

## ***Temat: Badanie 3-fazowego silnika indukcyjnego pierścieniowego – część II***

- 1. Wyznaczanie parametrów schematu zastępczego**
  - a. Pomiar rezystancji uzwojeń  $R_1$  i  $R_2$  prądem stałym;
  - b. Wyznaczenie przekładni napięciowej;
  - c. Próba zwarcia pomiarowego – wyznaczenie parametrów:  
 $Z_Z, R_Z, X_Z, R_2', X_{r1}, X_{r2}'$ ;
  - d. Próba idealnego biegu jałowego – wyznaczenie  $X_\mu, R_{Fe}$ .
  
- 2. Wyznaczenie charakterystyk momentu elektromagnetycznego  $T = f(n)$  dla różnych stanów pracy przy zasilaniu obniżonym napięciem bez dodatkowej rezystancji oraz z rezystancją dodatkową w obwodzie uzwojenia wirnika**

### **Dodatkowa część wykonywana indywidualnie w ramach sprawozdania**

Na podstawie obliczeń wykorzystujących schemat zastępczy silnika wykreślić w skali wykres fazorowy dla podanych przez prowadzącego wartości mocy na wale oraz poślizgu. Wyznaczyć przy wykorzystaniu wykresu fazorowego wartości napięcia zasilania silnika.

# Przebieg ćwiczenia

## 1. Czynności wstępne

Przed przystąpieniem do pomiarów zapoznać się z budową stanowiska. Spisać dane znamionowe badanego silnika z tabliczki znamionowej.

Dane znamionowe zestawić w tabeli.

$P_N$	..... [W]
$U_{1N}$	..... [V]
$U_{2N}$	..... [V]
$I_{1N}$	..... [A]
$I_{2N}$	..... [A]
$n_N$	..... [obr/min]
$f_N$	..... [Hz]

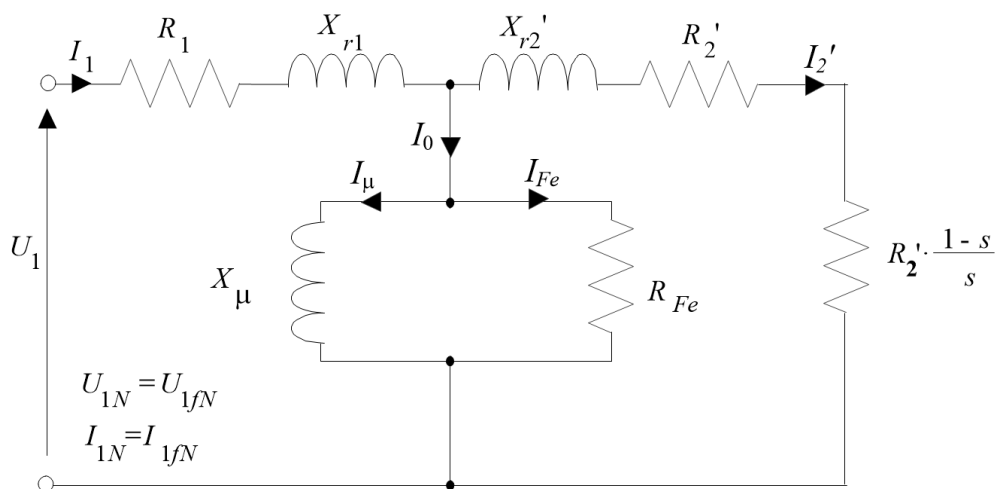
Na podstawie danych znamionowych obliczyć znamionową wartość  $T_N$  momentu na wale silnika z następującej zależności:

$$T_N = \frac{P_N}{\omega_N}$$

gdzie  $\omega_N = \frac{2\pi n_N}{60}$  jest to prędkość kątowna wirnika wyrażona w [rad/s].

## 2. Wyznaczanie parametrów schematu zastępczego

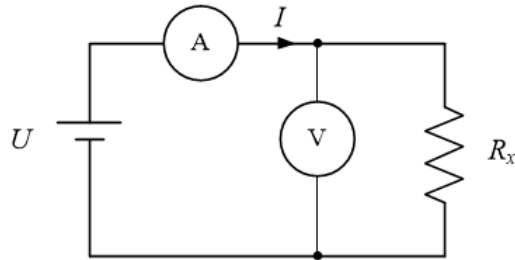
Na rys. 1 przedstawiono schemat zastępczy badanego silnika. Celem tego punktu jest wyznaczyć jego parametry na podstawie wyników pomiarów.



