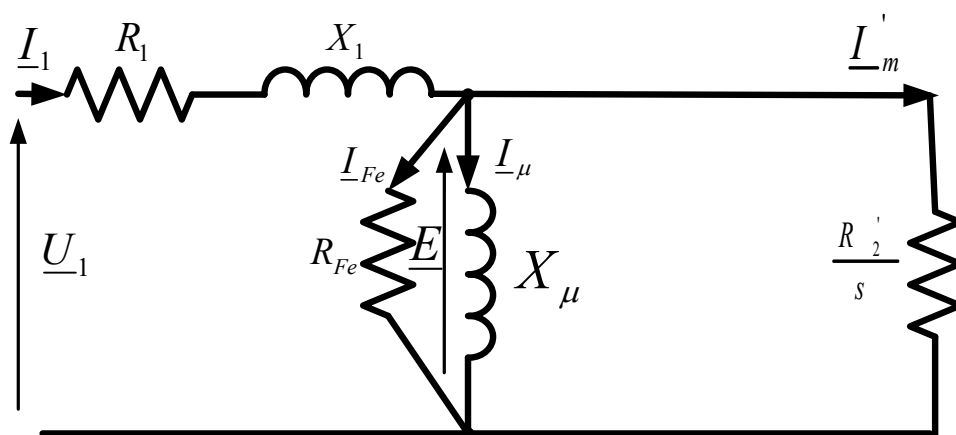


## PRÓBA BIEGU JAŁOWEGO I ZWARCIA MASZYNY INDUKCYJNEJ

Stan pracy maszyny asynchronicznej pracująca bez momentu obciążenia na wale (z odłączoną maszyną roboczą), w odróżnieniu od idealnego biegu jałowego przy pracy z prędkością synchroniczną, nazywamy rzeczywistym biegiem jałowym. Z uwagi na występujące w maszynie straty mechaniczne, które są wynikiem tarcia w łożyskach oraz wymuszeniem ruchu powietrza przez łopatki wentylatora, przez uzwojenie wirnika płynie niewielki prąd a poślizg jest większy od zera. Wobec małej wartości poślizgu możemy przyjąć, że:

$$X_2' \ll \frac{R_2'}{s} \quad (1)$$

Schemat zastępczy maszyny trójfazowej jest zawsze opisany dla wielkości fazowych, stąd w dalszej części będziemy wykorzystywali wszystkie wielkości (prąd, napięcie oraz moc) sprowadzone do jednej fazy stojana i wirnika. Wykorzystanie podanych niżej równań wymaga, w zależności od sposobu skojarzenia uzwojeń, przeliczenia wielkości zmierzonych jako przewodowe lub międzyfazowe na wielkości fazowe, a wartość całkowitej mocy zmierzonej np. w układzie Arona na moc jednej fazy (czyli całkowitą moc zmierzoną dzielimy na trzy równe części) W schemacie możemy pominąć reaktancję rozproszenia wirnika (Rys. 2). Prąd stojana składa się z prądu magnesującego  $I_\mu$ , prądu strat w żelazie  $I_{Fe}$ , oraz prądu wirnika wynikającego z istnienia strat mechanicznych. Prąd magnesujący zmienia się wraz z napięciem zgodnie z krzywą magnesowania. Składnik prądu strat w żelazie rośnie praktycznie liniowo. Wyjaśnienia wymaga zależność prądu wirnika związanego ze stratami mechanicznymi. Dominujące znaczenie w tych stratach mają straty wentylacyjne, których moment jest zależny od kwadratu prędkości kątowej.



Rys. 1 Schemat zastępczy maszyny asynchronicznej przy rzeczywistym biegu jałowym.

