownicza
Typ maszyny	-		
Moc P	kW		
Napięcie U	V		
Prąd I	A		
Obroty n	obr/min		
cos φ	-		-
Sprawność η	-		
Prąd wzbudzenia I <sub>m</sub>	A	-	
Rezystancja twornika prądniczy R <sub>th</sub>	Ω	-	

Na podstawie danych z tabliczki znamionowej silnika obliczyć:

moment: 
$$M_n = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi n} \quad [\text{N m, W, obr/s}];$$

sprawność: 
$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{P}{\sqrt{3}UI \cos \varphi} .$$

## 2.2. Rozruch układu pomiarowego

Wstępnie należy skontrolować, czy:

- wyłączniki Q<sub>1</sub> i Q<sub>2</sub> są wyłączone,
- autotransformatory AT1 i AT2 są ustawione na minimalną wartość napięcia wyjściowego,
- wyłącznik sterowania przemiennika jest w pozycji „wyłączony”,
- potencjometr sterowania przemiennika ustawiony jest na minimum,
- elektrody rezystora wodnego wynurzone są z wody.

Po sprawdzeniu poprawności ustawień w układzie należy:

- wyłącznikiem Q<sub>1</sub> znajdującym się na tablicy laboratoryjnej, podać napięcie przemiennie na autotransformatory AT1 i AT2,
- autotransformatorem AT1 ustawić wartość napięcia U=220 V zasilającego przemiennik częstotliwości (woltomierz V),
- autotransformatorem AT2 sprawdzić działanie obwodu wzbudzenia prądniczy hamowniczej (wymagany zakres regulacji I<sub>m</sub>=0÷I<sub>mn</sub>), sprawdzenie zakończyć nastawą I<sub>m</sub>=0,
- wyłącznikiem Q<sub>2</sub> przyłączyć silnik do przemiennika częstotliwości,
- załączyć przemiennik wyłącznikiem sterowania,
- za pomocą potencjometru sterowania przemiennikiem ustawić wartość częstotliwości napięcia zasilającego na 50 Hz (uzyskujemy w ten sposób tzw. rozruch częstotliwościowy silnika),
- zanurzyć częściowo elektrody rezystora wodnego,
- dokonać próbnego obciążenia silnika zwiększając autotransformatorem AT2 prąd wzbudzenia prądniczy hamowniczej (próbę zakończyć nastawą I<sub>m</sub>=0).

Tak uruchomiony układ gotowy jest do wykonywania pomiarów.



### 2.3. Pomiary charakterystyk mechanicznych

Charakterystyki mechaniczne  $n = f(M)$  przy  $U = \text{const.}$  ( $U$  – napięcie zasilające przemiennik częstotliwości) wyznaczyć dla trzech różnych częstotliwości zasilania silnika. Wartości częstotliwości  $f$  ustalić wspólnie z prowadzącym zajęcia.

Po nastawieniu zadanej częstotliwości  $f$  obciążać silnik przez zmianę prądu wzbudzenia prądnicy hamowniczej od biegu jałowego (prąd wzbudzenia  $I_m=0$  i wynurzone elektrody rezystora wodnego) do  $I=1,3 I_n$  ( $I_n$  – prąd znamionowy silnika).

W tym zakresie zmian obciążenia silnika należy wykonać po około 8 pomiarów dla poszczególnych częstotliwości. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w tabeli 2.

Uwaga: W czasie badań prąd obciążenia prądnicy hamowniczej nie może przekroczyć wartości znamionowej  $I_2 \leq 6,5 \text{ A}$ , natomiast napięcie na rezystorze wodnym nie może przekroczyć wartości  $U_2 \leq 300 \text{ V}$ .

Tabela 2.

Lp.	Pomiary						Obliczenia				
	$U_1$	$I_1$	$P_w$	$U_2$	$I_2$	$n$	$P_1$	$P$	$\eta$	$\cos\varphi$	$M$
	V	A	W	V	A	obr/min	W	W	%	-	Nm
$f_1 = \dots \text{ Hz}$											
1											
...											
8											
$f_2 = \dots \text{ Hz}$											
1											
...											
8											
$f_3 = \dots \text{ Hz}$											
1											
...											
8											

Moc  $P$  pobierana z przemiennika częstotliwości przez silnik  $M$ ;

$$P_1 = 3 \cdot P_w .$$

Moc oddawana przez prądnicę hamowniczą  $P_h$ ;

$$P_h = U_2 \cdot I_2 .$$

Strata mocy w tworniku prądnicy hamowniczej  $\Delta P_h$ ;

$$\Delta P_h = I_2^2 \cdot R_{th} .$$

Moc na wale silnika (bez uwzględnienia strat mechanicznych i strat w żelazie w prądnicy hamowniczej);

$$P = P_h + \Delta P_h .$$

Sprawność silnika trójfazowego zasilanego za pomocą przemiennika częstotliwości;

$$\eta = \frac{P}{P_1} \cdot 100 \% .$$

Moment napędowy  $M$  silnika trójfazowego;

$$M = \frac{P}{2\pi n},$$

gdzie:  $M$  – moment na wale badanego silnika, N·m;

$P$  – moc na wale silnika, W;

$n$  – prędkość obrotowa silnika, obr/s (Uwaga! W czasie pomiarów prędkość obrotowa rejestrowana jest w obr/min).

