



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Kierunek studiów:
Elektrotechnika

Zbigniew Gawęcki

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

Zagadnienia wybrane maszyn elektrycznych

opracowane w ramach realizacji Projektu
**„Dostosowanie kształcenia
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb
współczesnej gospodarki”**
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki”
nr FERS.01.05-IP.08-0234/23



Spis treści

1. Moment elektromagnetyczny maszyny indukcyjnej asynchronicznej.....	3
2. Zakresy pracy maszyny indukcyjnej asynchronicznej	6
3. Bilans mocy i strat w maszynie indukcyjnej asynchronicznej	8
4. Przykład obliczeniowy	13
5. Pomiar rezystancji uzwojeń maszyny indukcyjnej pierścieniowej	19
6. Wyznaczanie charakterystyki magnesowania i przekładni napięciowej	21
7. Pomiary w stanie zwarcia maszyny pierścieniowej	22
8. Praca generatora indukcyjnego na sieć sztywną.....	26
9. Literatura	29



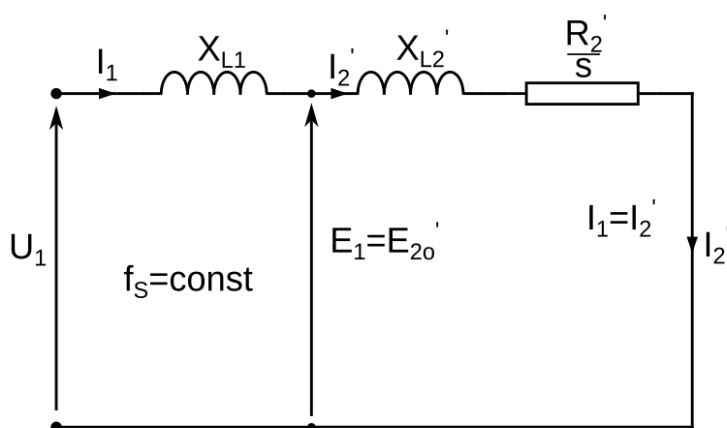
Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Moment elektromagnetyczny maszyny indukcyjnej asynchronicznej

W celu wyprowadzenia zależności na moment elektromagnetyczny maszyny indukcyjnej asynchronicznej wprowadza się następujące założenia upraszczające:

- pomija się rezystancję stojana R_1 ($R_1 \approx 0$);
- pomija się prąd biegu jałowego I_0 ($I_0 \approx 0$).



Rys. 1. Uproszczony schemat zastępczy maszyny indukcyjnej do wyznaczenia momentu elektromagnetycznego.

[Tekst alternatywny. Na rysunku przedstawiono uproszczony schemat zastępczy maszyny indukcyjnej asynchronicznej z parametrami sprowadzonymi na poziom stałej częstotliwości stojana f_s . Schemat zawiera reaktancję rozproszenia uzwojenia stojana i wirnika, oraz rezystancję uzwojenia wirnika podzieloną przez poślizg, tym samym uwzględnia zmiany częstotliwości w obwodzie wirnika związane ze zmianą obciążenia.]

Moc elektromagnetyczną przekazywaną ze stojana do wirnika można opisać zależnością:

$$P_\psi = m_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot (I_2')^2 \quad (1)$$

gdzie:

m_1 – liczba faz uzwojenia stojana, $m_1 = 1$ lub $m_1 = 3$;

R_2' – rezystancja fazowa wirnika przeliczona na stronę stojana;

I_2' – prąd fazowy wirnika;

s – poślizg

Moment mechaniczny na wale silnika jest równy:

$$T_{mech} = \frac{P_{out}}{\omega} \quad (2)$$

P_{mech} – moc mechaniczna;

ω – prędkość kątowna mechaniczna wirnika.

$$P_{out} = P_{mech} - \Delta P_{mech} \quad (3)$$

Zatem równanie na moment mechaniczny można zapisać w postaci:

$$T_{mech} = \frac{P_{out}}{\omega} = \frac{P_{mech}}{\omega} - \frac{\Delta P_{mech}}{\omega} \quad (4)$$

Na podstawie równań wyprowadzonych dla bilansu mocy i strat dla maszyny indukcyjnej asynchronicznej, wiadomo, że pomiędzy mocą mechaniczną a mocą wirującego pola elektromagnetycznego istnieje zależność:

$$P_{mech} = P_{\psi} \cdot (1 - s) \quad (5)$$

przy czym:

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \rightarrow \omega = \omega_s \cdot (1 - s) \quad (6)$$

ω_s – prędkość kątowna synchroniczna;

Równanie na moment mechaniczny na wale silnika można zapisać:

$$T_{mech} = \frac{P_{mech}}{\omega} - \frac{\Delta P_{mech}}{\omega} = \frac{P_{\psi} \cdot (1 - s)}{\omega_s \cdot (1 - s)} - \frac{\Delta P_{mech}}{\omega} \quad (7)$$

$$T_{mech} = \frac{P_{\psi}}{\omega_s} - \frac{\Delta P_{mech}}{\omega} = T_{el} - \Delta T_{mech} \quad (8)$$

gdzie:

$T_{el} = \frac{P_{\psi}}{\omega_s}$ - moment elektromagnetyczny;

$\Delta T_{mech} = \frac{\Delta P_{mech}}{\omega}$ – moment strat mechanicznych.

Moment mechaniczny na wale silnika T_{mech} jest mniejszy od momentu elektromagnetycznego T_{el} o wartość momentu strat mechanicznych ΔT_{mech} .

Dla maszyn indukcyjnych asynchronicznych o mocy powyżej 1kW, w obliczeniach inżynierskich, można przyjąć uproszczenie, że moment elektromagnetyczny jest równy momentowi na wale (pomija się moment strat mechanicznych $\Delta T_{mech} \approx 0$).

Moment elektromagnetyczny można wyznaczyć ze wzoru:

$$T_{el} = \frac{P_{\psi}}{\omega_s} = \frac{m_1}{\omega_s} \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot (I'_2)^2 \quad (9)$$

Na podstawie uproszczonego schematu zastępczego (rys.1) można wyznaczyć prąd twornika:

$$I'_2 \approx I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{L1} + X'_{L2})^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_K)^2}} \quad (10)$$

gdzie:

$X_K = X_{L1} + X'_{L2}$ - reaktancja zwarcia.

Po podstawieniu zależności na prąd wirnika do wzoru na moment elektromagnetyczny otrzymuje się:

$$T_{el} = \frac{m_1}{\omega_s} \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot (I'_2)^2 = \frac{m_1}{\omega_s} \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot \left(\frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_K)^2}} \right)^2 \quad (11)$$

$$T_{el} = \frac{m_1}{\omega_s} \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot (I'_2)^2 = \frac{m_1}{\omega_s} \cdot U_1^2 \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_K)^2} \quad (12)$$

Ostatecznie:

$$T_{el} = \frac{m_1}{\omega_s} \cdot U_1^2 \cdot \frac{sR'_2}{(R'_2)^2 + s^2(X_K)^2} \quad (13)$$

Aby wyznaczyć maksymalną wartość momentu elektromagnetycznego T_{el} względem poślizgu s należy obliczyć pochodną powyższej zależności:

$$\frac{dT_{el}}{ds} = \frac{m_1}{\omega_s} \cdot U_1^2 \cdot \frac{R'_2 \cdot ((R'_2)^2 + s^2(X_K)^2) - sR'_2 \cdot 2s(X_K)^2}{(R'_2)^2 + s^2(X_K)^2} \quad (14)$$

$$\frac{dT_{el}}{ds} = 0 \rightarrow R'_2((R'_2)^2 + s^2(X_K)^2) - 2s^2(X_K)^2 = 0 \quad (15)$$

$$R'_2((R'_2)^2 - s^2(X_K)^2) = 0 \rightarrow (R'_2)^2 - s^2(X_K)^2 = 0 \quad (16)$$

$$s^2 = \frac{(R'_2)^2}{(X_K)^2} \rightarrow s_K = \pm \frac{R'_2}{X_K} \quad (17)$$

s_K – poślizg krytyczny, dla którego moment elektromagnetyczny osiąga wartość maksymalną T_K .

W powyższym wzorze znak (+) dotyczy pracy silnikowej, znak (-) dotyczy pracy generatorowej.

Po podstawieniu otrzymanej zależności na poślizg krytyczny do wzoru na moment elektromagnetyczny otrzymuje się zależność na moment krytyczny:

Jeżeli uwzględnimy:

- związek pomiędzy prędkością kątową mechaniczną ω_s i elektryczną ω_e :

$$\omega_s = \frac{\omega_e}{p_b} = \frac{2\pi f_s}{p_b} \quad (18)$$



$\omega_e = 2\pi f_s$ – prędkość kątowna elektryczna zależna od częstotliwości napięcia zasilającego f_s .

p_b – liczba par biegunów magnetycznych uzwojenia stojana.

- związek pomiędzy reaktancją zwarcia a częstotliwością napięcia zasilającego f_s .

$$X_K = 2\pi f_s L_K \quad (19)$$

L_K – indukcyjność zwarcia.

Po podstawieniu zależności na prędkość kątową synchroniczną i na reaktancję zwarcia do wzoru na moment krytyczny otrzymuje się:

$$T_K = \pm \frac{m_1}{\frac{2\pi f_s}{p_b}} \cdot U_1^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot 2\pi f_s L_K} = \pm \frac{m_1 p_b}{8\pi^2 L_K} \left(\frac{U_1}{f_s} \right)^2 \quad (20)$$

Z powyższej zależności wynika, że moment krytyczny jest wprost proporcjonalny do kwadratu wartości skutecznej napięcia fazowego zasilającego stojan i odwrotnie proporcjonalny do kwadratu częstotliwości napięcia zasilającego.

