

Jeśli odległość liczyć od osi uzwojenia, to

$$a(x, t) = \frac{3}{2} 2 \sqrt{2} \frac{z}{p} \frac{1}{\tau} I \sum_v \xi_v \cos \left(\omega t - v \frac{\pi}{\tau} x \right) \quad (3.107)$$

Po oznaczeniu amplitudy v -tej harmonicznej trójfazowego okładu wirującego przez

$$A_{vm} = \frac{3}{2} 2 \sqrt{2} \frac{z}{p} \cdot \frac{1}{\tau} I \xi_v \quad (3.108)$$

można napisać

$$a(x, t) = \sum_v A_{vm} \cos \left(\omega t - v \frac{\pi}{\tau} x \right) \quad (3.109)$$

Prędkości wirowania harmonicznych okładu są analogiczne jak harmonicznych napięcia magnetycznego.

3.7. MOMENT ELEKTROMAGNETYCZNY

W ogólnym przypadku moment elektromagnetyczny maszyny elektrycznej wirującej można wyznaczyć jako pochodną energii elektromagnetycznej E_e względem kąta obrotu, czyli

$$M_e = \frac{dE_e}{d\theta} \quad (3.110)$$

W maszynach elektrycznych pracujących przy częstotliwościach technicznych pojemności odgrywają rolę pomijalnie małą w stosunku do indukcyjności. Wtedy E_e oznacza energię pola magnetycznego i wynosi

$$E_e = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l \Psi_k i_k \quad (3.111)$$

przy czym: Ψ_k – strumień magnetyczny skojarzony z k -tym obwodem maszyny; i_k – prąd w k -tym obwodzie.

Moment elektromagnetyczny może być także wyznaczony na podstawie prawa Biota-Savarta. Elementarny moment

$$dM_e = \frac{D}{2} B l d i \quad (3.112)$$

przy czym: D – średnica umieszczenia przewodów z prądem; l – długość czynna przewodów; B – indukcja w szczelinie w danym punkcie obwodu; $di = a dx$ – elementarny prąd; a – okład prądu w danym punkcie maszyny.

Całkowity moment jest określony wzorem

$$M_e = p M_{2\tau} = p \int_0^{2\tau} dM_e \quad (3.113)$$

w którym $M_{2\tau}$ – moment wytworzony na części obwodu odpowiadającej dwóm podziałkom biegunowym (2τ).

Ostatecznie

$$M_e = p \frac{D}{2} l \int_0^{2\tau} B_a dx \quad (3.114)$$

Przy mocy P_e przenoszonej przez pole elektromagnetyczne i prędkości obrotowej pola ω moment elektromagnetyczny można wyznaczyć z zależności

$$M_e = \frac{P_e}{\omega} \quad (3.115)$$

3.8. NAPIĘCIE INDUKOWANE

W ogólnym przypadku napięcie indukowane w maszynie elektrycznej można wyznaczyć na podstawie wzoru (3.6). W wielu maszynach w stanie ustalonym indukuje się tylko napięcie rotacji [wzór (3.8)]. W maszynie wirującej indukuje się napięcie rotacji określone wzorem

$$u_{ir} = \frac{\partial \Psi}{\partial \vartheta} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \quad (3.116)$$

Niejednokrotnie opisując maszynę w stanie ustalonym dogodniej jest wyznaczać napięcie indukowane w jednym pręcie

$$u_{pi} = B_\delta(x, t) lv \quad (3.117)$$

przy czym: $B_\delta(x, t)$ – indukcja w szczelinie w danym punkcie i w danej chwili; v – prędkość obwodowa indukcji (pręta) względem pręta (indukcji); l – długość pręta.