W czasie próby biegu jałowego prędkość poślizg jest bliski zeru, więc możemy przyjąć, że prędkość ma wartość stałą i stała jest wartość strat mechanicznych:

$$\Delta P_m = EI'_m \quad (2)$$

Wartość siły elektromotorycznej E jest bliska napięciu zasilającemu, możemy więc napisać:

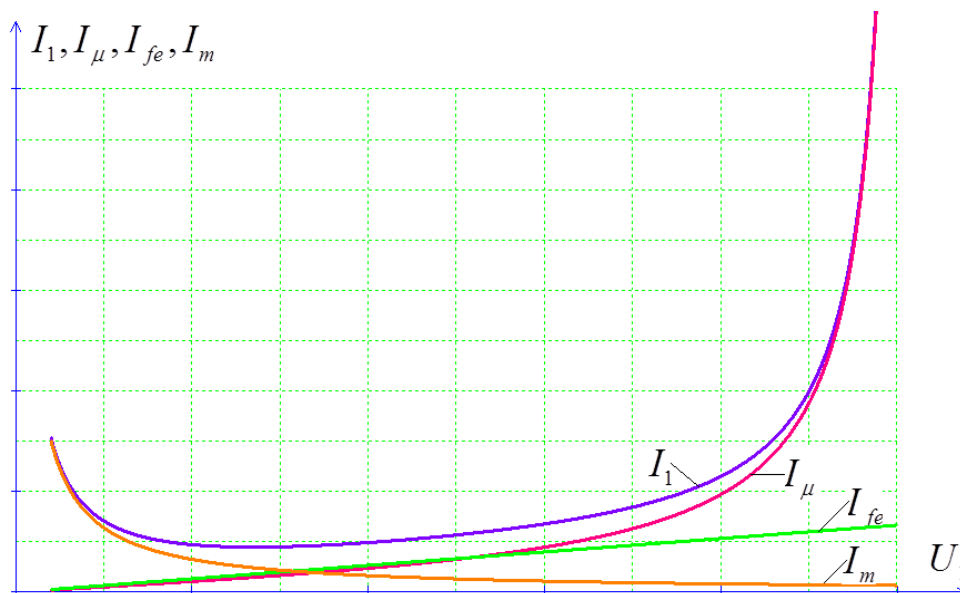
$$\Delta P_m \approx U_1 I'_m \approx const \quad (3)$$

Stąd hiperboliczna zależność tego prądu od napięcia zasilającego:

$$I'_m \approx \frac{const}{U_1} \quad (4)$$

Prąd stojana jest równy (Rys. 2):

$$I_1 = \sqrt{(I'_m + I_{fe})^2 + I_\mu^2} \quad (5)$$



Rys. 2 Prąd biegu jałowego maszyny asynchronicznej.

Próbie biegu jałowego rozpoczynamy od wartości napięcia o ok. 30% większej od znamionowej i zmniejszamy jego wartość do momentu, gdy zaobserwujemy wzrost prądu stojana przy zmniejszaniu napięcia. Oczywistym jest, że dalsze zmniejszanie napięcia spowoduje wzrost poślizgu i w tym momencie należy próbę zakończyć. W czasie próby mierzymy wartość skuteczną prądu stojana, wartość skuteczną napięcia zasilającego oraz moc pobieraną przez silnik. Wartość prądu biegu jałowego, przy znamionowej wartości napięcia, jest znacznie większa niż w transformatorach. Fakt ten jest wynikiem istnienia widocznej szczeliny powietrznej pomiędzy stojanem a wirującym wirnikiem. W maszynach indukcyjnych wartość tego prądu jest równa od 20