Rys. 1. Schemat zastępczy silnika indukcyjnego pierścieniowego

**a. Pomiar rezystancji uzwojeń  $R_1$  stojana oraz  $R_2$  wirnika**

Stosuje się metodę techniczną lub metody mostkowe. Należy zwrócić uwagę na to, aby podczas pomiaru rezystancji uzwojenia wirnika nie mierzyć jej łącznie z rezystancją przejścia na zestyku ślizgowym. Można to uzyskać mierząc wartość napięcia bezpośrednio na pierścieniach ślizgowych. Wymaganie to jest podyktowane dużą zmiennością rezystancji przejścia w funkcji prądu płynącego przez zestyk oraz prędkości wirowania pierścieni ślizgowych względem szczotek, przy czym rezystancja przejścia maleje wraz ze wzrostem prędkości oraz wzrostem wartości płynącego prądu. Pomiar rezystancji wirnika wykonuje się metodą techniczną poprawnie mierzonego napięcia, w układzie jak pokazano na rys. 2.



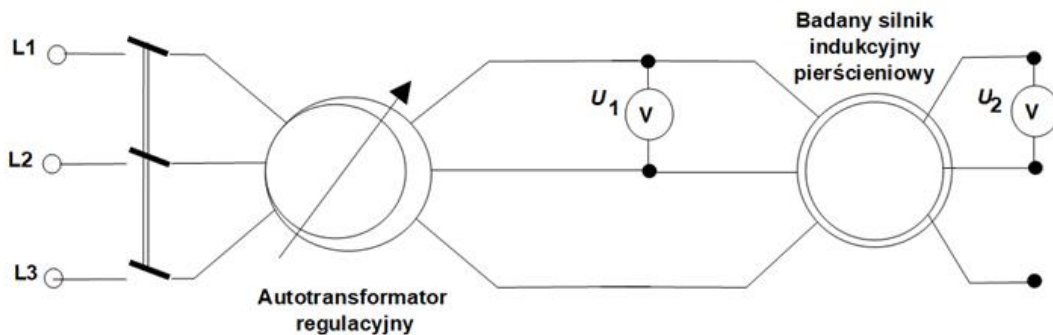
Rys. 2. Układ poprawnego pomiaru napięcia

Zmierzone wartości rezystancji zamieścić w tabeli:

$R_s$ – rezystancja uzwojenia stojana	..... [ $\Omega$ ]
$R_w$ – rezystancja uzwojenia wirnika zmierzona na pierścieniach ślizgowych	..... [ $\Omega$ ]
$R_{wp}$ – suma rezystancji uzwojenia wirnika i przewodów łączących	..... [ $\Omega$ ]

**b. Wyznaczenie przekładni napięciowej silnika**

Przekładnię napięciową silnika wyznacza się na podstawie pomiarów napięć zasilania stojana  $U_1$  oraz indukowanego w uzwojeniach nieruchomego wirnika  $U_2$ . Układ pomiarowy pokazano na rys. 2:



Rys. 2. Układ do pomiaru przekładni napięciowej

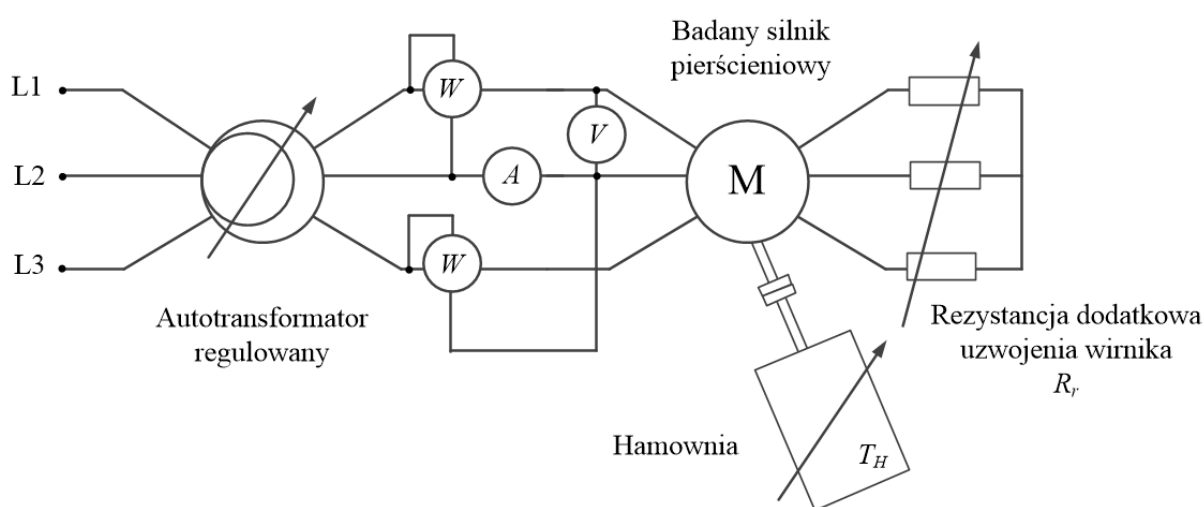
Próba powinna być wykonana przy napięciu obniżonym (mniejszym od napięcia znamionowego), dla którego nie występuje nasycenie obwodu magnetycznego silnika. Wartość przekładni napięciowej obliczamy ze wzoru:

$$g_u = \frac{U_1}{U_2}$$

**c. Próba zwarcia pomiarowego – wyznaczenie  $Z_Z, R_Z, X_Z, R_2', X_{r1}, X_{r2}'$**

Próbie zwarcia wykonuje się w celu wyznaczenia parametrów podłużnych schematu zastępczego (rys. 1) oraz w celu wyznaczenia krotności początkowej wartości prądu rozruchowego i przybliżonej wartości początkowej momentu rozruchowego silnika. W stanie zwarcia pomiarowego wał silnika powinien być mechanicznie zablokowany.

Układ pomiarowy pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Układ pomiarowy – próba biegu jałowego i zwarcia pomiarowego

Zmierzone wartości zamieścić w tabeli:

$U_Z$	$I_Z$	$P_1$	$P_2$	$T_H$
[V]	[A]	[W]	[W]	[kGm]
	$I_{1N}$			

Na podstawie wyników pomiarów wyznaczyć wielkości elektryczne i mechaniczne zamieszczone w tabeli.

$P_Z$	$\cos\phi_Z$	$\sin\phi_Z$	$Z_Z$	$R_Z$	$X_Z$	$T_H$	$T_R$
W	-	-	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[Nm]	[Nm]

gdzie:

– moc czynna pobierana przez silnik  $P_Z$  jest sumą wskazań obu watomierzy;

– współczynnik mocy:

$$\cos \varphi_Z = \frac{P_z}{\sqrt{3}U_z I_{1N}}$$

–  $Z_Z$ ,  $R_Z$ ,  $X_Z$  odpowiednio: impedancja, rezystancja i reaktancja zwarcia sprowadzone do napięcia pojedynczej fazy stojana.

Podział reaktancji zwarcia na reaktancję rozproszenia uzwojenia stojana  $X_{r1}$  oraz sprowadzoną reaktancję rozproszenia uzwojenia wirnika  $X_{r2}'$  jest procesem, który wymaga szczegółowych badań maszyny. W przybliżonych obliczeniach można założyć, że obydwie reaktancje mają równe wartości i przypisać im wartości równe połowie reaktancji zwarcia  $X_Z$ .

Podczas obliczeń parametrów schematu zastępczego wykorzystuje się wielkości napięcia i prądu w uzwojeniu pojedynczej fazy stojana. Wymaga to przeliczenia zmierzonych wartości napięcia i prądu silnika uwzględniającego sposób połączenia uzwojenia stojana.

