

przy czym  $k_{aq} < k_{ad}$ . Na skutek tego wektor napięcia magnetycznego wypadkowego twornika wyznaczony z zależności

$$\underline{F}_a = \underline{F}_{ad} + \underline{F}_{aq}$$

nie jest w fazie z wektorem wywołującego go prądu twornika  $\underline{I}$  (rys. 3.107).

### 3.9.4.3. Schemat zastępczy i wykres wektorowy maszyny w stanie nienasyconym

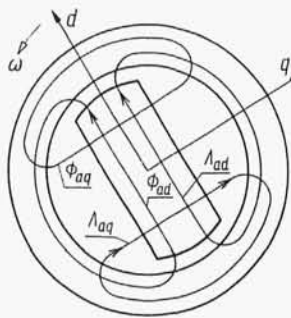
**Reaktancja reakcji twornika.** Napięcia reakcji twornika wywołane są zmiennością strumienia twornika przenikającego przez magnesy skojarzonego z uzwojeniem twornika. Prąd podłużny  $i_d = \sqrt{2} I_d \cos \omega t$  wywołuje strumień podłużnej reakcji twornika skojarzony z uzwojeniem fazy  $u$ . Ten strumień skojarzony ma maksimum w chwili, w której oś  $d$  pokrywa się z osią  $u$ , czyli kiedy  $\gamma = \omega t = 0$ .

Chwilowe wartości strumieni skojarzonych  $\Psi_{uad}$  w fazie  $u$  i opóźnionych odpowiednio o  $2\pi/3$  i  $4\pi/3$  strumieni  $\Psi_{vad}$  i  $\Psi_{wad}$  w fazach  $v$  i  $w$  można wyrazić wzorami

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{uad} &= L_{ad} \cdot \sqrt{2} I_d \cos \omega t \\ \Psi_{vad} &= L_{ad} \cdot \sqrt{2} I_d \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \Psi_{wad} &= L_{ad} \cdot \sqrt{2} I_d \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.168)$$

zgodnie z ogólną zależnością  $\Psi = Li$ .

We wzorze (3.168) podłużna indukcyjność reakcji twornika  $L_{ad}$  oznacza indukcyjność odpowiadającą permeancji  $\Lambda_{ad}$  dla strumienia podłużnej reakcji twornika  $\Phi_{ad}$  (rys. 3.108).



Rys. 3.108. Strumień podłużny i poprzeczny reakcji twornika

Trójkę strumieni magnetycznych skojarzonych fazowych  $\Psi_{uad}$ ,  $\Psi_{vad}$  i  $\Psi_{wad}$ , określonych wzorami (3.168), można traktować jako rzuty wektora strumienia skojarzonego podłużnej reakcji twornika  $\Psi_{ad}$ , który ustawiony jest w osi podłużnej maszyny, zgodnie z prądem  $i_d = \sqrt{2} I_d \cos \omega t$ , a którego moduł

$$\Psi_{ad} = L_{ad} i_d = L_{ad} \sqrt{2} I_d \cos \omega t \quad (3.169)$$

Napięcia indukowane w uzwojeniach fazowych od strumieni magnetycznych skojarzonych reakcji podłużnej twornika są równe odpowiednio pochodnym tych strumieni, zgodnie z ogólną zależnością (przy przyjęciu konwencji źródłowej, czyli prądnicowej)

$$u_i = - \frac{d\Psi}{dt}$$

stąd

$$\left. \begin{aligned} u_{iuaq} &= - \frac{d\Psi_{uad}}{dt} = -\omega L_{ad} I_d \sqrt{2} \sin \omega t \\ u_{ivaq} &= - \frac{d\Psi_{vad}}{dt} = -\omega L_{ad} I_d \sqrt{2} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ u_{iwaq} &= - \frac{d\Psi_{wad}}{dt} = -\omega L_{ad} I_d \sqrt{2} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.170)$$