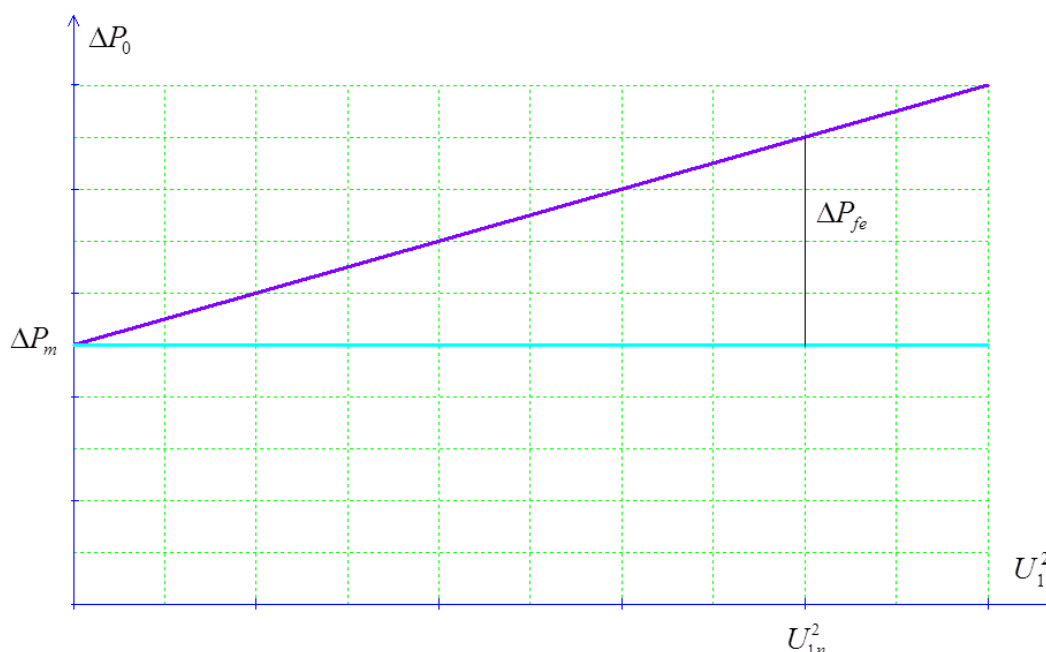
do 90% prądu znamionowego, stąd w analizę wyników badań należy uwzględnić straty w uzwojeniu stojana. W celu ich obliczenia niezbędny jest pomiar wartości rezystancji  $R_1$ , a ich wartość możemy obliczyć z zależności:

$$\Delta P_{cu1} = R_1 I_1^2 \quad (6)$$

Od zmierzonej mocy przy próbie biegu jałowego  $P_0$  odejmujemy straty w uzwojeniu stojana  $\Delta P_{cu1}$  otrzymując tzw. straty jałowe  $\Delta P_0$ :

$$\Delta P_0 = P_0 - \Delta P_{cu1} \quad (7)$$

Składnikami strat jałowych są straty w żelazie oraz straty mechaniczne, które w czasie próby mają wartość stałą. Wobec faktu, że straty w żelazie są proporcjonalne do kwadratu maksymalnej wartości indukcji a indukcja jest wymuszona wartością napięcia zasilającego, możemy w prosty sposób rozdzielić straty jałowe na ww. składniki. W tym celu rysujemy zależność strat jałowych od kwadratu napięcia stojana uzyskując liniowy wzrost strat jałowych (Rys. 3). W celu oszacowania strat mechanicznych wystarczy dokonać ekstrapolacji linii będącej wynikiem pomiarów biegu jałowego do przecięcia się jej z osią Y. Punkt przecięcia wyznaczy nam wartość strat mechanicznych  $\Delta P_m$ , straty w żelazie  $\Delta P_{fe}$  uzyskamy po odjęciu od strat jałowych  $\Delta P_0$  mocy strat mechanicznych.



Rys. 3 Sposób wyznaczenia strat mechanicznych i strat w żelazie.

W przypadku badań silnika pierścieniowego możemy mierzyć poślizg. Pomiar poślizgu opiera się na pomiarze częstotliwości prądu w wirniku oraz wykorzystania zależności:

$$s = \frac{f_2}{f} \quad (8)$$

Wyniki próby biegu jałowego wykorzystać można do szacowania parametrów schematu zastępczego  $R_{fe}$  oraz  $X_{\mu}$ :