Jeżeli zostanie zachowany stały stosunek:

$$\frac{U_1}{f_s} = \text{const.} \rightarrow T_K = \text{const.} \quad (21)$$

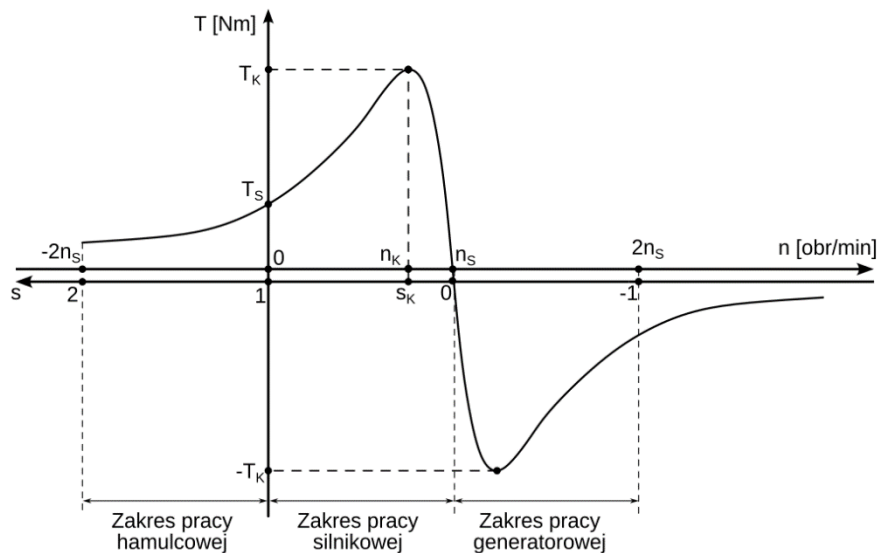
moment krytyczny będzie miał stałą wartość.

Stosunek momentu elektromagnetycznego dla dowolnego poślizgu do momentu maksymalnego określa wzór Klossa:

$$\frac{T_{el}}{T_K} = \frac{2}{\frac{s_K}{s} + \frac{s_K}{s}} \quad (22)$$

2. Zakresy pracy maszyny indukcyjnej asynchronicznej

Zależność momentu elektromagnetycznego od prędkości obrotowej n lub od poślizgu nazywa się charakterystyką mechaniczną maszyny indukcyjnej asynchronicznej.



Rys. 2. Charakterystyka mechaniczna maszyny indukcyjnej asynchronicznej.

[Tekst alternatywny. Na rysunku przedstawiono kształt charakterystyki mechanicznej dla trójfazowej symetrycznej maszyny indukcyjnej asynchronicznej. Na osi poziomej skierowanej w prawo zamieszczono prędkość wirowania wirnika, na drugiej osi poziomej skierowanej w lewo zamieszczono poślizg, natomiast na osi pionowej zamieszczono moment elektromagnetyczny. Na rysunku zaznaczono trzy zakresy pracy maszyny indukcyjnej asynchronicznej: hamulcową, silnikową i generatorową. Rysunek pozwala rozróżnić kierunek prędkości obrotowej wirnika i odpowiadającą mu wartość momentu elektromagnetycznego wytwarzanego dla danego zakresu pracy.]

Zakres pracy silnikowej

- kierunek prędkości obrotowej wirnika n taki sam jak kierunek wirowania pola elektromagnetycznego n_s ;
- prędkość obrotowa wirnika $0 \leq n \leq n_s$;
- poślizg $0 \leq s \leq 1$;
 $s=1$ – stan zwarcia ($n=0$);
 $s=0$ – stan idealnego biegu jałowego ($n=n_s$);

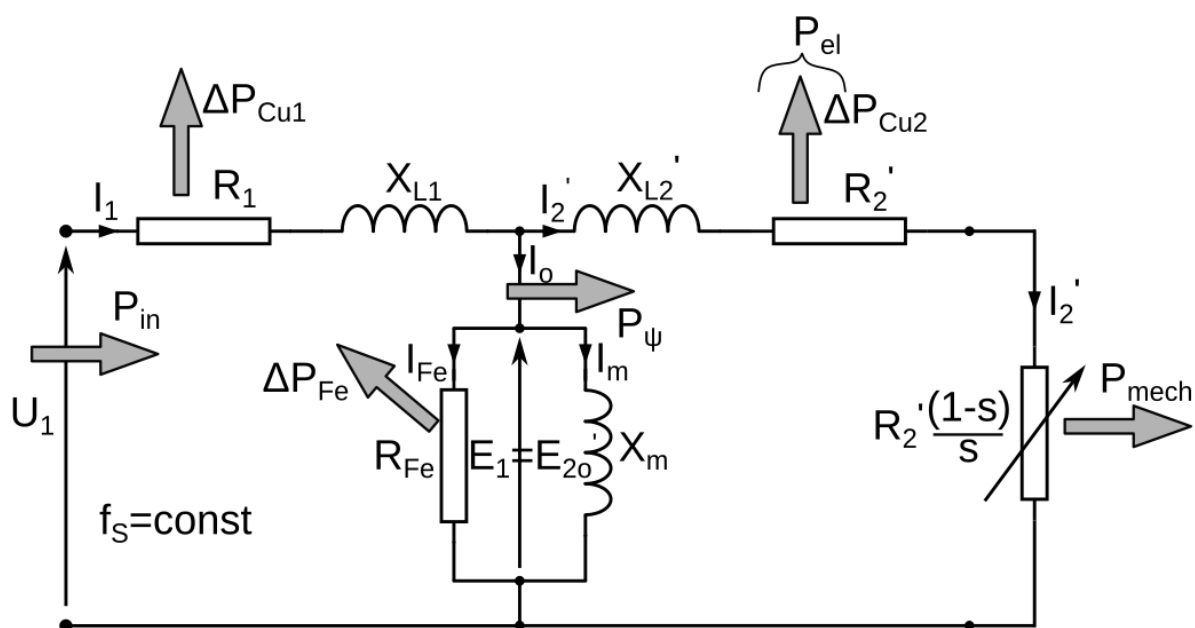
Zakres pracy generatorowej:

- kierunek prędkości obrotowej wirnika n taki sam jak kierunek wirowania pola elektromagnetycznego n_s ;
- prędkość obrotowa wirnika $n > n_s$;
- poślizg $s \leq 0$;

Zakres pracy hamulcowej

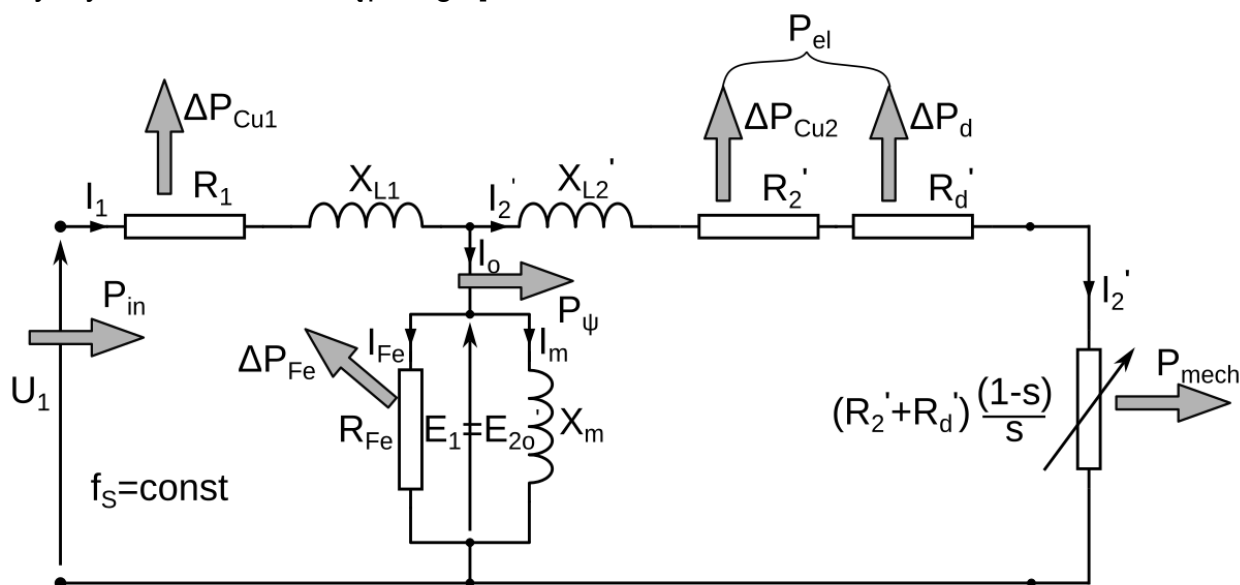
- kierunek prędkości obrotowej wirnika n przeciwny do kierunku wirowania pola elektromagnetycznego n_s ;

- Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki”
nr FERS.01.05-IP.08-0234/23



Rys. 4. Schemat zastępczy dla bilansu mocy i strat maszyny indukcyjnej klatkowej w stanie obciążenia dla pracy silnikowej ($0 < s < 1$).

[Tekst alternatywny. Na rysunku przedstawiono pełny schemat maszyny indukcyjnej asynchronicznej klatkowej pracującej w zakresie pracy silnikowej z oznaczeniami jak na rysunku poprzednim, dodatkowo zaznaczono kierunek przepływu mocy wejściowej, wirującego pola, mechanicznej oraz oznaczono straty mocy czynnej na elementach czynnych schematu zastępczego.]



Rys. 5. Schemat zastępczy dla bilansu mocy i strat maszyny indukcyjnej pierścieniowej z rezystancją dodatkową w obwodzie wirnika w stanie obciążenia dla pracy silnikowej ($0 < s < 1$).