Amplituda napięcia reakcji podłużnej twornika

$$U_{iaqm} = \omega L_{ad} \sqrt{2} I_d \quad (3.171)$$

a wartość skuteczna

$$U_{iaq} = \omega L_{ad} I_d \quad (3.172)$$

Trójkę napięć fazowych reakcji podłużnej twornika, określonych wzorami (3.170), można traktować jako rzuty wektora napięcia reakcji podłużnej twornika  $u_{aq}$ , który jest opóźniony o  $\pi/2$  względem wektora strumienia skojarzonego  $\Psi_{ad}$ . Wektor napięcia  $u_{aq}$  ustawiony jest w osi poprzecznej (stąd indeks  $q$ ), a jego moduł

$$u_{iaq} = \omega L_{ad} i_d = \omega L_{ad} \sqrt{2} I_d \quad (3.173)$$

Jest to analogia do wektora napięcia  $u_{if}$  ustawionego w osi  $q$ , a wywołanego przez strumień skojarzony od prądu wzbudzenia (wektor ustawiony w osi podłużnej). Wprowadza się pojęcie *podłużnej reaktancji reakcji twornika*, tj. reaktancji reakcji twornika odpowiadającej permeancji  $\Lambda_{ad}$  dla strumienia reakcji podłużnej twornika

$$X_{ad} = \omega L_{ad} \quad (3.174)$$

Stąd można napisać

$$u_{iaq} = X_{ad} i_d \quad (3.175)$$

W zapisie symbolicznym odpowiada temu wyrażenie

$$\underline{U}_{iaq} = -jX_{ad} \underline{I}_d \quad (3.176)$$

Podobnie rozpatruje się zjawiska wywołane prądem poprzecznym  $i_q = \sqrt{2} I_q$ . Wartości chwilowe strumieni skojarzonych fazowych od tego prądu są

następujące:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{uaq} &= L_{aq} \sqrt{2} I_q \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \\ \Psi_{vaq} &= L_{aq} \sqrt{2} I_q \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \Psi_{waq} &= L_{aq} \sqrt{2} I_q \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.177)$$

Indukcyjność poprzeczna reakcji twornika  $L_{aq}$  odpowiada permeancji  $\Lambda_{aq}$  (rys. 3.108). Wartościom chwilowym strumieni magnetycznych skojarzonych określonych wzorami (3.177) odpowiada wektor strumienia skojarzonego reakcji poprzecznej twornika  $\Psi_{aq}$ , który ustawiony jest w osi poprzecznej maszyny; zgodnie z prądem  $i_q = \sqrt{2} I_q$ , a którego moduł

$$\Psi_{aq} = L_{aq} i_q = L_{aq} \sqrt{2} I_q \quad (3.178)$$

Te strumienie skojarzone indukują w uzwojeniach fazowych twornika napięcie

$$\left. \begin{aligned} u_{iud} &= - \frac{d\Psi_{uaq}}{dt} = -\omega L_{aq} I_q \sqrt{2} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \\ u_{ivd} &= - \frac{d\Psi_{vaq}}{dt} = -\omega L_{aq} I_q \sqrt{2} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ u_{iwd} &= - \frac{d\Psi_{waq}}{dt} = -\omega L_{aq} I_q \sqrt{2} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.179)$$

o amplitudzie

$$U_{iadm} = \omega L_{aq} \sqrt{2} I_q \quad (3.180)$$

i wartości skutecznej

$$U_{iad} = \omega L_{aq} I_q \quad (3.181)$$

Odpowiada temu wektor napięcia poprzecznej reakcji twornika  $u_{iad}$  opóźniony względem wektora strumienia skojarzonego  $\Psi_{aq}$  o  $\pi/2$ , czyli ustawiony w osi  $d$  (przy  $i_q > 0$  wektor  $u_{iad}$  ma zwrot przeciwny do zwrotu osi  $d$ ). Moduł wektora  $u_{iad}$

$$u_{iad} = \omega L_{aq} i_q = \omega L_{aq} \sqrt{2} I_q \quad (3.182)$$

Reaktancja poprzeczna reakcji twornika, odpowiadająca permeancji  $\Lambda_{aq}$  dla strumienia reakcji poprzecznej twornika, jest określona wzorem

$$X_{aq} = \omega L_{aq} \quad (3.183)$$

Stąd zależność

$$u_{iad} = X_{aq} i_q \quad (3.184)$$

oraz w zapisie symbolicznym

$$\underline{U}_{iad} = -jX_{aq} I_q \quad (3.185)$$

W maszynie z biegunami wydawnymi permeancja  $\Lambda_{aq}$  odpowiada drodze strumienia o długich odcinkach w powietrzu, a permeancja  $\Lambda_{ad}$  odpowiada drodze strumienia o krótkich odcinkach w powietrzu. Dlatego