W przypadku strumienia wznieconego przez prąd przemienny indukcja jest określona wzorem (3.99). Na podstawie wzorów (3.98) i (3.99) pierwsza harmoniczna indukcji

$$B_{\delta 1}(x, t) = B_{m1} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) \quad (3.118)$$

a jej amplituda

$$B_{m1} = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{z}{p} I \frac{\mu_\delta}{k_C \delta} \quad (3.119)$$

W danym punkcie (np. $x = 0$) indukcja zmienia się w czasie sinusoidalnie, np. $B_{\delta 1}(0, t) = B_{m1} \sin \omega t$, co powoduje indukowanie w pręcie napięcia

$$u_{pi1} = U_{ipm1} \sin \omega t \quad (3.120)$$

W każdym innym pręcie indukuje się napięcie analogiczne, tylko przesunięte w czasie (w fazie), co w uzwojeniu danej fazy uwzględniają współczynniki ξ_σ , ξ_y , ξ . Amplituda napięcia indukowanego w pręcie

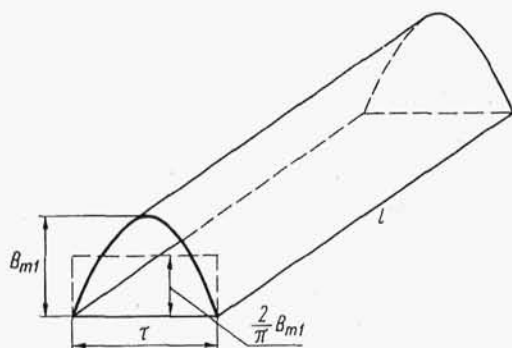
$$U_{ipm1} = B_{m1} lv \quad (3.121)$$

a jego wartość skuteczna

$$U_{ip1} = \frac{1}{\sqrt{2}} B_{m1} l v \quad (3.122)$$

Na rysunku 3.77 przedstawiono rozkład indukcji na obwodzie maszyny prądu przemiennego. Na podstawie tego rysunku strumień

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} \tau l B_{m1} \quad (3.123)$$



Rys. 3.77. Rozkład indukcji na obwodzie maszyny prądu przemiennego

Współczynnik $\alpha_i = 2/\pi$ nazywa się *współczynnikiem wypełnienia podziałki biegunowej* dla rozkładu sinusoidalnego. Na podstawie wzorów (3.120), (3.121) (3.123) i (3.92) napięcie indukowane w jednym pręcie

$$U_{ip1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \pi \Phi f \quad (3.124)$$

Uzwojenie jednej fazy ma z zwojów i 2z prętów, więc napięcie indukowane w uzwojeniu fazy

$$U_{iph1} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} z \xi_1 \Phi_1 f \quad (3.125)$$

Wyższe harmoniczne strefowe wirującego pola magnetycznego wznieconego prądem wielofazowym przepływającym przez uzwojenie wielofazowe mają $p_v = v p_1$ par biegunów i wirują z prędkością obrotową $n_v = n_1/v$. Napięcia indukowane przez te harmoniczne mają częstotliwość $f_v = n_v p_v = n_1 p_1 = f_1$. Wyższe harmoniczne strefowe wirującego pola magnetycznego wywołanego prądem wielofazowym płynącym przez uzwojenie wielofazowe nie wzniecają w tym uzwojeniu wyższych harmonicznych napięcia indukowanego.

W wirującym polu magnetycznym wznieconym przez uzwojenie wzbudzające zasilane prądem stałym (rozkład indukcji jak na rys. 3.31 i 3.57) zawarte są harmoniczne pierwsze i wszystkie wyższe nieparzyste. Napięcie fazowe indukowane pierwszą harmoniczną indukcji takiego pola jest określone wzorem (3.125). W przy-

padku maszyny obciążonej należy we wzorze tym uwzględnić wartość strumienia wypadkowego, będącego sumą strumieni stojana i wirnika. Wyższe harmoniczne strefowe w polu magnetycznym wznieconym przez uzwojenie wzbudzące zasilane prądem stałym wirują względem uzwojenia twornika z prędkością równą prędkości pierwszej harmonicznej. Częstotliwość napięć indukowanych przez te harmoniczne wynosi

$$f_v = p_v n_1 = v f_1 \quad (3.126)$$

przy czym v oznacza ciąg liczb nieparzystych.

