

3.9.3. Stan obciążenia maszyny prądu stałego

3.9.3.1. Pole magnetyczne wypadkowe maszyny prądu stałego

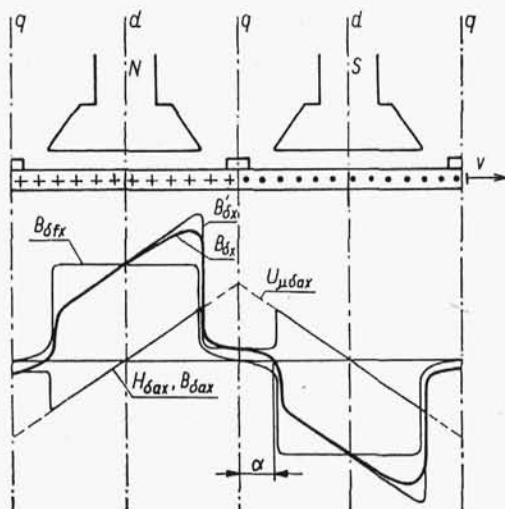
Zgodnie z uwagami podanymi w p. 3.3.2 maszyna prądu stałego może pracować jak prądnica albo jak silnik. Przy pracy prądnicowej bilans napięć jest określony wzorem (3.50), a przy pracy silnikowej wzorem (3.53). Prąd twornika

$$I_a = \pm \frac{U - U_i}{R_{at}} \quad (3.152)$$

przy czym znak „+” odpowiada pracy silnikowej, a znak „-” odpowiada pracy prądnicowej. Przy pracy prądnicowej prąd płynie zgodnie z kierunkiem napięcia indukowanego, a przy pracy silnikowej – przeciwnie do kierunku napięcia indukowanego.

Na rysunku 3.57 pokazano rozkład indukcji (i natężenia pola magnetycznego) na obwodzie maszyny prądu stałego od prądu wzbudzenia, natomiast rozkład napięcia magnetycznego i natężenia pola magnetycznego od prądu twornika przy szczotkach ustawionych w osi q i przy szczotkach wysuniętych z osi q przedstawiono na rys. 3.62 i 3.63.

W prądnicy prądu stałego ze szczotkami ustawionymi w osi q indukcja wypadkowa w szczelinie $B_{\delta x}$ jest sumą indukcji w szczelinie od prądu wzbudzenia $B_{\delta f x}$ i indukcji w szczelinie od prądu twornika (od reakcji twornika) $B_{\delta a x}$ (rys. 3.82). Przy pracy prądnicowej kierunek prądu, zaznaczony krzyżykami i kropkami na warstwie oznaczającej okład prądu twornika, jest zgodny z kierunkiem napięcia indukowanego. Dany kierunek prądu twornika narzuca obszar umownie dodatniego napięcia magnetycznego na szczelinie od prądu twornika $U_{\mu \delta a x}$ i obszar



Rys. 3.82. Pole magnetyczne wypadkowe w prądnicy prądu stałego ze szczotkami ustawionymi w osi q

umownie ujemnego tego napięcia. Odwrócenie kierunku prądu twornika, co ma miejsce przy pracy silnikowej, powoduje zmianę znaku $U_{\mu\delta ax}$. Przy liniowym obwodzie magnetycznym krzywą rozkładu indukcji wypadkowej byłaby krzywa $B'_{\delta x}$. Wartość strumienia magnetycznego wypadkowego przy obciążeniu (pole między krzywą $B'_{\delta x}$ i osią odciętych) byłaby równa wartości strumienia magnetycznego przy biegu jałowym (obszar między krzywą $B_{\delta fx}$ i osią odciętych). Na skutek nasycenia obwodu magnetycznego pod połową nabiegunka indukcja wypadkowa $B_{\delta x}$ jest odpowiednio mniejsza. Przy nasyconym obwodzie magnetycznym poprzeczna reakcja twornika powoduje pewne zmniejszenie strumienia wypadkowego w stosunku do strumienia przy biegu jałowym (od prądu wzbudzenia).