[Tekst alternatywny. Na rysunku przedstawiono pełny schemat maszyny indukcyjnej asynchronicznej pierścieniowej pracującej w zakresie pracy silnikowej z dodatkową rezystancją włączoną w obwód wirnika z oznaczeniami jak na rysunku poprzednim, dodatkowo zaznaczono kierunek przepływu mocy wejściowej, wirującego pola, mechanicznej oraz oznaczono straty mocy czynnej na elementach czynnych schematu zastępczego.]

Moc pobrana z sieci przez maszynę indukcyjną asynchroniczną klatkową w zakresie pracy silnikowej opisuje zależność:

$$P_{in} = P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 \quad (1)$$

gdzie:

m_1 – liczba faz uzwojenia stojana, $m_1 = 1$ lub $m_1 = 3$;

U_1 – napięcie zasilające -wartość fazowa;

I_1 – prąd pobierany sieci – wartość fazowa;

$\cos\varphi_1$ – współczynnik mocy silnika,

φ_1 – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem U_1 i prądem I_1 .

Straty mocy czynnej w uzwojeniu stojana:

$$\Delta P_{Cu1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (2)$$

przy czym:

R_1 – rezystancja fazowa uzwojenia stojana;

Straty mocy czynnej w rdzeniu stojana:

$$\Delta P_{Fe} = m_1 \cdot R_{Fe} \cdot I_{Fe}^2 \quad (3)$$

gdzie:

R_{Fe} – rezystancja reprezentująca straty mocy czynnej w rdzeniu stojana;

I_{Fe} – składowa czynna prądu jałowego

Moc elektromagnetyczna lub moc wirującego pola magnetycznego przekazywana ze stojana do wirnika:

$$\Delta P_{\psi} = P_{in} - \Delta P_{Cu1} - \Delta P_{Fe} \quad (4)$$

Moc P_{ψ} dzieli się moc mechaniczną i moc elektryczną:

$$P_{\psi} = P_{mech} + P_{el} \quad (5)$$

Moc mechaniczna P_{mech} :

$$P_{mech} = m_1 \cdot (R'_2 + R'_d) \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right) \cdot (I'_2)^2 \quad (6)$$

Moc elektryczna:

$$P_{el} = m_1 \cdot (R'_2 + R'_d) \cdot (I'_2)^2 \quad (7)$$

Po podstawieniu:



$$P_{\psi} = P_{mech} + P_{el} = m_1 \cdot (R'_2 + R'_d) \cdot (I'_2)^2 \left(\frac{1-s}{s} + 1 \right) = P_{el} \cdot \frac{1}{s} \quad (8)$$

Otrzymuje się następujące zależności:

$$P_{el} = s \cdot P_{\psi} \quad (9)$$

oraz

$$P_{mech} = P_{el} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) = s \cdot P_{\psi} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) = P_{\psi} \cdot (1-s) \quad (10)$$

Maszyny asynchroniczne buduje się tak aby pracowały przy możliwie najmniejszym poślizgu s co powoduje minimalizację strat mocy czynnej w wirniku ($s \downarrow \rightarrow P_{el} \downarrow$) i zwiększenie skuteczności przetwarzania mocy pola wirującego P_{ψ} w moc mechaniczną P_{mech} ($s \downarrow \rightarrow P_{mech} \uparrow$).

Straty mocy czynnej w rdzeniu wirnika przy pracy silnikowej są pomijalnie, dla uproszczenia przyjmuje się:

$$\Delta P_{Fe2} \approx 0 \quad (11)$$

Moc wyjściowa – moc użyteczna:

$$P_{out} = P_{uż} = P_{mech} - \Delta P_{mech} \quad (12)$$

ΔP_{mech} – straty mechaniczne związane z wirowaniem wirnika.

Sprawność maszyny indukcyjnej asynchronicznej:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} - \Sigma \Delta P} \quad (13)$$

gdzie:

$$\Sigma \Delta P \approx \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + P_{el} \quad (14)$$

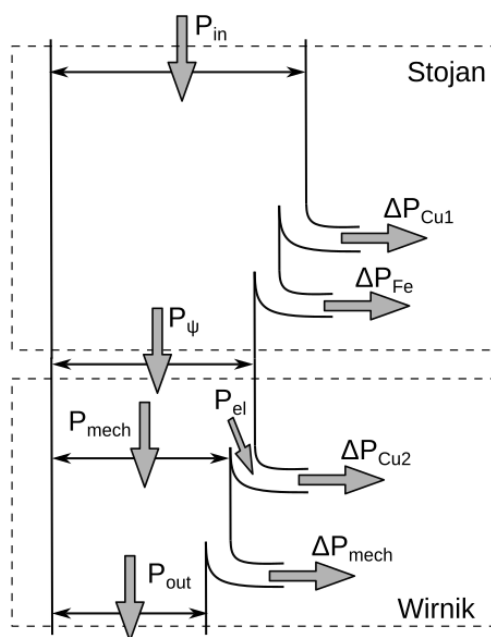
Moc pola wirującego można również opisać zależnościami związanymi z parametrami obwodu elektrycznego:

$$P_{\psi} = m_2 \cdot E_{2o} \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2 = m_2 \cdot E'_{2o} \cdot I'_2 \cdot \cos \psi_2 \quad (15)$$

przy czym:

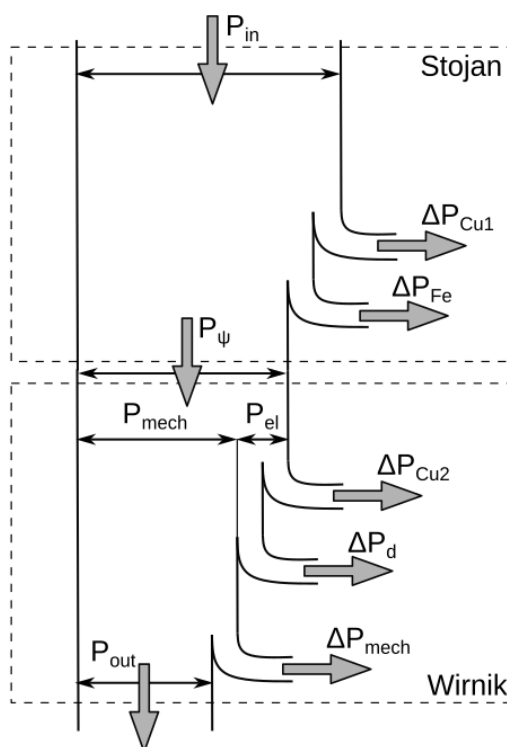
$\psi_2 = \arctg \frac{X_{L2}}{R_2}$ – kąt przesunięcia fazowego między napięciem E_{2o} a prądem I_2 .

W celu wizualizacji przepływu mocy czynnej i występujących strat mocy czynnej w maszynie indukcyjnej asynchronicznej w zakresie pracy silnikowej na rys.6. przedstawiono wykres strumieniowy zwany wykresem Sankey'a.



Rys. 6. Wykres Sankey'a - przepływ mocy i strat przy pracy silnikowej maszyny indukcyjnej klatkowej.

[Tekst alternatywny. Wykres przedstawia strumieniowy rozpływ mocy dla maszyny indukcyjnej klatkowej w zakresie pracy silnikowej. Największy strumień mocy wejściowej P_{in} jest pomniejszany o straty mocy czynnej na uzwojeniach stojana i straty mocy czynnej w rdzeniu stojana dając moc tzw. pola wirującego, która przenika ze stojana do wirnika. W wirniku generowane są straty w uzwojeniach oraz straty mechaniczne związane z ruchem obrotowym wirnika. Ostatecznie otrzymuje się strumień mocy wyjściowej P_{out} , który w porównaniu ze strumieniem mocy wejściowej P_{in} daje graficzną interpretację sprawności maszyny w zakresie pracy silnikowej.]



Rys. 7. Bilans mocy i strat przy pracy silnikowej maszyny indukcyjnej pierścieniowej w zakresie pracy silnikowej– wykres Sankey'a.

[Tekst alternatywny. Wykres przedstawia strumieniowy rozptył mocy dla maszyny indukcyjnej pierścieniowej w zakresie pracy silnikowej z dodatkową rezystancją włączoną w obwód wirnika. Jak widać na powyższym rysunku, włączenie dodatkowej rezystancji w obwód wirnika, oprócz możliwości regulacji prędkości obrotowej, lub wpływania na poziom momentu i prądu rozruchowego przy pracy silnikowej maszyny indukcyjnej pierścieniowej, jest dodatkowym źródłem strat mocy czynnej negatywnie wpływającym na sprawność maszyny.]