Na podstawie uzyskanych wyników badań należy:

- na wspólnym rysunku wykreślić charakterystyki mechaniczne  $n = f(M)$  oraz  $\eta = f(M)$  dla badanych częstotliwości  $f$ ,
- dla znamionowego momentu silnika opisać na charakterystykach wartości prędkości obrotowych  $n$  i wartości sprawności  $\eta$ ,
- porównanie otrzymanych wyników badań zestawić w tabeli 3,

Tabela 3.

	$M_n =$	Nm
$f$	$n$	$\eta$
Hz	obr/min	%

- przeprowadzić dyskusję otrzymanych wyników badań.

#### 2.4. Regulacja prędkości obrotowej

Badania regulacji prędkości obrotowej silnika trójfazowego za pomocą zmian częstotliwości będą realizowane przy stałym momencie.

Moment obciążenia wytwarzany w prądnicy hamowniczej ( $M = c_m \Phi I_2$ ) będzie stały jeżeli przy stałym co do wartości strumienia  $\Phi$  (stały prąd wzbudzenia  $I_3$  prądnicy hamowniczej) wartość prądu twornika  $I_2$  będzie utrzymywana na stałym poziomie.

Charakterystyki regulacyjne  $n = f(f)$  przy  $U = \text{const.}$  wyznaczyć dla trzech różnych momentów obciążenia silnika. Wartości momentu obciążenia (nastawy prądów  $I_2$  i  $I_3$  w obwodach prądnicy P) ustalić wspólnie z prowadzącym zajęcia.

W przypadku pierwszym, silnik M napędza nieobciążoną prądnicę hamowniczą ( $I_m = I_3 = 0$ ; wynurzone elektrody rezystora wodnego).

W przypadku drugim i trzecim, silnik M jest obciążony prądnicą hamowniczą P.

Zmieniając częstotliwość  $f$  zasilania silnika M w granicach podanych przez prowadzącego dokonać po 8 pomiarów wielkości zestawionych w tabeli 4:

- dla częstotliwości mniejszych i równych znamionowej częstotliwości silnika należy kierować się stałymi wartościami prądów w obwodzie prądnicy hamowniczej,
- dla częstotliwości wyższych niż znamionowa należy utrzymywać stałą wartość prądu uzwojenia badanego silnika  $I_1$  równą wartości, jaka wystąpiła przy  $f = 50$  Hz (zmiana wzbudzenia prądnicy hamowniczej).

Tabela 4.

Lp.	Pomiary							Obliczenia				
	$f$	$U_1$	$I_1$	$P_w$	$U_2$	$I_2$	$n$	$P_1$	$P$	$\eta$	$\cos\varphi$	$M$
	Hz	V	A	W	V	A	obr/min	W	W	%	-	Nm
$M_1 = 0 (I_2=0 \text{ A}; I_3=0 \text{ A})$												
1												
...												
8												
dla $f < f_n$ $M_2 = \text{const} (I_2 = \dots\dots\dots \text{ A}; I_3 = \dots\dots\dots \text{ A})$												
1												
...												
8												
dla $f < f_n$ $M_3 = \text{const} (I_2 = \dots\dots\dots \text{ A}; I_3 = \dots\dots\dots \text{ A})$												
1												
...												
8												

Na podstawie uzyskanych wyników badań należy:

- na jednym rysunku wykreślić charakterystyki regulacyjne  $n = f(f)$  dla wszystkich badanych obciążeń,
- na drugim rysunku wykreślić charakterystyki  $M, P = f(f)$  dla drugiego i trzeciego przypadku ( $M \neq 0$ ),
- przeprowadzić dyskusję otrzymanych wyników badań.

#### 2.5. Wykaz przyrządów i aparatów

Należy, zgodnie z wytycznymi podanymi w części ogólnej skryptu podać wszystkie przyrządy pomiarowe, urządzenia i aparaty wykorzystywane w ćwiczeniu.

#### Zagadnienia do samodzielnego opracowania

1. Budowa i zasada działania silnika.
2. Prędkość pola wirującego, prędkość obrotowa wirnika, poślizg, sposób wyznaczania prędkości obrotowej pola na podstawie znanych obrotów wirnika.
3. Charakterystyka mechaniczna silnika  $M = f(n)$ .
4. Sposoby regulacji prędkości obrotowej silnika.
5. Obliczanie mocy na wale na podstawie pomiarów próby obciążenia silnika.
6. Obliczanie momentu znamionowego na podstawie tabliczki znamionowej silnika.

Literatura: [ 10, 12, 16, 17 ]