Przy biegu jałowym indukcja od prądu wzbudzenia $B_{\delta fx}$ ma wartość równą zeru w punkcie na obwodzie twornika, przez który przechodzi oś poprzeczna q . Ujmuje się to stwierdzeniem: przy biegu jałowym oś neutralna maszyny pokrywa się z osią poprzeczną. Na skutek poprzecznej reakcji twornika (reakcji twornika przy szczotkach ustawionych w osi q) oś neutralna jest przesunięta względem osi poprzecznej o kąt α , jak na rysunku 3.82. Jeśli szczotki są ustawione w osi q , to zwierają one zezwoje, których boki leżą w polu o indukcji różnej od zera.

Przy szczotkach przesuniętych względem osi poprzecznej o kąt β i o odciętek łuku b_r , jak na rys. 3.83, w przepływie twornika można rozróżnić przepływ twornika podłużny

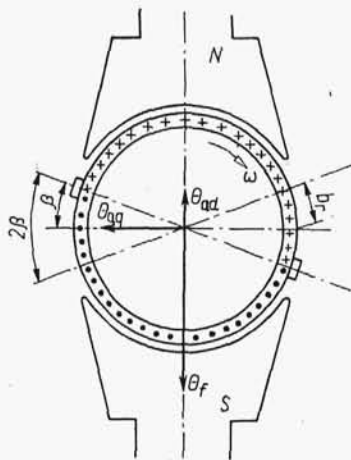
$$\Theta_{ad} = 2b_r A = \beta DA \quad (3.153)$$

i przepływ twornika poprzeczny

$$\Theta_{aq} = \left(\frac{\pi D}{2} - 2b_r \right) A = \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) DA \quad (3.154)$$

przy czym: D – średnica twornika; A – okład prądu twornika.

Przepływ twornika podłużny Θ_{ad} jest skierowany przeciwnie do przepływu wzbudzenia Θ_f i rozmagnesowuje maszynę. Przepływ poprzeczny Θ_{aq} działa podobnie



Rys. 3.83. Przepływy w maszynie prądu stałego obciążonej

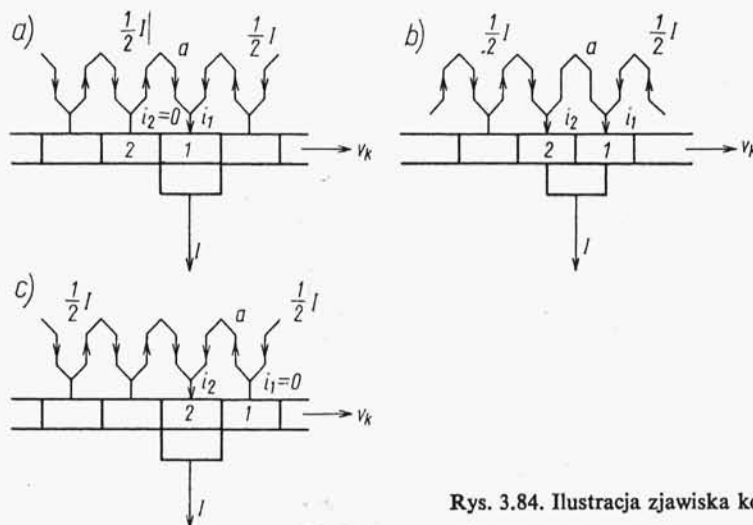
jak przepływ twornika przy szczotkach ustawionych w osi q . Rozkład indukcji wypadkowej w maszynie prądu stałego obciążonej ze szczotkami przesuniętymi z osi q można uzyskać w sposób analogiczny jak dla maszyny ze szczotkami ustawionymi w osi q (rys. 3.82), jeśli jako krzywą rozkładu indukcji od prądu twornika weźmie się krzywą $B_{\delta ax}$ z rys. 3.63. Otrzyma się krzywą wypadkową bardziej zniekształconą niż przedstawiona na rys. 3.82, większe zmniejszenie strumienia wypadkowego i większy kąt α przesunięcia strefy neutralnej.

3.9.3.2. Komutacja

Komutacją nazywa się zmianę kierunku prądu w zezwoju twornika w czasie, gdy jest on zwarty przez szczotkę, tj. w czasie przechodzenia zezwoju z jednej gałęzi równoległej twornika do drugiej.