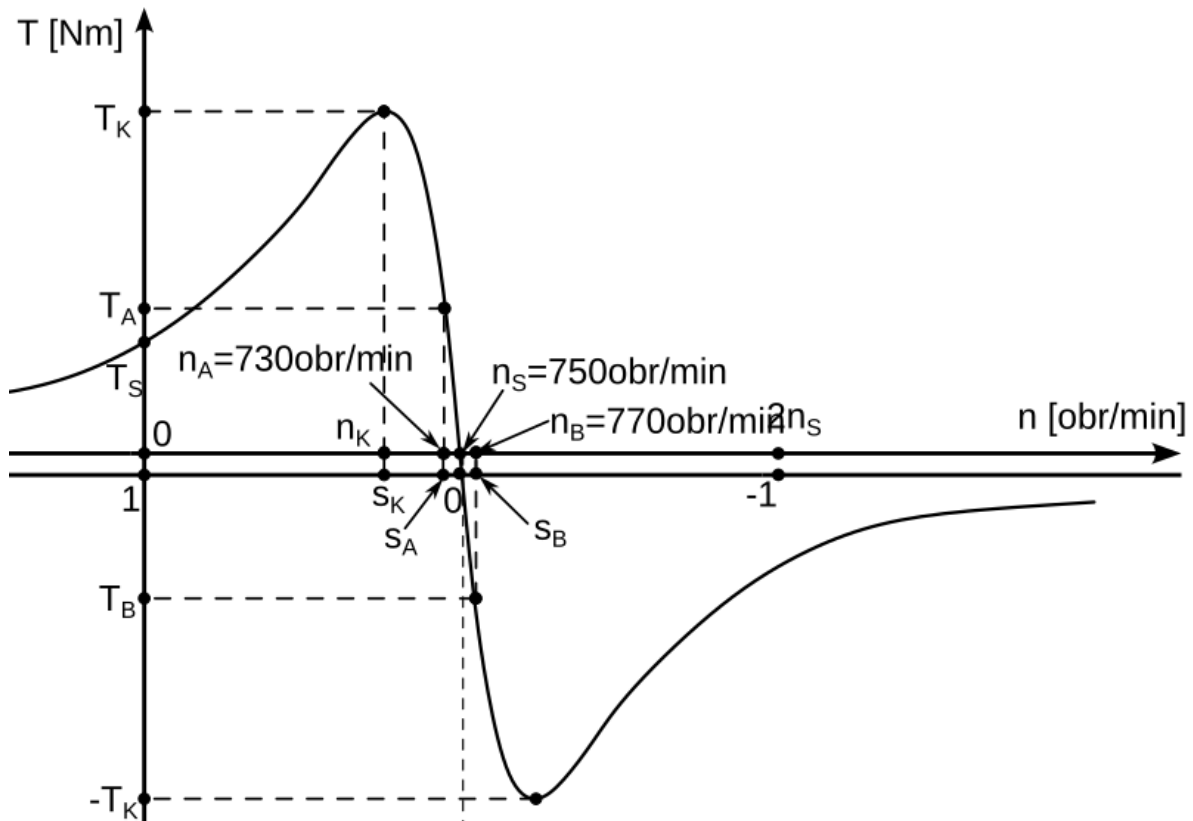
4. Przykład obliczeniowy

Maszyna indukcyjna pierścieniowa trójfazowa o następujących danych znamionowych: moc znamionowa $P_N=1\text{MW}$, napięcie znamionowe stojana $U_{1N}=6\text{kV(Y)}$, prąd znamionowy stojana $I_{1N}=123\text{A}$, częstotliwość znamionowa $f_{SN}=50\text{Hz}$, rezystancja uzwojenia stojana (fazowa) $R_1=0.5\Omega$, prąd znamionowy wirnika $I_{2N}=730\text{A}$, rezystancja uzwojenia wirnika (fazowa) $R_2=740\text{m}\Omega$, przeciążalność znamionowa $\lambda_N=2.4$, liczba par biegunów $p_b=4$. Maszynę podłączono do sieci o danych: $U_S=U_{SN}$, $f_S=f_{SN}$, pierścienie wirnika zostały zwarte ($R_{rd}=0$).

Sporządzić bilans mocy i strat dla następujących przypadków:

- prędkość wirowania wirnika $n_A=730\text{obr/min}$ (w kierunku zgodnym z kierunkiem wirowania pola magnetycznego) przy prądzie płynącym w uzwojeniu stojana $I_{1A}=100\text{A}$,
- prędkość wirowania wirnika $n_B=770\text{obr/min}$ (w kierunku zgodnym z kierunkiem wirowania pola magnetycznego) przy prądzie płynącym w uzwojeniu stojana $I_{1B}=100\text{A}$.

W obliczeniach pominąć prąd biegu jałowego $I_0=0$ oraz przyjąć straty mechaniczne $\Delta P_m=0$.



Rys. 8. Charakterystyka mechaniczna maszyny pierścieniowej dla zadanych warunków pracy.

[Tekst alternatywny. Wykres przedstawia charakterystykę mechaniczną maszyny indukcyjnej pierścieniowej dla pracy silnikowej i generatorowej. Na wykresie zaznaczono podane w zadaniu prędkości obrotowe wirnika 730obr/min dla pracy silnikowej i 770obr/min dla pracy generatorowej i odpowiadające im, poślizgi i momenty. Dodatni moment oznaczony jako T_A to moment generowany przez maszynę – czyli jest to praca silnikowa, z kolei moment oznaczony jako T_B]

Straty mocy czynnej w uzwojeniu wirnika:

$$\Delta P_{Cu2A} = m_2 * R_2 * (I_{2A})^2 = m_2 * R'_2 * (I'_{2A})^2$$

$I_{2A} = ?$



Jeżeli

$$I_o = 0 \rightarrow R_{Fe} = \infty \rightarrow$$

$$I_{2A} = I_{1A} * \vartheta_i$$

Przekładnia prądowa silnika pierścieniowego:

$$\vartheta_i = \frac{I_{2N}}{I_{1N}} = \frac{730}{123} = 5.935$$

Prąd fazowy wirnika:

$$I_{2A} = I_{1A} * \vartheta_i = 100 * 5.935 = 593.5A$$

$$\Delta P_{Cu2A} = m_2 * R_2 * (I_2)^2 = m_2 * R'_2 * (I'_2)^2 = 3 * 0.0084 * (593.5)^2 = 8876.5W$$

Straty mocy czynnej na rezystancji dodatkowej włączonej w obwód wirnika

$$\Delta P_{dA} = m_2 * R_{dA} * (I_2)^2$$

$$R_{dA} = 0; \rightarrow \Delta P_{dA} = 0$$

Moc mechaniczna

$$P_{mechA} = m_2 * (R_2 + R_{dA}) * \frac{1 - s_A}{s_A} * (I_{2A})^2$$

$s_A = ?$

Poślizg dla zadanych warunków zadania:

$$s_A = \frac{n_{SN} - n_A}{n_{SN}}$$

Prędkość synchroniczna dla znamionowej częstotliwości:

$$n_{SN} = \frac{60 * f_{SN}}{p_b} = \frac{60 * 50}{4} = 750 \frac{obr}{min}$$

$$s_A = \frac{n_{SN} - n_A}{n_{SN}} = \frac{750 - 730}{750} = 0.027$$

$$P_{mechA} = 3 * (0.0084 + 0) * \frac{1 - 0.027}{0.027} * (593.5)^2 = 319880W$$

Moc użyteczna:

$$P_{outA} = P_{mechA} - \Delta P_{mechA}$$

$$\Delta P_{mechA} = 0$$

$$P_{outA} = P_{mechA}$$

Moc wirującego pola

$$P_{mechA} = P_{\psi A} - \Delta P_A = P_{\psi A} - \Delta P_{Cu2A} - \Delta P_{dA}$$

$$P_{\psi A} = P_{mechA} + \Delta P_{Cu2A} + \Delta P_{dA}$$

$$P_{mechA} = (1 - s_A) * P_{\psi A}$$

$$P_{\psi A} = 319880 + 8876.5 = 328760W$$

$P_{\psi A} > 0$ – praca silnikowa

Straty w rdzeniu stojana

$$I_o = 0 \rightarrow \Delta P_{Fe} = 0$$

Straty mocy czynnej w uzwojeniu stojana

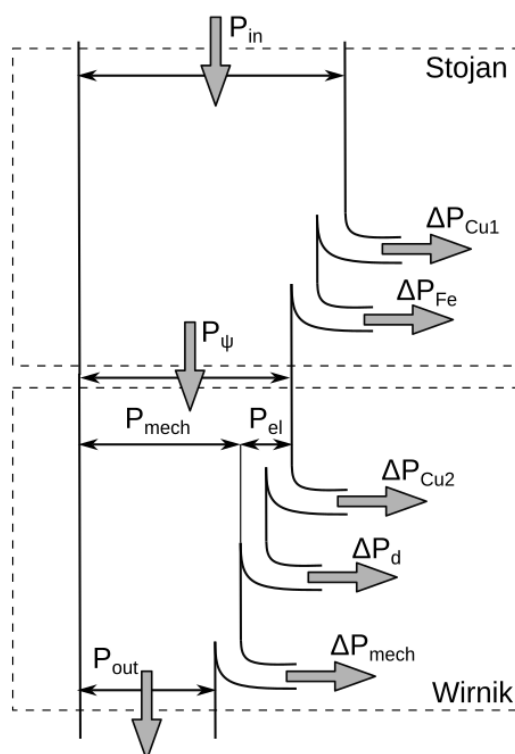
$$\Delta P_{Cu1} = m_1 * R_1 * (I_{1A})^2 = 3 * 0.5 * (100)^2 = 15000W$$

Moc czynna pobrana z sieci:

$$P_{inA} = \Delta P_{Cu1A} + \Delta P_{FeA} + P_{\psi A} = 15000 + 0 + 328760 = 343760W$$

Sprawność silnika:

$$\eta_{MA} = \frac{P_{outA}}{P_{inA}} = \frac{P_{inA} - \Delta P_A}{P_{inA}} = \frac{P_{mechA}}{P_A} = \frac{319880}{343760} = 0.9305$$



Rys. 9. Wykres Sankey'a dla maszyny pierścieniowej dla pracy silnikowej – ppkt. A.



[Tekst alternatywny. Na rysunku przedstawiono strumieniowy rozptyw mocy dla maszyny indukcyjnej pierścieniowej pracującej w zakresie pracy silnikowej dla warunków zadania określonych w punkcie a) zadania.]