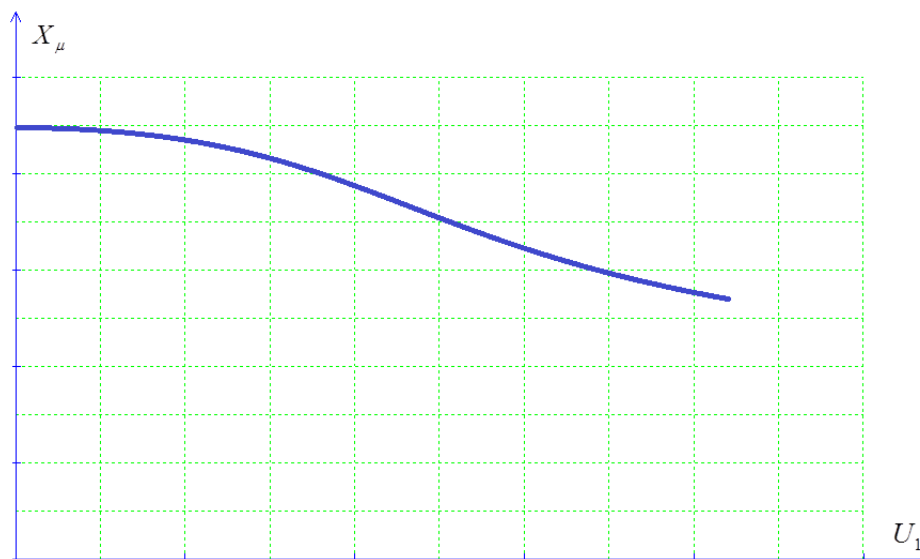
$$R_{fe} = \frac{3U_1^2}{\Delta P_{fe}} \quad (9)$$

$$I_{fe} = \frac{U_1}{R_{fe}} \quad (10)$$

$$I_{\mu} = \sqrt{I_1^2 - I_{fe}^2} \quad (11)$$

$$X_{\mu} = \frac{U_1}{I_{\mu}} \quad (12)$$

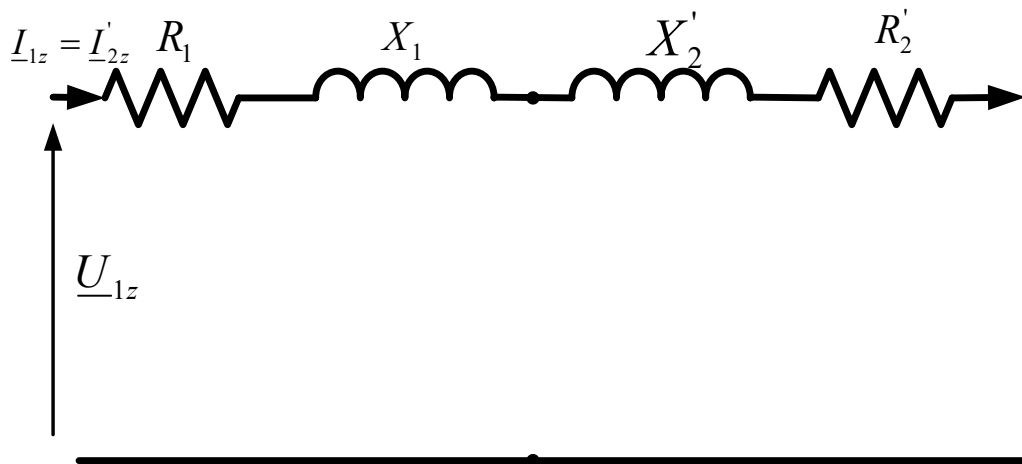
W tym momencie należy podkreślić, że wartość  $X_{\mu}$  na skutek nasycenia obwodu magnetycznego, nie jest wartością stałą tylko zależy od wartości napięcia zasilającego uzwojenie stojana (Rys. 4). W podobny sposób zmienia się także współczynnik mocy przy biegu jałowym.



Rys. 4 Zależność reaktancji  $X_{\mu}$  od wartości napięcia zasilającego  $U_1$ .