Podział rezystancji  $R_Z$  zwarcia na rezystancję uzwojenia stojana  $R_1$  i sprowadzoną rezystancję uzwojenia wirnika  $R_2'$  wymaga uwzględnienia szeregu zjawisk prowadzących do otrzymania innej wartości rezystancji zwarcia wynikającej z próby zwarcia w porównaniu z wartością uzyskaną z sumowania rezystancji uzwojenia stojana i sprowadzonej rezystancji uzwojenia wirnika uzyskanych z pomiarów przy pomocy prądu stałego. Powodem tego zjawiska mogą być różne temperatury uzwojeń podczas pomiarów oraz zwiększanie rezystancji uzwojeń wywoływane występowaniem prądów wirowych w trakcie przepływu przez nie prądu zmiennego w czasie. Rozdziału rezystancji zwarcia dokonuje się dzieląc wartość rezystancji zwarcia wyznaczoną z próby zwarcia proporcjonalnie do rezystancji uzwojeń wyznaczonych przy pomocy prądu stałego  $R_{z\_st}$ . A zatem:

$$R_1 = R_Z \frac{R_S}{R_{z\_st}} \qquad R_2' = R_Z \frac{R_w'}{R_{z\_st}}$$

gdzie:

$$R_w' = R_{wp} \mathcal{G}_U^2 \qquad R_{z\_st} = R_s + R_w'$$

Zmierzony podczas próby zwarcia moment hamujący  $T_H$  może posłużyć do wyznaczenia przybliżonej wartości momentu rozruchowego  $T_R$ . Do jej wyznaczenia można wykorzystać znaną z teorii przybliżoną proporcjonalność momentu elektromagnetycznego dla określonej prędkości wirowania do kwadratu napięcia zasilania  $T \approx (U)^2$ .

Moment rozruchowy  $T_R$ :

$$T_R = T_H \left( \frac{U_{1N}}{U_Z} \right)^2$$

gdzie  $U_{1N}$  i  $U_Z$  są to wartości napięcia znamionowego oraz napięcia w stanie zwarcia pomiarowego silnika.

#### **d. Próba idealnego biegu jałowego – wyznaczenie $X_\mu$ , $R_{Fe}$**

Próba idealnego biegu jałowego różni się od rzeczywistego biegu jałowego tym, że straty mechaniczne silnika pokrywane są z odrębnego źródła napędowego. Próbę rozpoczyna się przy napięciu zasilania równym napięciu znamionowemu stosując układ połączeń taki jak

w trakcie próby zwarcia. Następnie zmniejsza się napięcie zasilania do wartości, gdy w uzwojeniu fazowym stojana popłynie prąd równy  $0,1I_N$ .

Wyniki pomiarów należy zestawić w poniższej tabeli:

Lp.	$U_0$	$I_0$	$P_1$	$P_2$	$T_H$
	[V]	[A]	[W]	[W]	[kGm]
1	$U_N$				
2					
...					
k	↓	$0,1I_N$			

Na podstawie pomiarów wyznacza się następujące parametry:

$E_0$  – siła elektromotoryczna uzwojenia stojana w stanie jałowym wyznaczona z napięcia fazowego  $U_1$  przez wektorowe pomniejszenie go o spadki napięcia na  $R_1$  oraz  $X_{r1}$  wywołane przepływem prądu stanu jałowego pojedynczej fazy uzwojenia stojana  $I_0$ .

$\Delta P_{Cu0}$  – straty w uzwojeniach stojana wywołane przepływem prądów stanu jałowego pojedynczych faz uzwojeń stojana  $I_0$  przez rezystancję  $R_1$ .

$\Delta P_{Fe}$  – straty w żelazie stojana wynikające z odjęcia od mocy biegu jałowego  $P_0$  strat w uzwojeniach stojana  $\Delta P_{Cu0}$ .