Obliczenia dla podpunktu B

Straty mocy czynnej w uzwojeniu wirnika:

$$\Delta P_{Cu2B} = m_2 * R_2 * (I_{2B})^2$$

$$I_{2B} = ?$$

Jeżeli

$$I_o = 0 \rightarrow R_{Fe} = \infty \rightarrow$$

$$I_{2B} = I_{2B} * \vartheta_i$$

Przekładnia prądowa silnika pierścieniowego:

$$\vartheta_i = \frac{I_{2N}}{I_{1N}} = \frac{730}{123} = 5.935$$

Prąd fazowy wirnika:

$$I_{2B} = I_{2B} * \vartheta_i = 100 * 5.935 = 593.5A$$

$$\Delta P_{Cu2B} = m_2 * R_2 * (I_{2B})^2 = 3 * 0.0084 * (593.5)^2 = 8876.5W$$

Straty mocy czynnej na rezystancji dodatkowej włączonej w obwód wirnika

$$\Delta P_{dB} = m_2 * R_{dB} * (I_{2B})^2$$

$$R_{dB} = 0; \rightarrow \Delta P_{dB} = 0$$

Moc mechaniczna

$$P_{mechB} = m_2 * (R_2 + R_{dB}) * \frac{1 - s_B}{s_B} * (I_{2B})^2$$

$$s_B = ?$$

Poślizg dla zadanych warunków zadania:

$$s_B = \frac{n_{SN} - n_B}{n_{SN}}$$

Prędkość synchroniczna dla znamionowej częstotliwości:

$$n_{SN} = 750 \frac{obr}{min}$$

$$s_B = \frac{n_{SN} - n_B}{n_{SN}} = \frac{750 - 770}{750} = -0.027$$

$$P_{mechB} = 3 * (0.0084 + 0) * \frac{1 - (-0.027)}{0.027} * (593.5)^2 = -337640W$$

Moc dostarczona do generatora:

$$P_{inB} = P_{mechB} + \Delta P_{mechB}$$

$$\Delta P_{mechB} = 0$$

$$P_{inB} = P_{mechB}$$

Moc wirującego pola

$$P_{mechB} = P_{\psi B} - \Delta P_{rdB} = P_{\psi B} - \Delta P_{Cu2B} - \Delta P_{dB}$$

$$P_{\psi B} = P_{mechB} + \Delta P_{Cu2B} + \Delta P_{dB}$$

$$P_{\psi B} = (1 - s_B) * P_{mechB}$$

$$P_{\psi B} = -337640 + 8876.5 = -328760W$$

$P_{\psi B} < 0$ – praca generatorowa

Straty w rdzeniu stojana

$$I_o = 0 \rightarrow \Delta P_{FeB} = 0$$

Straty mocy czynnej w uzwojeniu stojana

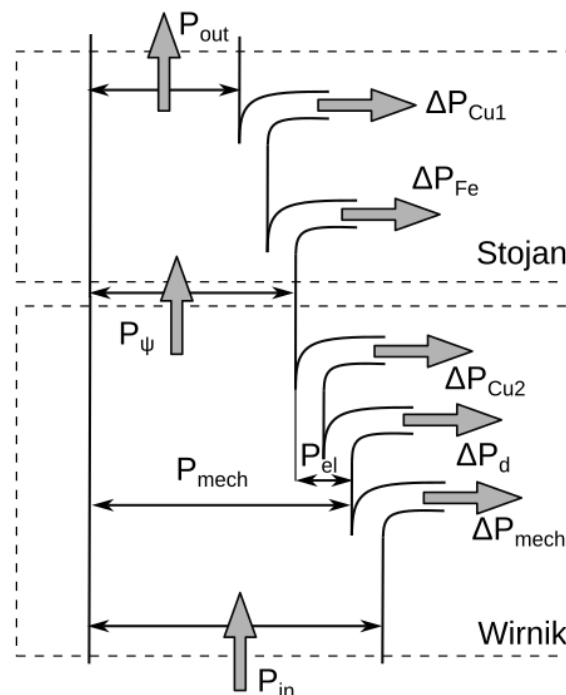
$$\Delta P_{Cu1B} = m_1 * R_1 * (I_{1B})^2 = 3 * 0.5 * (100)^2 = 15000W$$

Moc czynna oddana do sieci:

$$P_{outB} = \Delta P_{Cu1B} + \Delta P_{FeB} + P_{\psi B} = 15000 + 0 + (-328760) = -313760W$$

Sprawność generatora:

$$\eta_B = \frac{P_{outB}}{P_{inB}} = \frac{P_{inB} - \Delta P_B}{P_{inB}} = \frac{P_{mechB}}{P_B} = \frac{-313760}{-337640} = 0.9263$$



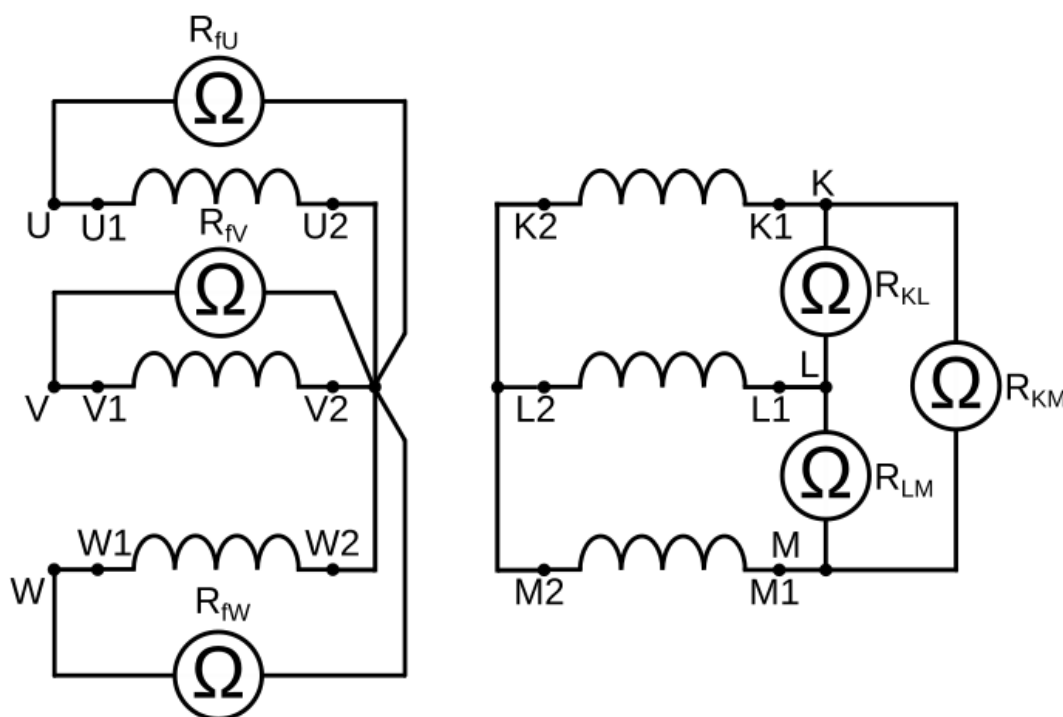
Rys. 10. Wykres Sankey'a dla maszyny pierścieniowej dla pracy silnikowej – ppkt B.

[Tekst alternatywny. Na rysunku przedstawiono strumieniowy rozpływ mocy dla maszyny indukcyjnej pierścieniowej pracującej w zakresie pracy generatorowej dla warunków zadania określonych w punkcie b) zadania.]

5. Pomiar rezystancji uzwojeń maszyny indukcyjnej pierścieniowej

Pomiar rezystancji uzwojeń maszyny indukcyjnej może zostać zrealizowany z wykorzystaniem:

- metody technicznej,
- metody mostkowej,
- miernika małych rezystancji.



Rys. 11. Schemat układu do pomiaru rezystancji uzwojeń stojana i wirnika silnika pierścieniowego.

[Tekst alternatywny. Na rysunku przedstawiono schemat do pomiaru rezystancji uzwojenia stojana i wirnika maszyny pierścieniowej. Przy pomiarze rezystancji uzwojeń stojana zazwyczaj dostępne są początki i końce poszczególnych uzwojeń oznaczone na rysunku jako U1, U2, V1, V2, W1, W2, w związku z tym dokonuje się bezpośredniego pomiaru rezystancji fazowej. W celu uniknięcia przypadkowych błędów każdy pomiar wykonuje się trzykrotnie. W przypadku pomiaru rezystancji

wirnika zazwyczaj dostępne są jedynie początki uzwojeń, na rysunku oznaczone jako K1, L1, M1, w związku z tym dokonuje się pomiaru rezystancji dwóch faz.]

Wyniki pomiarów zamieszcza się w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów rezystancji uzwojeń stojana i wirnika maszyny indukcyjnej pierścieniowej.

	Stojan			Wirnik		
Lp	$R_{fU} [\Omega]$	$R_{fV} [\Omega]$	$R_{fW} [\Omega]$	$R_{KL} [\Omega]$	$R_{LM} [\Omega]$	$R_{MK} [\Omega]$
1						
2						
3						
	R_{fUav}	R_{fVav}	R_{fWav}	R_{KLav}	R_{LMav}	R_{MKav}
	$R_{fS} [\Omega]$			$R_{fR} [\Omega]$		

Gdzie:

$$R_{fUav} = \frac{R_{fU(1)} + R_{fU(2)} + R_{fU(3)}}{3} [\Omega]; \quad (16)$$

R_{fVav}, R_{fWav} – oblicza się jak R_{fUav}

Rezystancja fazowa uzwojenia stojana silnika pierścieniowego:

$$R_{fS} = \frac{R_{fUav} + R_{fVav} + R_{fWav}}{3} [\Omega] \quad (17)$$

Rezystancję poszczególnych faz uzwojeń wirnika wyznaczamy stosując taką samą procedurę.