Na rysunku 3.84 pokazano zezwój a w różnych fazach komutacji. Przy prędkości komutatora v_k i szerokości szczotki b_s czas trwania komutacji, zwany *okresem komutacji*

$$T = \frac{b_s}{v_k}$$



Rys. 3.84. Ilustracja zjawiska komutacji

W tym czasie prąd w zezwoju a zmienia się od wartości $+I/2$ do wartości $-I/2$. Można przyjąć uproszczenie, że zmiana prądu w zezwoju a nie indukuje w tym zezwoju napięcia (transformacji). Odpowiada to przyjęciu $v_k = 0$ albo $L_a = 0$ (L_a – indukcyjność zezwoju a). Można także przyjąć, że rezystancja zezwoju jest równa zeru. Wtedy o rozplywie prądu na połączeniu z wycinkami komutatora decyduje jedynie rezystancja przejścia między tymi wycinkami i częściami szczotki przylegającymi do tych wycinków. Ta rezystancja zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do szerokości części szczotki przylegającej do danego wycinka. Dla tak uproszczo-

nego zjawiska komutacji prąd w zezwoju komutującym wyraża się wzorem

$$i = \frac{I}{2} \left(1 - 2 \frac{t}{T} \right) \quad (3.155)$$

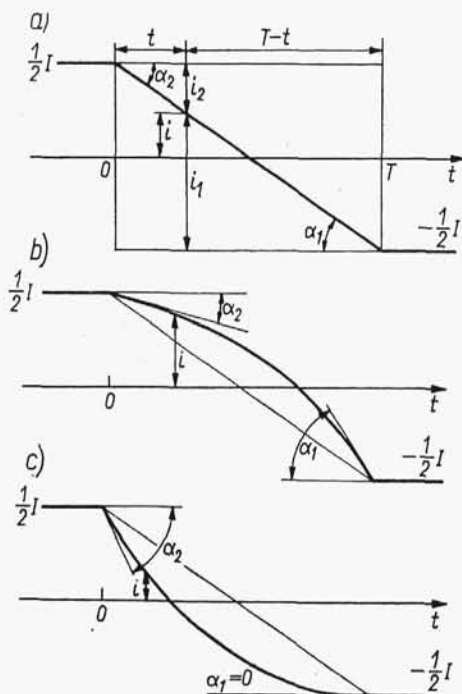
co oznacza komutację prostoliniową (rys. 3.85a). Gęstość prądu pod krańcem szczotki schodzącym z wycinka komutatora wynosi

$$g_1 = c \operatorname{tg} \alpha_1$$

a gęstość prądu pod krańcem szczotki wchodzącym na wycinek komutatora wynosi

$$g_2 = c \operatorname{tg} \alpha_2$$

Przy komutacji prostoliniowej jest $\alpha_1 = \alpha_2$, co znaczy, że gęstość prądu pod szczotką w czasie komutacji ma wartość stałą. Taki przebieg komutacji jest korzystny.

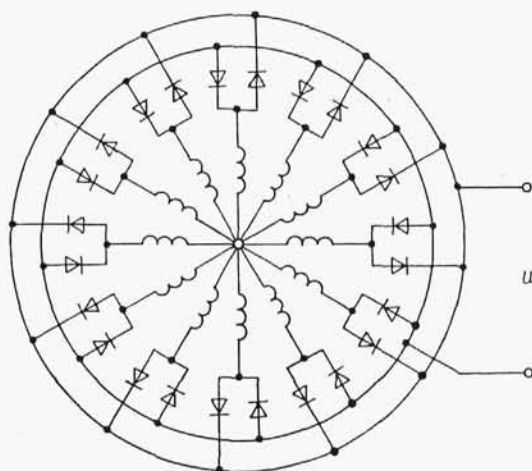


Rys. 3.85 Przebiegi komutacji: a) komutacja prostoliniowa; b) komutacja opóźniona; c) komutacja przyspieszona

W rzeczywistości zmiana prądu w zezwoju komutującym powoduje powstanie napięcia samoindukcji, przeciwstawiającego się zmianom, a więc opóźniającego przebieg komutacji (rys. 3.85b). W tym przypadku gęstość prądu pod krańcem szczotki schodzącym z wycinka komutatora jest duża. Tak więc gęstość prądu w chwili przerywania obwodu zwartego jest duża i istnieje niebezpieczeństwo powstania iskier. Dlatego trzeba w strefie komutacyjnej wytworzyć obce pole magnetyczne, które in-