Przy uzwojeniu wzbudzącym rozłożonym (magneśnica z biegunami utajonymi – rys. 3.30 i 3.31) na podstawie wzorów (3.66) ÷ (3.68) i (3.71) można wyznaczyć stosunek v -tej harmonicznej napięcia indukowanego fazowego do pierwszej harmonicznej napięcia indukowanego fazowego jako

$$\frac{U_{iphv}}{U_{iph1}} = \frac{1}{v} \frac{\xi_v \xi_{fv}}{\xi_1 \xi_{f1}} \quad (3.127)$$

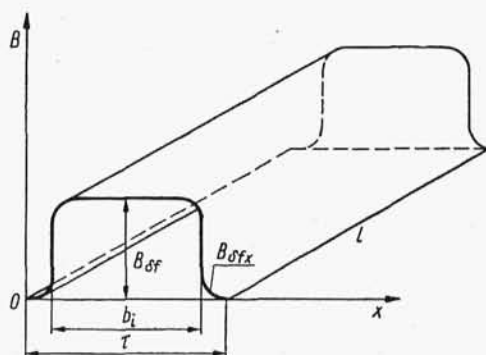
przy czym: ξ_1 – współczynnik uzwojenia (twornika) dla pierwszej harmonicznej; ξ_v – współczynnik uzwojenia (twornika) dla v -tej harmonicznej; ξ_{f1} – współczynnik uzwojenia wzbudzającego dla pierwszej harmonicznej; ξ_{fv} – współczynnik uzwojenia wzbudzającego dla v -tej harmonicznej.

W maszynie prądu stałego przy biegu jałowym rozkład indukcji na obwodzie twornika ilustruje krzywa $B_{\delta fx}$ na rys. 3.57. W jednej gałęzi równoległej jest $N/2a$ prętów. Strumień

$$\Phi = l \int_0^{\tau} B_{\delta fx} dx \quad (3.128)$$

Działanie indukcji $B_{\delta fx}$ na długości τ można zastąpić (jak na rys. 3.78) działaniem indukcji o stałej wartości $B_{\delta f}$ na długości

$$b_i = \alpha_i \tau \quad (3.129)$$



Rys. 3.78. Rozkład indukcji w maszynie prądu stałego

tak, aby strumień nie został zmieniony, czyli aby

$$B_{\delta f} b_i = \int_0^{\tau} B_{\delta f x} dx$$

Wielkość b_i nazywa się *idealnym łukiem bieguna*, a współczynnik α_i *współczynnikiem wypełnienia podziałki biegunowej*, przy czym zwykle jest $\alpha_i = 0,65 \div 0,75$. Wtedy strumień jest określony wzorem

$$\Phi = \alpha_i \tau l B_{\delta f} \quad (3.130)$$

Zamiast rozpatrywać $N/2a$ prętów będących pod działaniem indukcji $B_{\delta f x}$ można rozpatrzyć $\alpha_i N/2a$ prętów będących pod działaniem indukcji $B_{\delta f}$. Napięcie indukowane w jednym pręcie

$$u_{ip} = B_{\delta f x} lv \quad (3.131)$$

a napięcie indukowane w całym uzwojeniu twornika

$$U_i = \alpha_i \frac{N}{2a} B_{\delta f} lv \quad (3.132)$$

Prędkość obwodowa v i prędkość obrotowa n są związane zależnością $v = \pi D n = 2p\tau n$, więc otrzymuje się

$$U_i = c_v \Phi n \quad (3.133)$$

przy czym

$$c_v = \frac{N}{a} p \quad (3.134)$$

3.9. STAN OBCIĄŻENIA MASZYN ELEKTRYCZNYCH

3.9.1. Uwagi ogólne

Przy biegu jałowym prądnic synchronicznych i prądnic prądu stałego prąd w uzwojeniach tworników nie płynie. Pole magnetyczne w prądnicach biegnących jałowo jest wywołane prądem płynącym w uzwojeniu wzbudzającym. Przy obciążeniu prądnicy, czyli po dołączeniu impedancji do zacisków uzwojenia twornika prądnicy wzbudzonej płynie prąd także w uzwojeniu twornika, wzniecając pole magnetyczne.

W stanie jałowym transformatora płynie prąd tylko w uzwojeniu pierwotnym i pole magnetyczne jest wzniecone tylko prądem w uzwojeniu pierwotnym. Przy obciążeniu transformatora, czyli po dołączeniu impedancji do uzwojenia wtórnego płynie prąd także w uzwojeniu wtórnym, wzniecając pole magnetyczne.

Przy biegu jałowym silnika prądu stałego i silnika synchronicznego płynie prąd w uzwojeniu wzbudzającym i bardzo mały prąd w uzwojeniu twornika, pole magnetyczne jest wywołane prawie wyłącznie przez uzwojenia wzbudzające. Przy obciążeniu silnika prądu stałego i silnika synchronicznego momentem hamującym (zewnętrznym) płynie prąd także w uzwojeniu twornika, wzniecając pole magnetyczne.