$R_{Fe}$  – zastępcza rezystancja reprezentująca straty w żelazie wyznaczona z siły elektromotorycznej  $E_0$  oraz składowej czynnej  $I_{Fe}$  prądu stanu jałowego pojedynczej fazy stojana  $I_0 \cdot \cos\varphi_0$

$X_\mu$  – reaktancja główna schematu zastępczego wyznaczona z siły elektromotorycznej  $E_0$  oraz składowej magnesującej  $I_\mu$  prądu stanu jałowego pojedynczej fazy stojana  $I_0 \cdot \sin\varphi_0$

Lp.	$P_0$	$\cos\varphi_0$	$\sin\varphi_0$	$\Delta P_{Cu0}$	$E_0$	$R_{Fe}$	$X_\mu$
	[W]	-	-	[W]	[V]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]
1							
2							
...							
k							

gdzie:

– moc czynna pobierana przez silnik  $P_0$  jest sumą wskazań obu watomierzy;

– współczynnik mocy:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_0 I_0}$$

### 3. Wyznaczenie charakterystyk momentu elektromagnetycznego $T=f(n)$ dla różnych stanów pracy przy zasilaniu obniżonym napięciem bez dodatkowej rezystancji oraz z rezystancją dodatkową w obwodzie uzwojenia wirnika

Wyznaczyć charakterystyki określające właściwości silnika w stanie obciążenia podczas pracy w warunkach obniżonego napięcia zasilania, równego napięciu zwarcia. Uzwojenie wirnika w trakcie próby jest zwarte (rezystancja dodatkowa uzwojenia wirnika  $R_{dw}=0$ ). Schemat pomiarowy pokazano na rys. 3. Badania powtarza się włączając dodatkową rezystancją w obwodzie uzwojenia wirnika ( $R_{dw} = var$ ).

Zmieniając wartość wytwarzanego momentu przez hamownię, wymusza się pracę maszyny badanej z prędkością zmieniającą się od  $-0,5$  prędkości synchronicznej przez zero (wykonując pomiary dla prędkości  $0(+)$  oraz  $0(-)$ ) do  $+1,5$  prędkości synchronicznej. Wymusza się w ten sposób trzy podstawowe stany pracy maszyny: pracę hamulcową (przeciw włączeniu), pracę silnikową oraz pracę generatorową (hamowanie z odzyskiem energii).

Wyniki pomiarów zestawień w tabeli.

L.p.	$U_s$	$I_s$	$n$	$T_H$	
	[V]	[A]	[obr/min]	[kGm]	
1			$-0,5 \cdot n_s$		<b>Uwaga:</b> Tabela wykorzystywana dwukrotnie dla obydwu cykli pomiarowych  I cykl pomiarów dla $R_{dw} = 0$  II cykl pomiarów dla $R_{dw} = var$
2					
3					
			$0(-)$		
			$0(+)$		
...					
			$n_k$		
			$n_s$		
$k-1$					
$k$			$1,5 n_s$		

Uzyskane wyniki pomiarów przelicza się na napięcie znamionowe zakładając, że wartość prądu dla konkretnej prędkości wirowania jest proporcjonalna do napięcia oraz wartość momentu elektromagnetycznego silnika jest proporcjonalna przy danej prędkości wirowania do kwadratu napięcia. Wartość momentu elektromagnetycznego silnika wyznacza

się korygując zmierzony moment hamowni o wartość momentu strat mechanicznych dodając go do momentu hamowni dla prędkości wirowania w kierunku zgodnym z wirowaniem pola i odejmując go dla prędkości wirowania w kierunku przeciwnym. Wartość momentu strat mechanicznych wyznacza się jako  $\frac{1}{2}$  skoku wartości momentu przy zmianie prędkości wirowania z  $0(-)$  na  $0(+)$ . Przeliczoną na znamionowe napięcie wartość momentu elektromagnetycznego można skorygować taką samą wartością momentu strat mechanicznych (nie zależy on od napięcia) uzyskując przybliżone wartości momentów maszyny dla napięcia znamionowego.

Wyniki obliczeń zestawia się w poniższej tabeli:

L.p.	$I_1(U_N)$	$T_{em}$	$T_{em}(U_N)$	$T(U_N)$	
	A	Nm	Nm	Nm	
1					<b>Uwaga:</b> Tabela wykorzystywana dwukrotnie dla obydwu cykli pomiarowych  I cykl pomiarów dla $R_{dw} = 0$  II cykl pomiarów dla $R_{dw} = \text{var}$  Moment strat mechanicznych  $T_{\Delta P_m} = \dots$
2					
3					
...					
$k-1$					
$k$					