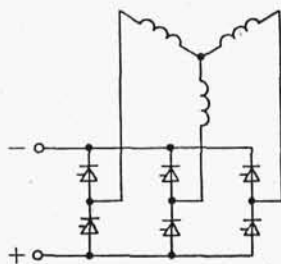
dukuje w zezwoju zwartym napięcie przeciwnie skierowane do napięcia samoindukcyjnego od zmian prądu twornika i napięcia indukowanego na skutek ruchu prętów twornika w polu magnetycznym istniejącym w osi poprzecznej maszyny i wymusza przebieg komutacji przyspieszony, leżący pomiędzy prostoliniowym i stycznym na rys. 3.85c.

Zamiast komutatora mechanicznego można stosować komutator elektroniczny. Na rysunku 3.86 pokazano schemat ideowy komutatora elektronicznego prądnicy z uzwojeniem wielofazowym. Uzwojenie twornika jest uzwojeniem wielofazowym o dużej liczbie faz (np. $q = 1$). Uzwojenia fazowe są z jednej strony zwarte we wspólny punkt zerowy, a z drugiej są połączone przez układ dwóch diod z dwoma pierścieniami stanowiącymi bieguny maszyny. Uzwojenie twornika z prostownikami może być umieszczone na wirniku (wirujące diody) albo w stojanie.



Rys. 3.86. Schemat ideowy komutatora elektronicznego prądu stałego z uzwojeniem wielofazowym

Przykładowy schemat połączeń uzwojeń twornika silnika prądu stałego z komutatorem elektronicznym przedstawiono na rys. 3.87. Magnesnicą jest wirnik, którego osie d i q są osiami wirującymi. Uzwojenie twornika (w tym przypadku trójfazowe) umieszczone w stojanie współpracuje z układem tyrystorów. Dla uży-



Rys. 3.87. Przykładowy schemat połączeń uzwojeń twornika silnika prądu stałego z komutatorem elektronicznym

skania maksymalnego momentu obrotowego oś przepływu twornika powinna tworzyć z osią przepływu magnesów kąt równy (średnio) $\pi/2$. Dlatego tyrystorowe łączniki w obwodach uzwojenia twornika muszą być sterowane. Na wirniku jest umieszczony wirujący impulsator wykrywacza położenia biegunów. Rozmieszczone odpowiednio w stojanie czujniki przyjmują informację od impulsatora i przetwarzają ją na impulsy, powodujące odblokowanie albo zablokowanie odpowiednich łączników uzwojenia twornika. W ten sposób uzyskuje się zmianę kierunku przepływów w poszczególnych uzwojeniach fazowych twornika i wirowanie pola magnetycznego twornika. W tym przypadku komutator elektroniczny składa się z wykrywacza położenia biegunów (wirującego impulsatora i nieruchomych czujników), układu sterowania i łączników w uzwojeniu twornika.

3.9.3.3. Iskrzenie

W maszynach prądu stałego z komutatorem mechanicznym występuje iskrzenie. Przyczynami iskrzenia mogą być np.:

- ekscentryczność komutatora;
- wystająca izolacja międzywycinkowa;
- złe umocowanie szczotkotrzymaczy;
- zbyt duża albo zbyt mała odległość szczotkotrzymaczy od powierzchni komutatora;
- nieprawidłowy nacisk na szczotkę;
- niecyldryczna powierzchnia komutatora i szczotki.

Wymienione przyczyny powodują niedokładne przyleganie szczotek do powierzchni komutatora, drgania szczotek itp., a przez to iskrzenie. Dlatego komutator i szczotki muszą być troskliwie pielęgnowane.