$$\Lambda_{aq} < \Lambda_{ad}$$

$$L_{aq} < L_{ad}$$

$$X_{aq} < X_{ad}$$

Wzdłuż drogi strumienia reakcji poprzecznej twornika wartości napięcia magnetycznego na odcinkach drogi w powietrzu (o stałe przenikalności magnetycznej  $\mu$ ) są wielokrotnie większe od napięcia magnetycznego w stali, a więc  $\Lambda_{aq}$ ,  $L_{aq}$  i  $X_{aq}$  nie zależą od nasycenia obwodu magnetycznego. Rozpatrując strumień reakcji podłużnej twornika dochodzi się do wniosku, że wartości  $\Lambda_{ad}$ ,  $L_{ad}$  i  $X_{ad}$  maleją ze wzrostem nasycenia magnetycznego.

Dla maszyny z biegunami utajonymi, przy pominięciu zwiększenia szczeliny w osi poprzecznej (przez żłobki) można przyjąć

$$\Lambda_{aq} = \Lambda_{ad} = \Lambda_a$$

$$L_{aq} = L_{ad} = L_a$$

$$X_{aq} = X_{ad} = X_a$$

Taka reaktancja reakcji twornika  $X_a$ , jednakowa w osi  $d$  i  $q$ , zależy od nasycenia. Wtedy napięcia oddziaływania twornika są następujące:

– podłużne

$$\underline{U}_{iad} = X_a I_q \quad (3.186)$$

– poprzeczne

$$\underline{U}_{iaq} = X_a I_d \quad (3.187)$$

W takim przypadku można stosować pojęcie napięcia reakcji twornika

$$\underline{U}_{ia} = X_a I \quad (3.188)$$

którego kierunek określa się z zależności

$$\underline{U}_{ia} = -jX_a I \quad (3.189)$$

**Reaktancja rozproszenia twornika.** Strumienie rozproszone poszczególnych faz zgodnie z rys. 3.92, są strumieniami jednofazowymi, nieskojarzonymi we wspólny strumień wirujący. Strumienie skojarzone magnetyczne poszczególnych faz od tych strumieni rozproszonych, wywołanych prądami fazowymi, mogą być wyrażone wzorami

$$\left. \begin{aligned} \psi_{ul} &= L_{al} i_u \\ \psi_{vl} &= L_{al} i_v \\ \psi_{wl} &= L_{al} i_w \end{aligned} \right\} \quad (3.190)$$

Jeżeli prądy fazowe wyrazić według wzoru (3.162), to

$$\left. \begin{aligned} \psi_{ul} &= L_{al} \sqrt{2} I \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \psi \right) \\ \psi_{vl} &= L_{al} \sqrt{2} I \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \psi - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \psi_{wl} &= L_{al} \sqrt{2} I \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \psi - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.191)$$

a napięcia indukowane w fazach uzwojenia twornika przez strumienie rozproszone są następujące:

$$\left. \begin{aligned} u_{ul} &= -\frac{d\psi_{ul}}{dt} = -\omega L_{al} \sqrt{2} I \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \psi \right) \\ u_{vl} &= -\frac{d\psi_{vl}}{dt} = -\omega L_{al} \sqrt{2} I \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \psi - \frac{2\pi}{3} \right) \\ u_{wl} &= -\frac{d\psi_{wl}}{dt} = -\omega L_{al} \sqrt{2} I \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \psi - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.192)$$

Napięcia takie można traktować jako rzuty wirującego wektora  $u_{il}$ , którego moduł

$$u_{il} = \omega L_{al} i = \omega L_{al} \sqrt{2} I \quad (3.193)$$

Wielkość  $X_l = \omega L_{al}$  nazywa się *reaktancją rozproszenia twornika*. Indukcyjność  $L_{al}$  i reaktancja  $X_l$  nie zależą od położenia osi  $d$  i  $q$ , ponieważ od tego położenia nie zależy permeancja dla strumienia rozproszonego.