Rezystancję uzwojeń maszyny pierścieniowej można wyznaczyć również na podstawie danych znamionowych odczytanych z tabliczki znamionowej.

W przypadku rezystancji fazowej uzwojenia stojana wykorzystuje się zależność:

$$R_{fS} = \frac{P_N}{m_S \cdot I_{SN}^2} \cdot \frac{n_{SN} - n_N}{n_N} [\Omega] \quad (18)$$

Natomiast w przypadku fazowej rezystancji uzwojenia wirnika

$$R_{fR} = \frac{P_N}{m_R \cdot I_{RN}^2} \cdot \frac{n_{SN} - n_N}{n_N} [\Omega] \quad (19)$$

gdzie:

P_N – moc znamionowa odczytana z tabliczki znamionowej,

I_{SN} – znamionowy prąd stojana odczytany z tabliczki znamionowej,

I_{RN} – znamionowy prąd wirnika odczytany z tabliczki znamionowej,

n_N – znamionowa prędkość obrotowa odczytana z tabliczki znamionowej,

n_{SN} – znamionowa prędkość synchroniczna

m_S, m_R – liczba faz stojana i wirnika.

Jeżeli pomiary rezystancji uzwojeń stojana i wirnika maszyny pierścieniowej zostały wykonane w danej temperaturze T_P otoczenia wówczas należy dokonać przeliczenia rezystancji uzwojeń na umowną temperaturę odniesienia $T_0=20^\circ\text{C}$ według zależności:

Strona 20 z 29

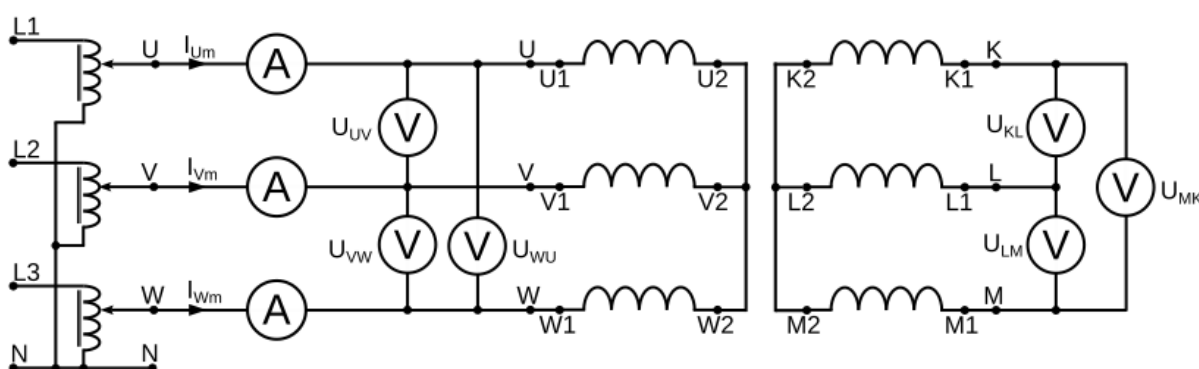
$$R_{20} = R_P \frac{235 + 20}{235 + T_P} \quad (20)$$

gdzie:

R_P – rezystancja zmierzona w danej temperaturze,

T_P – temperatura w której zostały wykonane pomiary.

6. Wyznaczanie charakterystyki magnesowania i przekładni napięciowej



Rys. 12. Schemat układu do wyznaczania charakterystyki magnesowania i przekładni napięciowej maszyny indukcyjnej pierścieniowej.

[Tekst alternatywny. Na rysunku przedstawiono układ pomiarowy zawierający trójfazowy autotransformator, uzwojenia stojana połączone w gwiazdę (zwarte końce uzwojeń U2, V2, W2) zasilone z autotransformatora, oraz uzwojenia wirnika połączone w gwiazdę (zwarte końce uzwojeń K2, L2, M2), początki uzwojenia wirnika K1. L1, M1 są rozwarte. Układ po stronie stojana maszyny pierścieniowej zawiera trzy amperomierze do pomiaru fazowych prądów magnesujących, oraz trzy woltomierze do pomiaru napięć międzyfazowych. Po stronie wirnika włączone są trzy woltomierze mierzące napięcia międzyfazowe wirnika.]

Wyniki pomiarów zamieszcza się w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pomiarów dla wyznaczenia ch-ki magnesowania i przekładni napięciowej.

	I_{Um}	I_{Vm}	I_{Wm}	U_{UV}	U_{VW}	U_{WU}	U_{KL}	U_{LM}	U_{MK}
L_p	dz/A	dz/A	dz/A	dz/V	dz/V	dz/V	dz/V	dz/V	dz/V
1									
8									

Sposób przeprowadzenia pomiarów:

1. Wirnik maszyny pierścieniowej jest rozarty.
2. Uzwojenie stojana zasilane się regulowanym napięciem (autotransformator) w zakresie $U_S=0 \div U_{SN}$
 U_{SN} – znamionowa wartość napięcia zasilającego stojan odczytana z tabliczki znamionowej dla danego połączenia uzwojeń stojana (gwiazda lub trójkąt). Należy odczytywać wskazania woltomierzy i amperomierzy
3. Pomiary wykonuje się jedynie zwiększając wartość napięcia zasilającego (jednokierunkowo, magnesowanie obwodu).

Na podstawie wyników pomiarów wyznacza się dla każdego punktu pomiarowego:
Średnią wartość prądu magnesującego:

$$I_m = \frac{I_{Um} + I_{Vm} + I_{Wm}}{3} \quad (21)$$

Średnią wartość (międzyfazową) napięcia zasilającego stojan:

$$U_S = \frac{U_{UV} + U_{VW} + U_{WU}}{3} \quad (22)$$

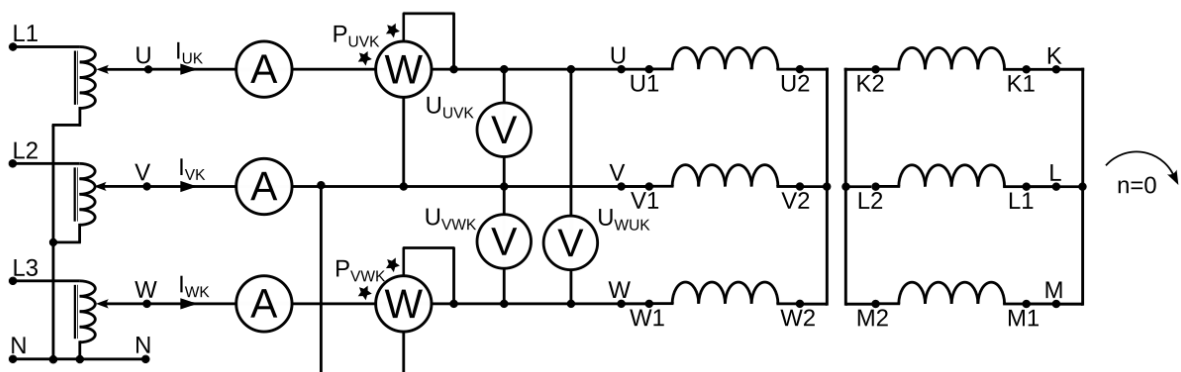
Średnią wartość (międzyfazową) napięcia wyindukowanego w wirniku:

$$U_R = \frac{U_{KL} + U_{LM} + U_{MK}}{3} \quad (23)$$

Przekładnię napięciową silnika pierścieniowego:

$$K_u = \frac{U_S}{U_R} \quad (24)$$

7. Pomiary w stanie zwarcia maszyny pierścieniowej



Rys. 13. Schemat układu do pomiarów w stanie zwarcia.

[Tekst alternatywny. Na rysunku przedstawiono układ pomiarowy do pomiarów stanu zwarcia maszyny indukcyjnej pierścieniowej, w trakcie którego wirnik jest zwarty i mechanicznie unieruchomiony $n=0$. Układ zawiera regulowane trójfazowe źródło napięcia przemiennego (autotransformator) z którego zasilane jest uzwojenie stojana. W obwód włączone są trzy amperomierze do pomiaru prądów zwarcia, trzy



woltomierze do pomiaru napięć międzyfazowych i dwa watomierze do pomiaru mocy pobieranej przez maszynę w stanie zwarcia.]

Wyniki pomiarów zamieszcza się w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki pomiarów dla stanu zwarcia maszyny indukcyjnej pierścieniowej.

	I_{UK}	I_{VK}	I_{WK}	U_{UVK}	U_{VWK}	U_{WUK}	P_{UVK}	P_{VWK}
L_p	dz/A	dz/A	dz/A	dz/V	dz/V	dz/V	dz/W	dz/W
1								

Sposób przeprowadzenia pomiarów w stanie zwarcia **laboratoryjnego**:

1. Wirnik maszyny pierścieniowej należy zewrzeć i mechanicznie zablokować ($n=0$).
2. Stojan maszyny należy zasilić regulowanym napięciem trójfazowym (autotransformator) o wartości, która powoduje przepływ prądu zwarcowego o wartości nie większej niż $1.3 \cdot I_{SN}$.
3. Dokonuje się odczytu napięć (woltomierze), prądów (amperomierze), mocy (watomierze).
4. Następnie należy zmniejszać stopniowo wartość napięcia zasilającego i dokonywać kolejnych odczytów z mierników (minimum 6-8 punktów pomiarowych).
5. Pomiar w stanie zwarcia powinien trwać możliwie krótko z uwagi na niekorzystne warunki chłodzenia maszyny pierścieniowej.