Pozostałe parametry schematu można wyznaczyć na podstawie próby zwarcia. Próba zwarcia maszyny indukcyjnej polega na zablokowaniu wirnika ( $s=0$ ) i pomiarach prądu  $I_{1z}$ , napięcia  $U_{1z}$  oraz mocy  $P_z$  pobieranej przez maszynę. W tym przypadku, podobnie jak dla

transformatorów, możemy pominąć prąd biegu jałowego i w schemacie zastępczym wystąpią jedynie rezystancja stojana  $R_1$ , Reaktancja rozproszenia stojana  $X_1$ , sprowadzone do obwodu stojana wartości rezystancji  $R_2'$  oraz reaktancji  $X_2'$  wirnika (Rys. 5).



Rys. 5 Uproszczony schemat zastępczy w stanie zwarcia maszyny indukcyjnej.

Wartości parametrów wyznaczamy w sposób identyczny jak dla transformatorów:

$$R_z = R_1 + R_2' \quad (13)$$

$$X_z = X_1 + X_2' \quad (14)$$

$$R_z = \frac{P_z}{I_{1z}^2} \quad (15)$$

$$Z_z = \frac{U_{1z}}{I_{1z}} \quad (16)$$

$$X_z = \sqrt{Z_z^2 - R_z^2} \quad (17)$$

Rezystancję uzwojenia fazowego stojana  $R_1$  możemy zmierzyć metodą techniczną mostkiem Thompsona lub specjalnymi urządzeniami do pomiaru małych rezystancji wyznaczając w ten sposób sprowadzoną do obwodu stojana wartość rezystancji wirnika:

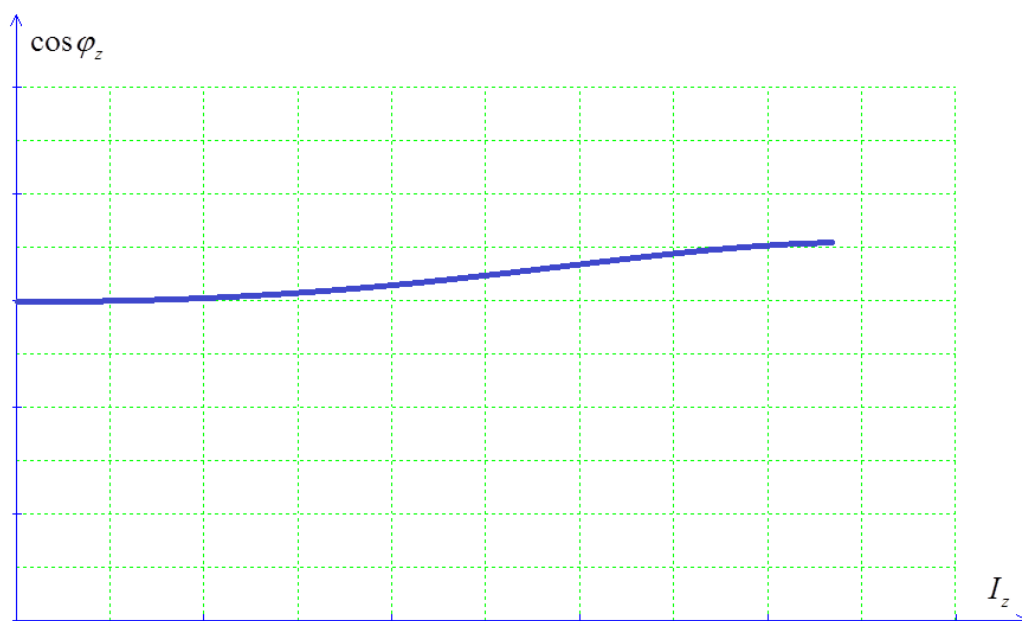
$$R_2' = R_z - R_1 \quad (18)$$

W przypadku maszyny pierścieniowej możliwy jest bezpośredni pomiar rezystancji uzwojenia wirnika oraz przekładni. Należy przy tym pamiętać, że pomiar rezystancji obwodu elektrycznego w których występują styki ruchome (połączenie pomiędzy szczotką i pierścieniami) musi być wykonany z kontrolą prądu pomiarowego. Jego wartość musi być większa niż 20% prądu