Przy biegu jałowym silnika indukcyjnego płynie prąd w uzwojeniu stojana i bardzo mały prąd w uzwojeniu wirnika, pole magnetyczne jest wywołane prawie wyłącznie przez prąd stojana. Przy obciążeniu silnika indukcyjnego momentem hamującym płynie prąd także w uzwojeniu wirnika, wzniecając pole magnetyczne.

Ogólnie można stwierdzić:

- w stanie jałowym maszyny elektrycznej pole magnetyczne wywołane jest wyłącznie (albo prawie wyłącznie) przez prąd płynący w jednym (pierwotnym) uzwojeniu, którym jest uzwojenie pierwotne transformatora, uzwojenie stojana maszyny indukcyjnej, uzwojenie wzbudzające maszyny prądu stałego, uzwojenie wzbudzające maszyny synchronicznej;
- w stanie obciążenia pole magnetyczne jest polem magnetycznym wypadkowym, będącym sumą pola magnetycznego wznieconego przez prąd w uzwojeniu pierwotnym i pola magnetycznego wznieconego przez prąd w uzwojeniu wtórnym, którym jest uzwojenie wtórne transformatora, uzwojenie wirnika maszyny indukcyjnej, uzwojenie twornika maszyny prądu stałego, uzwojenie twornika maszyny synchronicznej.

Pole magnetyczne wzniecone przez prąd twornika nazywa się *polem reakcji twornika*.

Stan obciążenia transformatora omówiono w p. 3.2.3.4. Na tym miejscu omówiony zostanie stan obciążenia maszyn elektrycznych wirujących.

3.9.2. Stan obciążenia maszyny indukcyjnej

3.9.2.1. Pole magnetyczne wypadkowe w maszynie indukcyjnej obciążonej

Przy otwartym uzwojeniu wirnika maszyny indukcyjnej amplituda pierwszej harmonicznej napięcia magnetycznego od prądu stojana zgodnie ze wzorem (3.98) wynosi

$$F_{ms1} = \frac{m_s}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{z_s}{p} \xi_{1s} I_s \quad (3.135)$$

przy czym: m_s – liczba faz stojana; z_s – liczba zwojów uzwojenia fazowego stojana; ξ_{1s} – współczynnik uzwojenia stojana dla pierwszej harmonicznej; I_s – wartość skuteczna prądu stojana.

To napięcie magnetyczne wywołuje pierwszą harmoniczną strumienia wirującego Φ_1 indukującego – zgodnie ze wzorem (3.125) – pierwszą harmoniczną napięcia w uzwojeniu fazowym stojana

$$U_{iph1s} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} z_s \xi_{1s} \Phi_1 f \quad (3.136)$$

oraz pierwszą harmoniczną napięcia w uzwojeniu fazowym nieruchomego wirnika

$$U_{iph1r} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} z_r \xi_{1r} \Phi_1 f \quad (3.137)$$

Wprowadza się pojęcie *przekładni napięciowej maszyny indukcyjnej*

$$\mathfrak{D}_u = \frac{U_{iph1s}}{U_{iph1r}} = \frac{z_s \xi_{1s}}{z_r \xi_{1r}} \quad (3.138)$$

Napięcie wirnika U_r , odniesione do stojana

$$U'_r = \mathfrak{D}_u U_r \quad (3.139)$$

W stanie obciążenia maszyny indukcyjnej prąd stojana wznieca falę napięcia magnetycznego o amplitudzie pierwszej harmonicznej określonej wzorem (3.135), a prąd wirnika I_r wznieca falę napięcia magnetycznego o amplitudzie pierwszej harmonicznej

$$F_{mr1} = \frac{m_r}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{z_r}{p} \xi_{1r} I_r \quad (3.140)$$