Na podstawie wykonanych pomiarów oblicza się:

Moc czynną pobraną z sieci przez maszynę pierścieniową w stanie zwarcia;

$$P_K = P_{UVK} + P_{VWK} \quad (25)$$

P_{UVK} , P_{VWK} – moce odczytane z watomierzy w trakcie pomiarów.

Średnią wartość napięcia międzyfazowego w stanie zwarcia:

$$U_K = \frac{U_{UVK} + U_{VWK} + U_{WUK}}{3} \quad (26)$$

Średnią wartość prądu zwarcowego (fazowego) stojana;

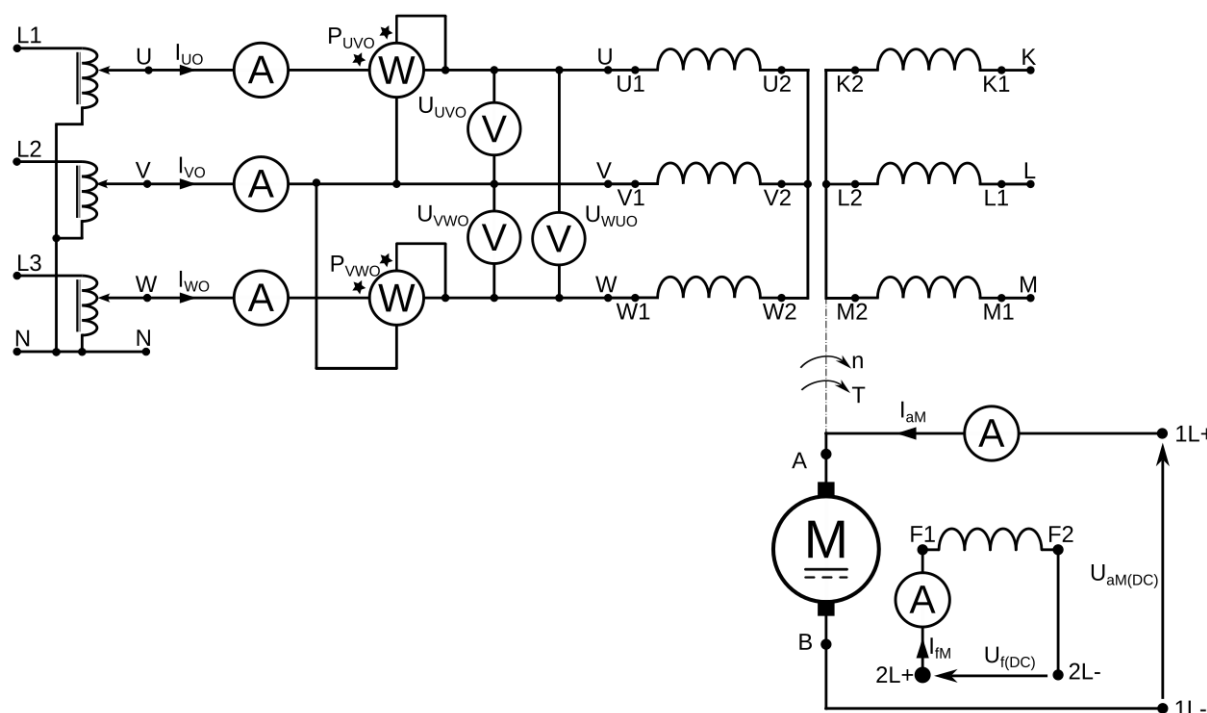
$$I_K = \frac{I_{UK} + I_{VK} + I_{WK}}{3} \quad (27)$$

I_{UK} , I_{VK} , I_{WK} – zmierzone wartości prądów fazowych w stanie zwarcia.

Współczynnik mocy maszyny pierścieniowej w stanie zwarcia dla połączenia uzwojeń stojana w gwiazdę wyznacza się z zależności:

$$P_K = 3 \cdot U_{fK} \cdot I_K \cdot \cos \varphi_K \rightarrow \cos \varphi_K = \frac{P_K}{3 \cdot U_{fK} \cdot I_K} = \frac{P_K}{\sqrt{3} \cdot U_K \cdot I_K} \quad (28)$$

Pomiar charakterystyk idealnego biegu jałowego



Rys. 14. Schemat układu do pomiaru charakterystyk idealnego biegu jałowego maszyny indukcyjnej pierścieniowej.

[Tekst alternatywny. Na rysunku przedstawiono uzwojenia stojana trójfazowej maszyny indukcyjnej pierścieniowej wraz z niezbędnymi miernikami: trzema amperomierzami, trzema woltomierzami, dwoma watomierzami. Wirnik maszyny pierścieniowej jest rozarty i napędzany za pomocą silnika obcowzbudnego prądu stałego. Uzwojenie wzbudzenia F1F2 i twornika AB silnika prądu stałego zasilane jest z dwóch niezależnych źródeł napięcia stałego.]

Wyniki pomiarów zamieszcza się w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki pomiarów dla idealnego biegu jałowego maszyny indukcyjnej pierścieniowej.

	I_{uo}	I_{vo}	I_{wo}	U_{uvo}	U_{vwo}	U_{wuo}	P_{uvo}	P_{vwo}
L_p	dz/A	dz/A	dz/A	dz/V	dz/V	dz/V	dz/W	dz/W
1								

Sposób przeprowadzenia pomiarów:



1. Wirnik maszyny pierścieniowej należy rozewrzeć i napędzić za pomocą silnika obcowzbudnego prądu stałego z prędkością synchroniczną w kierunku zgodnym z kierunkiem wirowania pola stojana.
2. Trójfazowe uzwojenie stojana maszyny pierścieniowej należy zasilać regulowanym napięciem w zakresie $U_S = 0 \div 1.1 U_{SN}$.
3. Regulując trójfazowe napięcie zasilające uzwojenie stojana należy wykonać 8-10 punktów pomiarowych.

Moc czynną pobraną z sieci przez maszynę pierścieniową w stanie idealnego biegu jałowego oblicza się jako sumę mocy zmierzonych przez watomierze:

$$P_O = P_{UVVO} + P_{VWVO} \quad (29)$$

P_{UVVO}, P_{VWVO} – moce odczytane z watomierzy w trakcie pomiarów.

Średnią wartość napięcia międzyfazowego oblicza się jako średnią arytmetyczną trzech zmierzonych napięć międzyfazowych:

$$U_O = \frac{U_{UVVO} + U_{VWVO} + U_{WUVO}}{3} \quad (30)$$

Średnią wartość prądu jałowego (fazowego) stojana oblicza się jako średnią arytmetyczną zmierzonych prądów:

$$I_O = \frac{I_{UO} + I_{VO} + I_{WO}}{3} \quad (31)$$

I_{UO}, I_{VO}, I_{WO} – zmierzone wartości prądów fazowych w stanie idealnego biegu jałowego.

Współczynnik mocy maszyny pierścieniowej w stanie idealnego biegu jałowego dla połączenia uzwojeń stojana w gwiazdę wyznacza się z zależności:

$$P_O = 3 \cdot U_{fO} \cdot I_O \cdot \cos \varphi_O \rightarrow \cos \varphi_O = \frac{P_O}{3 \cdot U_{fO} \cdot I_O} = \frac{P_O}{\sqrt{3} \cdot U_O \cdot I_O} \quad (32)$$

Rezystancję uzwojenia stojana:

$$R_{SO} = \frac{P_O}{3I_O^2} \quad (33)$$

Impedancję własną uzwojenia stojana:

$$Z_{SO} = \frac{U_{fO}}{I_O} = \frac{U_O}{\sqrt{3}I_O} \quad (34)$$

Reaktancję własną uzwojenia stojana:

$$X_S = \sqrt{Z_{SO}^2 - R_{SO}^2} \quad (35)$$

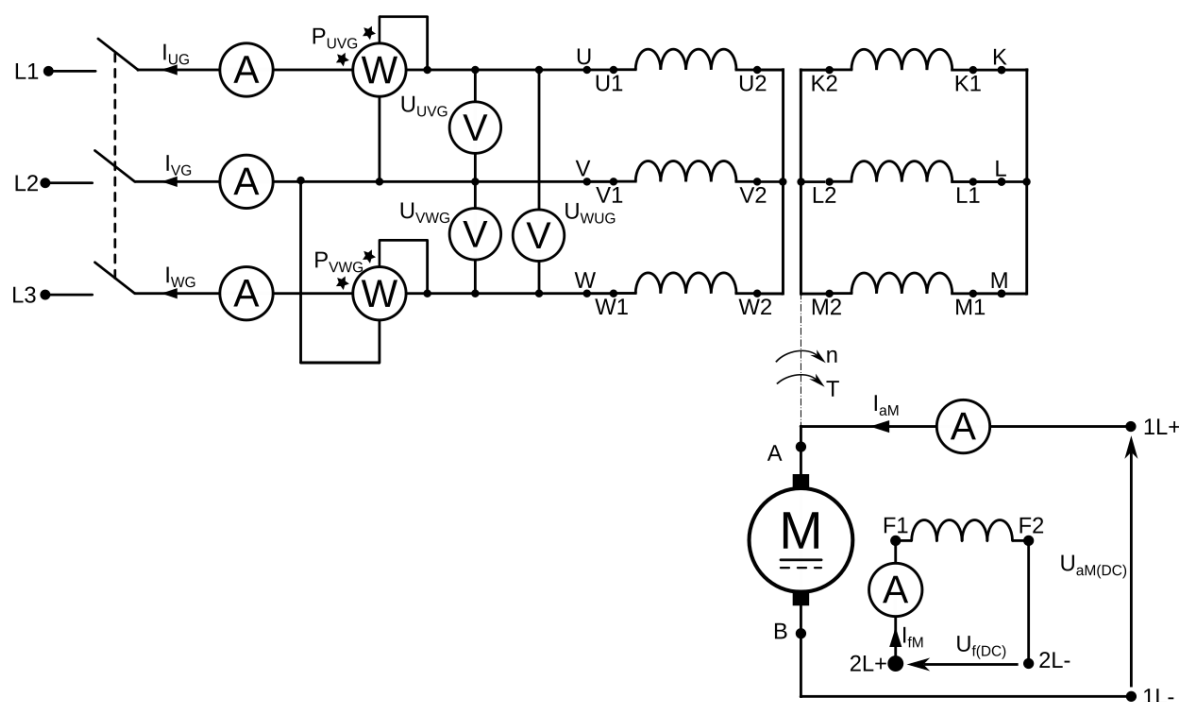
Siłę elektromotoryczną indukowaną w uzwojeniu stojana:

$$E_S = X_S \cdot I_O \quad (36)$$

Na podstawie wykonanych obliczeń należy wykreślić charakterystyki reaktancji własnej stojana w funkcji siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu stojana $X_s=f(E_s)$ oraz siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu stojana w zależności od prądu jałowego: $E_s=f(I_0)$.