Strumienie rozproszone na znacznej części swej drogi przebiegają przez powietrze (albo przez miedź żłobka), więc z dostateczną dokładnością można przyjąć, że wielkości  $A_{al}$ ,  $L_{al}$  i  $X_l = \omega L_{al}$  mają wartości stałe, niezależne od nasycenia obwodu magnetycznego.

Wektor  $u_{il}$  jest opóźniony względem wektora  $i$  o  $\pi/2$ . Słuszna jest zależność

$$u_{ix} = X_l i \quad (3.194)$$

a w zapisie symbolicznym

$$\underline{U}_{ix} = -jX_l \underline{I} \quad (3.195)$$

Reaktancja rozproszenia jest głównym elementem ograniczającym udarowe prądy zwarciove i dlatego jej minimalna wartość względna w turbogeneratorach wynosi zwykle nie mniej niż  $X_{rel} = 0,12$ .

**Reaktancja synchroniczna.** Reaktancja synchroniczna  $X$  jest to reaktancja uzwojenia stojana, odpowiadająca permeancji dla całego strumienia twornika  $\Phi_a$ . Permeancja  $A_s$  jest sumą permeancji  $A_{af}$  na drodze strumienia reakcji twornika i permeancji  $A_{al}$  na drodze strumienia rozproszonego, czyli

$$A_s = A_{af} + A_{al} \quad (3.196)$$

Odpowiednio do tego, indukcyjność synchroniczna

$$L_s = L_{af} + L_{at} \quad (3.197)$$

oraz reaktancja synchroniczna

$$X = X_a + X_t \quad (3.198)$$

Reaktancja reakcji twornika  $X_a$  zależy od ustawienia osi magnetycznych wirnika względem strumienia reakcji twornika. Reaktancja synchroniczna  $X$  zależy także od tego ustawienia.

Podobnie jak w przypadku reaktancji reakcji twornika, rozróżnia się *reaktancję synchroniczną podłużną*

$$X_d = X_{ad} + X_t \quad (3.199)$$

oraz *reaktancję synchroniczną poprzeczną*

$$X_q = X_{aq} + X_t \quad (3.200)$$

W ogólnym przypadku dla maszyny z biegunami wydatnymi  $X_d > X_q$ . Dla turbogeneratorów można z dostateczną dokładnością przyjmować  $X_d = X_q$ .

Reaktancja podłużna reakcji twornika zależy od nasycenia obwodu magnetycznego, więc od nasycenia zależy także reaktancja synchroniczna podłużna. Najczęściej podaje się wartości reaktancji synchronicznej dla stanu nienasyconego.

Wartości reaktancji synchronicznej podłużnej i poprzecznej zależą od konstrukcji maszyny synchronicznej i dlatego reaktancje maszyn synchronicznych z różnych fabryk i o różnych mocach mają różne wartości. Wartości względne reaktancji synchronicznej podłużnej dla stanu nienasyconego w turbogeneratorach konstrukcji Dolmela o mocy 5 ÷ 160 MW

$$X_{drel} = 1,96 \div 2,34$$

W tych generatorach reaktancja synchroniczna poprzeczna jest oczywiście równa reaktancji synchronicznej podłużnej. Wartości względne reaktancji synchronicznej podłużnej czterobiegunowych generatorów (z biegunami wydatnymi) tej samej firmy

$$X_{drel} = 1,5 \div 2,0$$

Wartości reaktancji synchronicznej poprzecznej można oszacować według zależności

$$X_{qrel} = 0,6 X_{drel}$$

Napięcia od strumieni reakcji twornika i rozproszonego są ze sobą w fazie. Suma tych napięć

$$U_{is} = U_{ia} + U_{ix} \quad (3.201)$$

nazywa się *napięciem synchronicznym*. Jest to napięcie indukowane w uzwojeniu twornika, na skutek zmienności strumienia magnetycznego skojarzonego od reakcji twornika i strumienia rozproszonego twornika. Śluszna jest zależność

$$\underline{U}_{is} = -j(X_a + X_t)\underline{I} = -jX\underline{I} \quad (3.202)$$

Wzory (3.196) ÷ (3.198) i (3.202) można stosować tylko do maszyn z biegunami utajonymi. W przypadku maszyn z biegunami wydajnymi należy rozpatrywać zjawiska w osiach  $d$  i  $q$ , rozróżniać  $X_d$  i  $X_q$  oraz odpowiednio napięcie synchroniczne podłużne i poprzeczne.