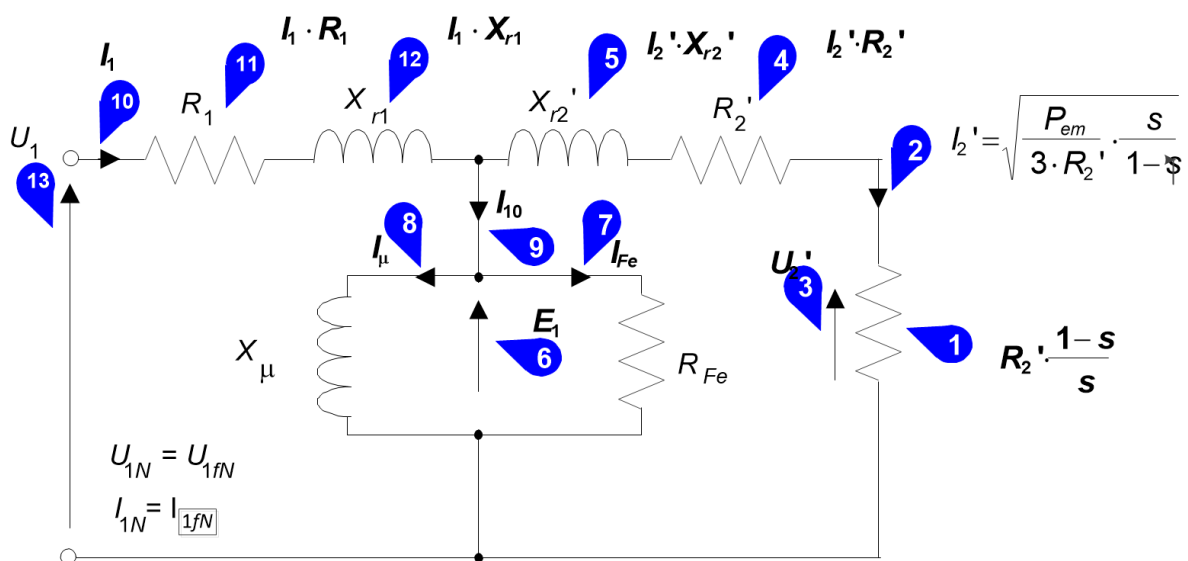
## Wyznaczanie wykresu fazorowego na podstawie schematu zastępczego

Dla podanych przez prowadzącego wartości mocy na wale oraz poślizgu należy wykreślić w skali wykres fazorowy.

W trakcie opracowywania tego punktu należy na podstawie podanych parametrów wyjściowych silnika określić wartości prądów, spadków napięć i w rezultacie wartość napięcia zasilania silnika. Podczas wyznaczania wartości niektórych wielkości można zastosować metodę graficzną. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń określić, czy w rozpatrywanym stanie pracy silnik znajduje się w stanie przeciążenia czy pracuje w granicach obciążeń dopuszczalnych.

Sugerowaną kolejność obliczeń oraz rysowania wykresu fazorowego przedstawiono na schemacie zastępczym poniżej.





### Przykładowe pytania kontrolne

1. Wymień i omów sposoby pomiaru rezystancji uzwojeń.
2. Co to jest przekładnia napięciowa?
3. Przedstaw schemat zastępczy maszyny indukcyjnej i opisz parametry tego schematu.
4. Co to jest próba zwarcia pomiarowego? Omów bilans mocy w tym stanie zwarcia silnika.
5. Co to jest próba idealnego biegu jałowego? Omów bilans mocy w stanie jałowym silnika
6. Narysuj charakterystykę mechaniczną maszyny indukcyjnej w zakresie pracy silnikowej, prądnicowej i hamulcowej. Zaznacz na osiach charakterystyczne wielkości.
7. W jakim zakresie wartości poślizgu maszyna indukcyjna pracuje, jako silnik, w jakim jako prądnica a w jakim jako hamulec.

### Literatura

1. T. Glinka, *Maszyny elektryczne i transformatory*, praca zbiorowa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2018
2. W. Przyborowski, G. Kamiński. *Maszyny elektryczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014
3. W. Latek, *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, 2007
4. H. Rawa, *Elektryczność i magnetyzm w technice*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001
5. Praca zbiorowa, *Poradnik inżyniera elektryka*, Tom 2, WNT Warszawa 2009