znamionowego. W tym przypadku konieczne jest zastosowanie metody technicznej lub specjalnych urządzeń w którym mamy dostępną informację o wartości prądu pomiarowego. Nie ma możliwości prostego rozdzielenia reaktancji zwarcia na odpowiednie składniki reaktancji rozproszenia, stąd przyjmuje się:

$$X_1 = X_2' = \frac{X_z}{2} \quad (19)$$

Wartość reaktancji zwarcia nie jest jednak wartością stałą. Mimo schematu zastępczego identycznego jak w transformatorach, w których reaktancja rozproszenia związana jest głównie z polem magnetycznym przechodzącym przez powietrze, w maszynach indukcyjnych część pola rozproszenia zamyka się w obrębie rdzenia stojana i wirnika. Fakt ten powoduje, że przy większych wartościach prądu może następować lokalne nasycenie rdzeni ferromagnetycznych. W takim przypadku przy zwiększaniu prądu zwarcia następuje zmniejszanie się wartości reaktancji zwarcia. Na skutek szeregowego połączenia rezystancji i reaktancji zwarcia wzrost prądu powoduje zwykle zwiększenie wartości współczynnika mocy (Rys. 6).



Rys. 6 Współczynnik mocy przy zwarciu jako funkcja prądu w maszynie indukcyjnej.

Wartości parametrów schematu zastępczego silników asynchronicznych mogą być także oszacowane na podstawie danych katalogowych. Zwykle w katalogach podaje się następujące informacje:

$P_n$  – moc znamionowa

$U_n$  – napięcie znamionowe

Układ połączeń: gwiazda (Y) lub trójkąt (D)

$I_n$  - Prąd znamionowy

$n_n$  – znamionowa prędkość obrotowa

$\cos\varphi_n$  – znamionowy współczynnik mocy

$f_n$  – częstotliwość znamionowa

$i_r$  – krotność prądu rozruchowego

$m_r$  – przeciążalność momentem

Napięcia i prądu fazowe ( $U_{fn}$ ,  $I_{fn}$ ) wyznaczamy z wartości znamionowych dla danej grupy połączeń. Poślizg znamionowy jest równy:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} \quad (20)$$

Gdzie  $n_s$  jest prędkością synchroniczną wyznaczoną dla częstotliwości znamionowej i liczby par biegunów z zależności:

$$n_s = \frac{60 f}{p} \quad (21)$$

Wartość liczby par biegunów może być podana w oznaczeniu typu, lecz w praktyce wystarczająca jest znajomość prędkości i częstotliwości znamionowej. Znamionowa prędkość obrotowa jest zwykle bliska prędkości synchronicznej, stąd znajomość częstotliwości umożliwia określenie możliwych prędkości synchronicznych, np. dla 50Hz możemy uzyskać następujące wartości prędkości synchronicznych: 3000, 1500, 1000, 750, 600 obr/min. Jeśli wartość prędkości znamionowej jest równa np. 920 obr/min to z pewnością prędkość synchroniczna jest równa 1000 obr/min, a liczba par biegunów równa się 3.

Napięcie zwarcia w silnikach klatkowych przyjmuje wartości z zakresu 10÷25% napięcia znamionowego. Wraz ze wzrostem mocy silnika jego procentowa wartość maleje. Można także wyznaczyć napięcie zwarcia ze znajomości prądu rozruchowego (prądu zwarcia):

$$U_z = \frac{U_n}{i_r} \quad (22)$$

Prąd biegu jałowego przyjmuje wartości z zakresu 20÷80% prądu znamionowego. Wartość mniejsza dotyczy niskoobrotowych silników dużej mocy. Wartości większe dotyczą silników małych mocy.