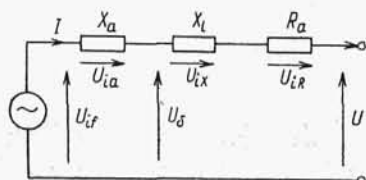
**Rezystancja uzwojenia twornika.** Symbolem  $R_{a-}$  oznacza się rezystancję fazy uzwojenia twornika przy równomiernej gęstości prądu, czyli rezystancję, jaką to uzwojenie przeciwstawia prądowi stałemu. Dla prądu przemiennego ta rezystancja jest większa  $R_a = k_R R_{a-}$ , przy dobrze wykonanym przepleceniu elementarnych przewodów (rys. 3.36)  $k_R = 1,10 \div 1,15$ . Jeżeli traktować rezystancję  $R_a$  jako rezystancję, na której wydzielają się wszystkie straty obciążeniowe, zawierające także straty dodatkowe od wyższych harmonicznych pola wirującego przy obciążeniu, to  $R_a$  ma wartość kilkakrotnie większą od  $R_{a-}$ . Dla dużych maszyn synchronicznych, np. dla turbogeneratorów względna wartość  $R_a$  nie przekracza na ogół 0,003 i przy wykonywaniu wykresów wektorowych jest pomijalnie mała w porównaniu z reaktancjami.

Napięcie

$$\underline{U}_{iR} = -R_a \underline{I}$$

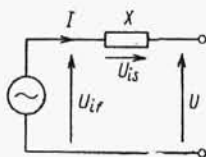
równoważy spadek napięcia na rezystancji  $R_a$ .

**Schemat zastępczy.** Schemat zastępczy maszyny synchronicznej, złożony z omówionych dotychczas elementów, pokazano na rys. 3.109. Napięcie od strumienia magnesów przedstawiono jako źródło napięcia  $U_{if}$ . W szereg z nim są włączone elementy: reaktancja oddziaływania twornika  $X_a$ , reaktancja rozproszenia  $X_l$  i rezystancja  $R_a$ .



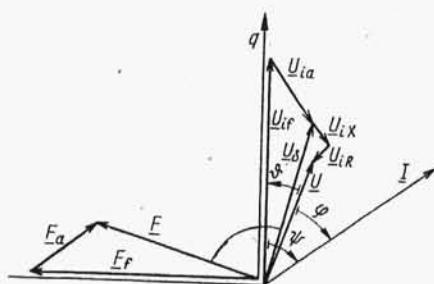
Rys. 3.109. Schemat zastępczy maszyny synchronicznej

Na tych elementach występują odpowiednio napięcia:  $U_{ia}$ ,  $U_{ix}$  i  $U_{iR}$ . Rezystancja  $R_a$  jako bardzo mała, może być w uproszczonych rozważaniach pominięta. Reaktancje  $X_a$  i  $X_l$  mogą być zastąpione reaktancją synchroniczną  $X$ . Wtedy otrzymuje się uproszczony schemat zastępczy maszyny synchronicznej (rys. 3.110). Schematy zastępcze przedstawione na rys. 3.109 i 3.110 nie mogą być stosowane dla maszyny z  $X_{ad} \neq X_{aq}$  (z biegunami wydajnymi). Dla takich maszyn można stosować inny schemat w osi podłużnej (z  $X_{ad}$  albo  $X_d$ ) i inny schemat w osi poprzecznej (z  $X_{aq}$  albo  $X_q$ ).



Rys. 3.110. Uproszczony schemat zastępczy maszyny synchronicznej

**Wykres wektorowy maszyny z biegunami utajonymi w stanie nienasyconym.** W stanie nienasyconym reaktancja  $X_a = \text{const}$ . Napięcie magnetyczne wzbudzenia, którego wektor  $\underline{F}_f$  jest ustawiony w osi podłużnej, indukuje napięcie  $\underline{U}_{if}$  ustawione w osi poprzecznej (rys. 3.111). Prąd  $\underline{I}$  jest opóźniony względem  $\underline{U}_{if}$  o kąt  $\psi$ . Taki sam zwrot



Rys. 3.111. Wykres wektorowy maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi w stanie nienasyconym

jak wektor prądu (rozpatruje się maszynę z biegunami utajonymi) ma wektor napięcia magnetycznego twornika  $\underline{F}_a$ , który dodany do wektora napięcia magnetycznego  $\underline{F}_f$  daje w sumie wektor napięcia magnetycznego wypadkowego

$$\underline{F} = \underline{F}_f + \underline{F}_a \quad (3.203)$$

Napięcia  $\underline{U}_{ia}$  i  $\underline{U}_{ix}$  są opóźnione o  $\pi/2$  względem prądu  $\underline{I}$  (i napięcia magnetycznego  $\underline{F}_a$ ).