przy czym: m_r – liczba faz wirnika; z_r – liczba zwojów uzwojenia fazy wirnika; ξ_{1r} – współczynnik uzwojenia wirnika dla pierwszej harmonicznej; I_r – wartość skuteczna prądu wirnika. Zgodnie z rozważaniami w p. 3.5.2 te dwie fale napięć magnetycznych wirują względem nieruchomego punktu w stojanie z jednakową prędkością synchroniczną $n_1 = f/p$, tworząc wspólną falę napięcia magnetycznego. Jest to zjawisko analogiczne do, opisanego w p. 3.2.3.4, powstawania prądu magnesującego transformatora jako sumy prądu pierwotnego i odniesionego prądu wtórnego. Działanie odpowiednio względem siebie przesuniętych fal napięcia magnetycznego stojana o amplitudzie pierwszej harmonicznej F_{ms1} i wirnika o amplitudzie pierwszej harmonicznej F_{mr1} można zastąpić działaniem napięcia magnetycznego, wywołanego prądem magnesującym i_f płynącym w uzwojeniu stojana, o amplitudzie

$$F_{mf1} = \frac{m_s}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{z_s}{p} \xi_{1s} I_f \quad (3.141)$$

Stąd

$$\underline{F}_{ms1} = \underline{F}_{mr1} + \underline{F}_{mf1} \quad (3.142)$$

czyli

$$m_s z_s \xi_{1s} \underline{I}_s = m_r z_r \xi_{1r} \underline{I}_r + m_s z_s \xi_{1s} \underline{I}_f \quad (3.143)$$

oraz

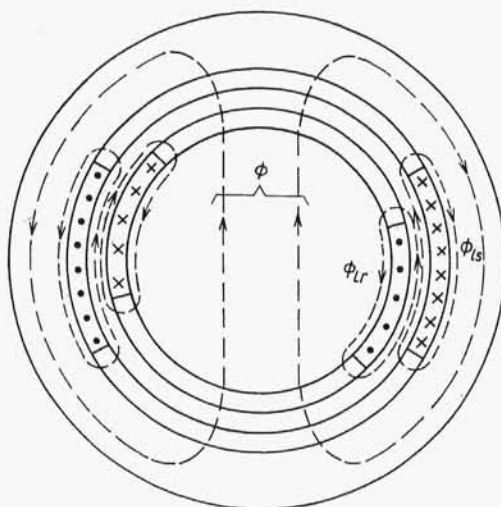
$$\underline{I}_s = \frac{m_r z_r \xi_{1r}}{m_s z_s \xi_{1s}} \underline{I}_r + \underline{I}_f \quad (3.144)$$

Wprowadza się pojęcie *przekładni prądowej maszyny indukcyjnej*

$$\mathfrak{D}_i = \frac{m_s z_s \xi_{1s}}{m_r z_r \xi_{1r}} \quad (3.145)$$

Prąd wirnika odniesiony do stojana

$$I'_r = \frac{1}{g_t} I_r \quad (3.146)$$



Rys. 3.79. Strumienie rozproszone stojana i wirnika oraz strumień główny maszyny indukcyjnej

Na rysunku 3.79 pokazano strumienie rozproszone stojana i wirnika oraz strumień główny maszyny indukcyjnej. Strumienie rozproszone są znacznie mniejsze niż strumień główny. Każdy z tych strumieni indukuje napięcie. Napięcie U_{1ph1} indukowane w uzwojeniu stojana przez pierwszą harmoniczną strumienia głównego, określone wzorem (3.125), jest znacznie większe niż napięcie indukowane w uzwojeniu pierwotnym przez strumień rozproszony stojana

$$U_{Xs} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} z_s \xi_{1s} \Phi_{1s} f \quad (3.147)$$

Prąd stojana I_s wywołuje na rezystancji uzwojenia stojana R_s spadek napięcia $U_{Rs} = R_s I_s$, przy czym $U_{Rs} < U_{Xs}$. Jeśli do uzwojenia stojana jest doprowadzone napięcie U , to

$$\underline{U} = \underline{U}_{1s} + \underline{U}_{Xs} + \underline{U}_{Rs} \quad (3.148)$$

W przybliżeniu można więc przyjąć, że przy pominięciu spadków napięć i przy $U = \text{const}$ jest $U_{1s} \approx U = \text{const}$. Przy stałej wartości napięcia doprowadzonego strumień wypadkowy ma wartość prawie stałą niezależną od prądu stojana (i wirnika), wypadkowe napięcie magnetyczne jest wirującą falą o rozkładzie w przybliżeniu sinusoidalnym (przy pominięciu wyższych harmonicznych). Pomijając zjawisko nasycenia obwodu magnetycznego, można uważać, że prąd magnesujący i_r jest prądem sinusoidalnie zmiennym o amplitudzie prawie stałej niezależnej od prądu płynącego przez uzwojenie stojana (prawie niezależnej od wartości momentu).