Straty mechaniczne przyjmują zwykle wartości z przedziału 0.2÷1.8% mocy znamionowej. Dokładniejsze dane można uzyskać z charakterystyk uzyskanych na drodze wieloletnich doświadczeń produkcyjnych, przy czym dla większości maszyn małej i średniej mocy można przyjąć, że straty mechaniczne stanowią ok 0,5 % mocy znamionowej.

$$\Delta P_m = (0.2 \div 1.8)\% P_n \quad (23)$$

Moc czynna pobierana z sieci zasilającej jest równa:

$$P_{1n} = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi_n \quad (24)$$

Straty w uzwojeniu wirnika możemy oszacować na podstawie mocy znamionowej i szacowanych strat mechanicznych:

$$\Delta P_{cu2n} = \frac{s_n}{1 - s_n} (P_n + \Delta P_m) \quad (25)$$

Zwykle przyjmuje się, że straty w uzwojeniu stojana są równe stratom w wirniku:

$$\Delta P_{cu2n} = \Delta P_{cu1n} \quad (26)$$

Niekiedy w danych katalogowych podawana jest wartość rezystancji uzwojenia stojana i wówczas moc strat w stojanie można policzyć ze znajomości prądów fazowych:

$$\Delta P_{cu1n} = 3R_1 I_{1n}^2 \quad (27)$$

Straty w rdzeniu silnika są równe:

$$\Delta P_{Fe} = P_{1n} - P_n - \Delta P_{cu2n} - \Delta P_{cu1n} - \Delta P_m \quad (28)$$

Wartości parametrów schematu zastępczego obliczamy kolejno wg. zależności:



$$R_s = R_r' = \frac{\Delta P_{cu1n}}{3I_{fn}^2} \quad (29)$$

$$R_{Fe} = \frac{3U_{fn}^2}{\Delta P_{Fe}} \quad (30)$$

$$I_\mu = \sqrt{I_o^2 - (I_{Fe} + I_{20})^2} \quad (31)$$

$$I_{Fe} + I_{20} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_m}{3U_{fn}} \quad (32)$$

$$X_\mu = \frac{U_{fn}}{I_\mu} \quad (33)$$

$$R_z = R_s + R_r' \quad (34)$$

$$Z_z = \frac{U_z}{I_{fn}} \quad (35)$$

$$X_s = X_r' = \frac{\sqrt{Z_z^2 - R_z^2}}{2} \quad (36)$$

Przeliczenie wartości rezystancji przeliczamy zwykle na omowną temperaturę, temperaturę odniesienia wyznaczamy z zależności:

$$R_s = R_{s0} (1 + \alpha \Delta T) \quad (37)$$

Wartość temperaturowego współczynnika rezystancji jest równa:

dla miedzi:

$$\alpha_{Cu} = 0.0039 \text{ [1/deg]} \quad (38)$$

dla aluminium

$$\alpha_{Al} = 0.00415 \text{ [1/deg]} \quad (39)$$

Temperatura odniesienia zależy od klasy ciepłoodporności izolacji i wynosi 75°C dla klasy A, B, E oraz 115°C dla F i M.

### **Spis literatury:**

- [1] Chapman Stephen J.: Electrical Machinery Fundamentals. McGraw Hill, New York 2005
- [2] Fitzgerald A. E., Kingsley Ch., Unmans S. D.: Electric Machinery. McGraw Hill Higher Education 2003
- [3] Fleszar J., Śliwińska D., Zadania z maszyn elektrycznych, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2003
- [4] Hebenstreit J., Gientkowski Z., Maszyny elektryczne w zadaniach, Wydawnictwo Akademii Rolniczo-Technicznej, Bydgoszcz 2003
- [5] Mitew E., Maszyny Elektryczne, T1, T2, Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom 2005
- [6] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff: Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. John Wiley & Sons Inc. IEEE Press Piscataway, New York 2002
- [7] Plamitzer A.: Maszyny elektryczne. WNT, Warszawa 1982
- [8] Przyborowski W., Kamiński G.: Maszyny elektryczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
- [9] Rene Le Doeuff, Mohamed El Hodi Zaim: Rotating Electrical Machines. John Wiley & Sons Inc., Hoboken 2010
- [10] Sen P. G., Principles of electric machines and Power electronics, John Wiley & Sons, Ontario 1997
- [11] Wildi Theodore: Electrical Machines, Drives and Power Systems. Pearson Education, New Jersey 2006