Napięcie szczelinowe

$$\underline{U}_{\delta} = \underline{U}_{if} + \underline{U}_{ia} \quad (3.204)$$

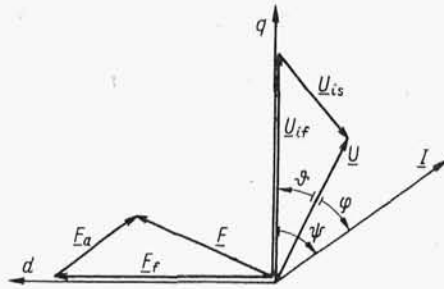
jest wywołane wypadkowym strumieniem  $\Phi$  w szczelinie i napięciem magnetycznym wypadkowym  $\underline{F}$ . Napięcie  $\underline{U}_{\delta}$  jest opóźnione o  $\pi/2$  względem napięcia magnetycznego wypadkowego. Napięcie rozproszenia  $\underline{U}_{ix}$  jest opóźnione o  $\pi/2$  względem prądu  $\underline{I}$ , a napięcie  $\underline{U}_{ir}$  jest przeciwnie skierowane do prądu  $\underline{I}$ . Suma wszystkich napięć jest równa napięciu na zaciskach maszyny, wytworzonemu przez zjawiska zachodzące w maszynie (w dalszym ciągu napięcie to będzie nazywane *napięciem maszyny*)

$$\underline{U} = \underline{U}_{\delta} + \underline{U}_{ix} + \underline{U}_{ir} = \underline{U}_{if} + \underline{U}_{ia} + \underline{U}_{ix} + \underline{U}_{ir} \quad (3.205)$$

Miedzy wektorem napięcia  $\underline{U}$  i prądu  $\underline{I}$  jest kąt  $\varphi$ . Miedzy wektorem napięcia  $\underline{U}$  i napięcia  $\underline{U}_{if}$  jest kąt  $\vartheta$ , zwany *kątem obciążenia maszyny synchronicznej*.

Często korzysta się z uproszczonego wykresu maszyny synchronicznej (rys. 3.112), odpowiadającego uproszczonemu schematowi zastępczemu z rys. 3.110.

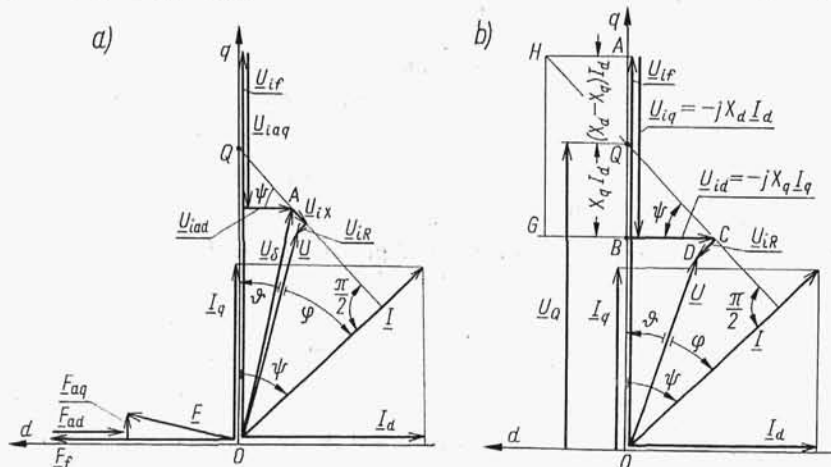




Rys. 3.112. Wykres wektorowy odpowiadający uproszczonemu schematowi zastępczemu maszyny synchronicznej