8. Praca generatora indukcyjnego na sieć sztywną

Wyznaczanie charakterystyk elektromechanicznych przy pracy równoległej generatora indukcyjnego pierścieniowego na sieć sztywną przeprowadza się w układzie pomiarowym przedstawionym na rys.15.



Rys. 15. Schemat układu do załączenia i pracy generatora indukcyjnego pierścieniowego na sieć sztywną.

[Tekst alternatywny. Na rysunku zamieszczono układ pomiarowy do załączenia trójfazowego generatora indukcyjnego pierścieniowego na sieć sztywną. Moc oddawana przez generator do sieci mierzona jest za pomocą dwóch watomierzy, prądy płynące do sieci za pomocą trzech amperomierzy, napięcia międzyfazowe za pomocą trzech woltomierzy. Wirnik maszyny pierścieniowej jest zwarty i napędzany za pomocą obcowzbudnego silnika prądu stałego. Moc pobieraną przez napędzający silnik prądu stałego (moc wejściowa).]



Sposób przeprowadzenia pomiarów:

1. Prądnicę indukcyjną pierścieniową należy napędzić za pomocą silnika obcowzbudnego prądu stałego do prędkości zbliżonej do prędkości synchronicznej.
2. Przed bezpośrednim załączeniem generatora indukcyjnego pierścieniowego do sieci sztywnej należy sprawdzić kierunek wirowania pola magnetycznego wytworzonego w maszynie asynchronicznej z kierunkiem wirowania układu napędowego. Kierunki te powinny być zgodne.
3. Po załączeniu napędzonego generatora indukcyjnego pierścieniowego na sieć sztywną dostarczaną moc mechaniczną należy regulować poprzez zmianę napięcia twornika silnika prądu stałego przy stałym napięciu wzbudzenia. Wzrost dostarczanej do układu mocy mechanicznej powoduje wzrost prędkości, wzrost prądu twornika silnika prądu stałego oraz wzrost prądów generatora indukcyjnego pierścieniowego. W trakcie pomiarów od biegu jałowego do stanu obciążenia znamionowego regulując obciążenie nie należy przekraczać wartości znamionowych obu maszyn.

Wyniki pomiarów zamieszcza się w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki pomiarów do wyznaczenia charakterystyk elektromechanicznych generatora indukcyjnego asynchronicznego.

L_p	I_{UG}	I_{VG}	I_{WG}	U_{UVG}	U_{VWG}	U_{WUG}	P_{UVG}	P_{VWG}
	dz/A	dz/A	dz/A	dz/V	dz/V	dz/V	dz/W	dz/W
1								

cd. tabeli

I_{aM}	U_{aM}	n
dz/A	dz/V	obr/min

gdzie:

I_{UG} , I_{VG} , I_{WG} – prądy fazowe generatora indukcyjnego pierścieniowego,

U_{UVG} , U_{VWG} , U_{WUG} – napięcia międzyfazowe generatora,

P_{UVG} , P_{VWG} – moce czynne zmierzone w układzie Arona,

I_{aM} , U_{aM} – prąd i napięcie twornika silnika obcowzbudnego prądu stałego,

n – prędkość obrotowa [obr/min].

Na podstawie wyników pomiarów wyznacza się:

Moc wejściową P_{IN} (czynna) pobieraną przez silnik obcowzbudny prądu stałego pobieraną z sieci napięcia stałego:



$$P_{IN} = U_{aM} \cdot I_{aM} [W] \quad (37)$$

Średnią wartość napięcia międzyfazowego generatora:

$$U_{GS} = \frac{U_{UVG} + U_{VWG} + U_{WUG}}{3} \quad (38)$$

Średnią wartość prądu stojana generatora:

$$I_{GS} = \frac{I_{UG} + I_{VG} + I_{WG}}{3} \quad (39)$$

Średnią wartość prądu generatora (fazowego) stojana:

$$I_{GR} = \vartheta_i \cdot I_{GS} = \frac{I_{2N}}{I_{1N}} \cdot I_{GS} \quad (40)$$

I_{1N}, I_{2N} - prądy znamionowe stojana i wirnika maszyny indukcyjnej pierścieniowej

Moc czynną wyjściową generatora czyli moc oddawaną do sieci:

$$P_{G_OUT} = P_{UVG} + P_{VWG} \quad (41)$$

Wyjściową moc pozorną generatora:

$$S_{G_OUT} = \sqrt{3} U_{GS} I_{GS} \quad (42)$$

Wyjściową moc bierną generatora:

$$Q_{G_OUT} = \sqrt{S_{G_OUT}^2 - P_{G_OUT}^2} \quad (43)$$

Moc czynną dostarczoną do generatora czyli moc wejściową generatora:

$$P_{G_IN} = P_{G_OUT} + \Sigma \Delta P_G \quad (44)$$

$\Sigma \Delta P$ – suma strat mocy czynnej w generatorze indukcyjnym pierścieniowym:

$$\Sigma \Delta P_G = \Delta P_{CuSG} + \Delta P_{CuRG} + \Delta P_{FeG} + \Delta P_{dodG} + \Delta P_{szG} + \Delta P_{mechG} \quad (45)$$

Straty mocy czynnej w uzwojeniach stojana generatora:

$$\Delta P_{CuSG} = 3 \cdot I_{GS}^2 \cdot R_{fSG} \quad (46)$$

R_{fSG} - rezystancja fazowa uzwojenia stojana generatora.

Straty mocy czynnej w uzwojeniach wirnika generatora:

$$\Delta P_{CuSR} = 3 \cdot I_{GR}^2 \cdot R_{fRG} \quad (47)$$

R_{fRG} - rezystancja fazowa uzwojenia wirnika generatora.

Straty mocy czynnej w rdzeniu stojana generatora $\Delta P_{FeG} = \Delta P_{FeN} = 71W$

Straty dodatkowe generatora :

$$\Delta P_{dodG} = \left(\frac{I_{RG}}{I_{RGN}} \right)^2 \Delta P_{dodN} \quad (48)$$

I_{RG} - prąd wirnika generatora,

I_{RGN} - znamionowa wartość prądu wirnika generatora $I_{RGN} = 17A$,

ΔP_{dodN} – straty dodatkowe wyznaczone w warunkach znamionowych $\Delta P_{dodN} = 9.2W$

Straty mocy czynnej na połączeniu szczotka-pierścień :

$$\Delta P_{SZ} = \left(\frac{I_{RG}}{I_{RGN}} \right)^2 \Delta P_{SZN} \quad (49)$$



ΔP_{SZN} - starty mocy czynnej na połączeniu szczotka-pierścień wyznaczone dla warunków znamionowych $\Delta P_{SZN} = 52W$.

Sprawność generatora indukcyjnego:

$$\eta_G = \frac{P_{G_OUT}}{P_{G_IN}} \quad (50)$$

Sprawność układu silnik obcowzbudny prądu stałego – generator indukcyjny:

$$\eta_U = \frac{P_{G_OUT}}{P_{IN}} \quad (51)$$

Moment mechaniczny na wale generatora indukcyjnego

$$T = \frac{P_{G_IN}}{\omega} = \frac{60 \cdot P_{G_IN}}{2\pi n} = \frac{30 \cdot P_{G_IN}}{\pi n} \quad (52)$$

Na podstawie wykonanych obliczeń należy wykreślić charakterystyki: $I_{GS}=f(P_{G_OUT})$, $\eta_G=f(P_{G_OUT})$, $\eta_U=f(P_{G_OUT})$, $T=f(P_{G_OUT})$, $P_{IN}=f(P_{G_OUT})$,

9. Literatura

1. Bajorek Z.: Teoria maszyn elektrycznych, WNT, Warszawa 1982.
2. Chapman St. J.: Electrical Machinery Fundamentals. McGraw Hill, New York 2005.
3. Fitzgerald A. E.: Kingsley Ch., Unmans S. D.: Electric Machinery, McGraw Hill Higher Education 2003.
4. Fleszar J., Śliwińska D.: Zadania z maszyn elektrycznych, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2003
5. Glinka T.: Ćwiczenia tablicowe z transformatorów i maszyn elektrycznych, PWN, Warszawa 2022.
6. Glinka T.: Maszyny elektryczne i transformatory, PWN, Warszawa 2018.
7. Glinka T.: Zadania z maszyn elektrycznych, WNT, Warszawa 1976.
8. Jezierski E.: Transformatory. WNT, Warszawa 1983
9. Latek W.: Teoria maszyn elektrycznych, WNT, Warszawa 1982.
10. Plamitzer A, M.: Maszyny elektryczne, WNT. Warszawa 1976.