3.9.2.2. Schemat zastępczy i wykres wektorowy maszyny indukcyjnej

W uzwojeniach wirnika wirującego indukują się napięcia o częstotliwości $f_2 = sf$. Jeśli więc napięcie indukowane w uzwojeniu fazowym wirnika nieruchomego jest U_{ir} , to napięcie indukowane w uzwojeniu fazowym wirnika wirującego

$$U_{irs} = sU_{ir} \quad (3.149)$$

Zgodnie z rozważaniami p. 3.2.2.1 dotyczącymi reaktancji rozproszenia transformatora, napięcia indukowane przez strumień rozproszony stojana i wirnika można wyrazić wzorami

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{X_{ls}} &= jX_{ls} \underline{I}_s \\ \underline{U}_{X_{lr}}^s &= s\underline{U}_{X_{lr}} = jsX_{lr} \underline{I}_r \end{aligned} \right\} \quad (3.150)$$

w których: $\underline{U}_{X_{ls}}$ – napięcie indukowane w uzwojeniu stojana przez strumień rozproszony stojana; $\underline{U}_{X_{lr}}^s$ – napięcie indukowane w uzwojeniu wirnika przez strumień rozproszony wirnika przy poślizgu s ; $\underline{U}_{X_{lr}}$ – napięcie indukowane w uzwojeniu wirnika przez strumień rozproszony wirnika przy poślizgu $s = 1$ (wirnik nieruchomy); $X_{ls} = 2\pi f L_{ls}$ – reaktancja rozproszenia stojana; $X_{lr} = 2\pi f L_{lr}$ – reaktancja rozproszenia wirnika nieruchomego; L_{ls} – indukcyjność rozproszenia stojana; L_{lr} – indukcyjność rozproszenia wirnika nieruchomego.

Uzwojenie stojana ma rezystancję R_s prawie niezależną od częstotliwości, a uzwojenie wirnika ma rezystancję R_r , która przy niezbyt głębokich żłobkach jest prawie niezależna od częstotliwości.

Prąd wirnika

$$I_r = \frac{sU_{ir}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{lr})^2}} = \frac{U_{ir}}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{lr}^2}} \quad (3.151)$$

Na podstawie wzoru (3.151) rzeczywisty obwód wirnika z napięciem indukowanym sU_{ir} o częstotliwości sf , o reaktancji rozproszenia sX_{lr} zależnej od poślizgu i o rezystancji R_r niezależnej od poślizgu może być zastąpiony obwodem z napięciem indukowanym U_{ir} o częstotliwości f niezależnej od poślizgu, o reaktancji X_{lr} niezależnej od poślizgu i o rezystancji R_r/s zależnej od poślizgu. To pozwala traktować obwód wirnika jako obwód zasilany z zewnątrz napięciem U_{ir} o stałej częstotliwości.

Można napisać

$$\frac{R_r}{s} = R_r + R_r \frac{1-s}{s}$$

skąd po oznaczeniu

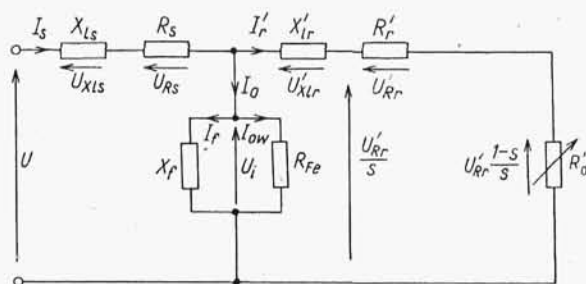
$$R_d = R_r \frac{1-s}{s}$$

otrzymuje się

$$\frac{R_r}{s} = R_r + R_d$$

Rezystancja R_r oznacza rezystancję rzeczywiście istniejącą w obwodzie wirnika, a więc rezystancję, na której moc wydzielona oznacza straty obciążeniowe. Rezystancja R_r/s oznacza rezystancję zastępczą uzwojenia wirnika wirującego, a więc moc wydzielona na niej oznacza moc obwodu wirnika, czyli moc przeniesioną przez pole elektromagnetyczne ze stojana do wirnika. Na rezystancji R_d wydzielą się straty odpowiadające momentowi elektromagnetycznemu.