**Wykres wektorowy maszyny z biegunami wydatnymi w stanie nienasyconym.** Napięcie magnetyczne wzbudzenia, którego wektor  $\underline{F}_f$  jest ustawiony w osi podłużnej, indukuje napięcie  $\underline{U}_{if}$  ustawione w osi poprzecznej (rys. 3.113). Prąd  $\underline{I}$  opóźniony względem  $\underline{U}_{if}$  o kąt  $\psi$  jest rozłożony na składowe: prąd podłużny  $\underline{I}_d$  i prąd poprzeczny  $\underline{I}_q$ . Wartości tych prądów mogą być obliczone według wzorów (3.163). Prądy:  $\underline{I}_d$  i  $\underline{I}_q$  wywołują odpowiednio przepływ podłużny  $\underline{\Theta}_{ad}$ , którego wartość można obliczyć według wzoru (3.165) i przepływ poprzeczny  $\underline{\Theta}_{aq}$ , którego wartość można obliczyć według wzoru (3.164). Należy przy tym pamiętać, że nie ma proporcji między przepływami  $\underline{\Theta}_{ad}$  i  $\underline{\Theta}_{aq}$  oraz prądami  $\underline{I}_d$  i  $\underline{I}_q$ , ponieważ współczynniki  $k_{ad}$  i  $k_{aq}$  mają różne wartości. Przepływ podłużny twornika  $\underline{\Theta}_{ad}$  wzbudza napięcie poprzeczne reakcji twornika  $\underline{U}_{iaq}$ , określone wzorem (3.176), ustawione w osi poprzecznej. Przepływ poprzeczny twornika  $\underline{\Theta}_{aq}$  wzbudza napięcie podłużne reakcji twornika  $\underline{U}_{iad}$ , określone wzorem (3.185), ustawione w osi podłużnej. Napięcie szeliniowe

$$\underline{U}_s = \underline{U}_{if} + \underline{U}_{iaq} + \underline{U}_{iad} \quad (3.206)$$



Rys. 3.113. Wykresy wektorowe maszyny synchronicznej z biegunami wydatnymi w stanie nienasyconym

jest wywołane wypadkowym napięciem magnetycznym

$$\underline{F} = \underline{F}_f + \underline{F}_{ad} + \underline{F}_{aq} \quad (3.207)$$

Po dodaniu do napięcia  $\underline{U}_\delta$  napięcia rozproszenia  $\underline{U}_{iX} = -jX_l \underline{I}$  oraz  $\underline{U}_{iR} = -R\underline{I}$ , otrzymuje się napięcie

$$\underline{U} = \underline{U}_\delta + \underline{U}_{iX} + \underline{U}_{iR} = \underline{U}_{if} + \underline{U}_{iaq} + \underline{U}_{iad} + \underline{U}_{iX} + \underline{U}_{iR} \quad (3.208)$$

Jeśli z punktu  $A$ , będącego końcem wektora  $\underline{U}_\delta$  (rys. 3.113a) poprowadzić prostą prostopadłą do wektora  $\underline{I}$ , to poprzecina ona oś  $q$  w punkcie  $Q$ . Wtedy

$$\overline{AQ} = \frac{U_{iad}}{\cos \psi} = \frac{I_q X_{aq}}{\cos \psi} = X_{aq} I$$

Na rysunku 3.113b pokazano inny sposób wykonania wykresu wektorowego maszyny synchronicznej z biegunami wydawnymi w stanie nienasyconym. Napięcia na reaktancjach oddziaływania twornika i na reaktancjach rozproszenia traktuje się łącznie. Do napięcia  $\underline{U}_{if}$  dodaje się napięcie synchroniczne poprzeczne (na reaktancji synchronicznej podłużnej)

$$\underline{U}_{iq} = -jX_d \underline{I}_d$$

i napięcie synchroniczne podłużne (na reaktancji synchronicznej poprzecznej)

$$\underline{U}_{id} = -jX_q \underline{I}_q$$

Dodając jeszcze napięcie  $\underline{U}_{iR}$  otrzymuje się napięcie

$$\underline{U} = \underline{U}_{if} + \underline{U}_{id} + \underline{U}_{iq} + \underline{U}_{iR} \quad (3.209)$$