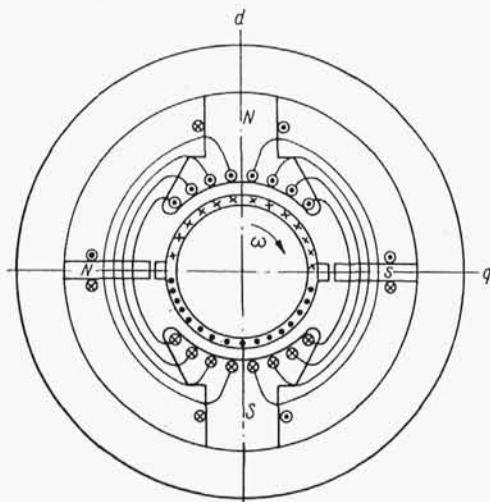
Jeśli szczotki są wykonane z różnych materiałów, to różne mogą być wartości rezystancji przejścia między komutatorem i szczotką, różne rozpyły prądu na poszczególne gałęzie równoległe, różne (niektóre zbyt duże) gęstości prądu pod szczotkami, wskutek czego może powstać iskrzenie.

Niewłaściwa krzywa komutacji (np. komutacja opóźniona) może spowodować nadmierną gęstość prądu pod krańcem szczotki (zwłaszcza schodzącym z wycinka) i iskrzenie. Dla uniknięcia tego w osi q umieszcza się bieguny komutacyjne zasilane prądem twornika, o wąskich nabiegunnikach których przepływ znosi w strefie komutacji przepływ twornika i wywołuje w tej strefie dodatkowe pole magnetyczne indukujące w zezwoju komutującym napięcie nieco większe i przeciwnie skierowane niż napięcie samoindukcji od zmiany prądu, a przez to wymuszające komutację o przebiegu zawartym między przebiegiem prostoliniowym i stycznym.

Na rysunku 3.88 pokazano rozmieszczenie biegunów komutacyjnych w prądnic prądu stałego. Przy pracy silnikowej zmieniają się kierunek prądu w obwodzie twornika i znaki biegunów komutacyjnych albo zmienia się kierunek wirowania.

Przyczyną iskrzenia (poza strefą komutacyjną) może być zbyt duża wartość napięcia międzywycinkowego. W przybliżeniu można przyjąć, że napięcie twornika przy rozkładzie indukcji jak przy biegu jałowym (rys. 3.57) rozkłada się na $\alpha_i \frac{K}{2p}$ wycinków, czyli napięcie międzywycinkowe przy biegu jałowym

$$U_k = 2p \frac{U}{\alpha_i K} \quad (3.156)$$



Rys. 3.88. Rozmieszczenie biegunów komutacyjnych i uzwojeń kompensacyjnych

Przy obciążeniu napięcie indukowane w poszczególnych zewojach, a więc odpowiednio także napięcie międzywycinkowe uzależnione jest od zniekształconego rozkładu indukcji (rys. 3.82). Maksymalna wartość napięcia międzywycinkowego

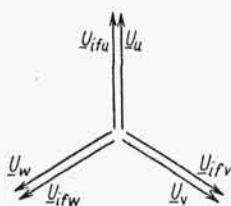
$$U_{k \max} = k_u 2p \frac{U}{\alpha_i K} \quad (3.157)$$

przy czym wartość współczynnika k_u może dochodzić do 1,5. Może to spowodować przeskok iskry między wycinkami, na których panuje to podwyższone napięcie, a w miarę obrotu komutatora przeskok iskry między następnymi wycinkami, co może doprowadzić do tzw. łuku międzybiegunowego, czyli łuku zwierającego szczotki różnych znaków. Aby temu zapobiec maszyny dużej mocy (np. silniki napędzające bardzo ważne urządzenia) wyposaża się w uzwojenia kompensacyjne. Uzwojenia te są umieszczone w żłobkach nabiegunków i połączone w szereg z uzwojeniem twornika (rys. 3.88). Przepływ uzwojeń kompensacyjnych jest równy przepływowi twornika i skierowany w osi q , ale ma zwrot przeciwny do zwrotu przepływu twornika.