Na podstawie tych rozważań można zbudować schemat zastępczy maszyny indukcyjnej, pokazany na rys. 3.80, podobny do schematu zastępczego transformatora.



Rys. 3.80. Schemat zastępczy maszyny indukcyjnej

Na schemacie zastępczym maszyny indukcyjnej odnosi się wielkości występujące w obwodzie wirnika do obwodu stojana

$$U'_r = U_r \vartheta_u$$

$$I'_r = \frac{I_r}{\vartheta_i}$$

$$R'_r = R_r \frac{m_s}{m_r} \vartheta_u^2$$

$$X'_{lr} = X_{lr} \frac{m_s}{m_r} \vartheta_u^2$$

Konieczność mnożenia przez czynnik m_s/m_r przy przenoszeniu impedancji wynika z konieczności zachowania niezmienną mocy w obwodzie oryginalnym i odniesionym.

Stanem idealnego biegu jałowego maszyny indukcyjnej nazywa się stan przy prędkości synchronicznej ($n = n_1, s = 0$). Wtedy $R'_d = R'_r \frac{1-s}{s} = \infty$, co oznacza otwarcie obwodu wtórnego, więc $I'_r = 0$. W tym stanie w maszynie występują straty w rdzeniu stojana P_{Fe} , straty mechaniczne P_m i niewielkie straty w uzwojeniu stojana P_{Cus} . Rezystancja R_{Fe} , odpowiadająca w transformatorze stratom w rdzeniu,

odpowiada w maszynie indukcyjnej przy biegu jałowym stratom $P_{\text{Fes}} + P_m$. Prąd czynny biegu jałowego I_{0w} odpowiada także stratom $P_{\text{Fes}} + P_m$.

Stanem zwarcia maszyny indukcyjnej nazywa się stan przy nieruchomym (zahamowanym) wirniku ($n = 0$, $s = 1$). Wtedy $R'_d = R'_r \frac{1-s}{s} = 0$, $U'_{Rd} = 0$, w maszynie występują straty w uzwojeniu stojana P_{Cus} i wirnika P_{Cur} oraz straty w rdzeniu stojana P_{Fes} i wirnika P_{Fer} . Przy założeniu (przybliżonym) $P_{\text{Fes}} = P_m$ rezystancja R_{Fe} (na schemacie zastępczym) ma taką samą wartość przy zwarcu co przy biegu jałowym.

Rzeczywisty bieg jałowy zachodzi przy $n_0 \approx n_1$, a zjawiska występujące w tym stanie różnią się niewiele od zjawisk występujących przy idealnym biegu jałowym. Napięcia występujące na schemacie można wyrazić następująco

$$\underline{U}'_{Rd} = R'_d \underline{I}'_r = R'_r \frac{1-s}{s} \underline{I}'_r$$

$$\underline{U}'_{Rr} = R'_r \underline{I}'_r$$

$$\frac{\underline{U}'_{Rr}}{s} = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r$$

$$\underline{U}'_{Xlr} = jX'_{lr} \underline{I}'_r$$

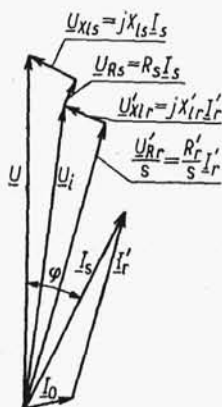
$$\underline{U}_{Rs} = R_s \underline{I}_s$$

$$\underline{U}_{Xls} = jX_{ls} \underline{I}_s$$

$$\underline{U} = \underline{U}_i + R_s \underline{I}_s + jX_{ls} \underline{I}_s$$

$$\underline{U}_i = \frac{\underline{U}'_{Rr}}{s} + jX'_{lr} \underline{I}'_r$$

Wykres wektorowy, odpowiadający schematowi zastępczemu maszyny indukcyjnej, przedstawiono na rys. 3.81.



Rys. 3.81. Wykres wektorowy maszyny indukcyjnej