Z rysunku można obliczyć

$$\overline{CQ} = \frac{U_{id}}{\cos \psi} = \frac{X_q I_d}{\cos \psi} = X_q I$$

$$\overline{QB} = \overline{QC} \sin \psi = X_q I \sin \psi = X_q I_d$$

$$\overline{CH} = \frac{\overline{AB}}{\sin \psi} = \frac{X_d I_d}{\sin \psi} = X_d I$$

$$\overline{GB} = \overline{GC} - \overline{BC} = X_d I_q - X_q I_q = (X_d - X_q) I_q$$

$$\overline{AQ} = \overline{AB} - \overline{QB} = X_d I_d - X_q I_d = (X_d - X_q) I_d$$

Można wprowadzić oznaczenie

$$\underline{U}_Q = \overline{OQ} = U + R\underline{I} + jX_q \underline{I}$$

czyli

$$\underline{U}_Q = \underline{U} + (R + jX_q) \underline{I} \quad (3.210)$$

Wielkość  $U_Q$  nazywa się *napięciem za reaktancją synchroniczną poprzeczną*. Jest to napięcie jakie przy danym obciążeniu musiałoby być wzbudzone przez napięcie

magnetyczne od prądu wzbudzenia gdyby reaktancja synchroniczna podłużna była równa reaktancji synchronicznej poprzecznej. Wykresy wektorowe pokazane na rys. 3.113 są nazywane *wykresami Blondella*.

### 3.10. WZBUDZANIE MASZYN ELEKTRYCZNYCH

#### 3.10.1. Wiadomości ogólne

Każda maszyna elektryczna ma uzwojenie, do którego doprowadza się, albo od którego odprowadza się przetwarzaną energię elektryczną. Takimi uzwojeniami są uzwojenia twornika maszyny synchronicznej i maszyny prądu stałego, uzwojenie stojana albo wirnika maszyny indukcyjnej oraz uzwojenie pierwotne i uzwojenie wtórne transformatora. Transformatory i maszyny indukcyjne nie mają innych uzwojeń, oprócz tych do których doprowadza się albo od których odprowadza się przetwarzaną energię elektryczną. W tych maszynach strumień główny jest wytwarzany przez jedno z tych uzwojeń i przez jedno z tych uzwojeń płynie prąd magnesujący. Prąd ten płynie pod wpływem doprowadzonego z zewnątrz napięcia. Wartość prądu magnesującego odpowiada wywołanemu przez niego strumieniowi, pod wpływem którego indukuje się w tym samym uzwojeniu napięcie, prawie równe napięciu doprowadzonemu, bo różniącemu się od napięcia zewnętrznego tylko o spadki napięć na rezystancji i reaktancji rozproszenia tego uzwojenia.

Maszyny prądu stałego i maszyny synchroniczne mają oddzielne uzwojenia wzbudzające, przez które przepływa prąd stały. Do tych uzwojeń doprowadza się energię elektryczną, która spełnia pomocniczą rolę w procesie przetwarzania elektromechanicznego energii i jest przetwarzana na ciepło (ulega dyssypacji), ale nie jest przetwarzana na energię mechaniczną.

W stanie pracy prądnicowej te maszyny mogą pracować jako prądnice obcowzbudne albo samowzbudne. W prądnicy obcowzbudnej prąd wzbudzenia płynie pod wpływem obcego źródła napięcia. W prądnicy samowzbudnej prąd wzbudzenia płynie pod wpływem napięcia twornika, które na początku procesu wzbudzenia jest indukowane pod wpływem strumienia magnetycznego od remanencji. W takim układzie dla uzyskania prawidłowego procesu samowzbudzenia się maszyn musi być spełniony szereg warunków.

#### 3.10.2. Wzbudzanie maszyn prądu stałego

Schemat ideowy połączeń prądnicy obcowzbudnej prądu stałego przedstawiono na rys. 3.114. Wartość prądu wzbudzenia  $I_f$  płynącego pod wpływem obcego źródła napięcia reguluje się przez zmianę rezystancji dodatkowej  $R_{fz}$ , włączonej w obwód uzwojenia wzbudzającego. Prądnica obcowzbudna prądu stałego ma dobre właściwości regulacyjne, ale wadą jej jest konieczność dysponowania oddzielnym źródłem napięcia. Uzwojenie twornika oznacza się literami  $A1-A2$ , a uzwojenie wzbudzające zasilane z obcego źródła – literami  $F1-F2$ .