3.9.4. Stan obciążenia maszyny synchronicznej

3.9.4.1. Napięcie indukowane strumieniem magnesów

W stanie jałowym maszyna synchroniczna obraca się z prędkością synchroniczną, przez jej uzwojenie wzbudzące płynie prąd wzbudzenia I_f , a przez uzwojenie twornika nie płynie prąd, czyli $I = 0$. Taki stan można uzyskać albo w ten sposób, że uzwojenie twornika jest otwarte (nie dołączone do sieci albo do impedancji) albo w ten sposób, że twornik maszyny jest dołączony do sieci, ale trójka wektorów napięć indukowanych w uzwojeniu twornika U_{if} pokrywa się z trójką wektorów napięć U (rys. 3.89) i obie te trójki wektorów wirują z jednakową prędkością. W ta-



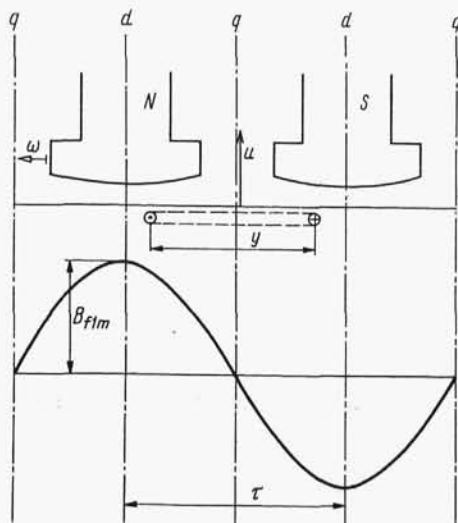
Rys. 3.89. Wektory napięć w maszynie synchronicznej w stanie jałowym

kim stanie w maszynie synchronicznej występuje pole wzniecone tylko prądem wzbudzenia I_f . To pole magnetyczne w maszynie synchronicznej z biegunami wydawnymi omówiono w p. 3.6.3.1, a w maszynie synchronicznej z biegunami utajonymi w p. 3.6.3.2. Krzywa indukcji wzniecona prądem stałym jest nieruchoma względem wywołujących ją biegunów magnetycznych, czyli wiruje synchronicznie z wirnikiem (magneśnicą). Jeśli taka krzywa indukcji zawiera wyższe harmoniczne, to wszystkie te harmoniczne wirują w przestrzeni z jednakową prędkością, wzniecając w uzwojeniu twornika odpowiednie harmoniczne napięcie v_f (v – rząd harmonicznej). Dla uniemożliwienia indukowania wyższych harmonicznych napięcia w uzwojeniu twornika można stosować odpowiedni skrót uzwojenia twornika, albo eliminować harmoniczne w krzywej indukcji magnesów. Eliminację wyższych harmonicznych w krzywej indukcji magnesów można w maszynie z biegunami utajonymi uzyskać przez dobór szerokości strefy uzwojonej i szerokości dużego zęba wirnika, a w maszynie z biegunami wydawnymi przez dobór szerokości nabiegunnika i kształtu szczeliny. Dla zbliżenia rozkładu indukcji magnesów do kosinusoidy można grubość szczeliny (dzięki odpowiedniemu kształtowi zewnętrznej powierzchni nabiegunnika) dobrać według zależności

$$\delta_x = \frac{\delta_0}{\cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right)} \quad (3.158)$$

w której: δ_0 – grubość szczeliny w osi d (w środku nabiegunnika); x – odległość od osi d ; $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ – podziałka biegunowa. Takie kształtowanie szczeliny powoduje konieczność stosowania trudnych procesów technologicznych. Dlatego w maszynach małej mocy najczęściej grubość szczeliny jest stała nad całym nabiegunnikiem.

Amplituda pierwszej harmonicznej indukcji od prądu wzbudzenia B_{f1m} występuje w osi d (rys. 3.90). Wartości chwilowe indukcji w punktach, przez które przechodzą osie uzwojeń poszczególnych faz u, v, w można traktować jako rzuty



Rys. 3.90. Sinusoidalny rozkład indukcji od magnesów w maszynie synchronicznej z biegunami wydatnymi

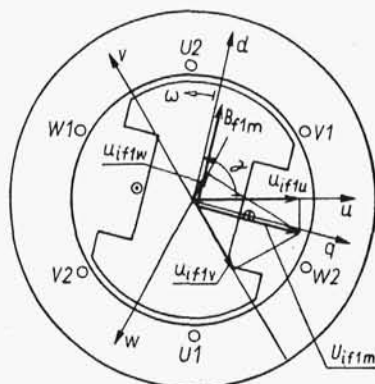
wektora indukcji B_{f1m} ustawionego w osi d , wirującego razem z wirnikiem (razem z osiami d, q) na nieruchome osie fazowe u, v, w . Strumień magnetyczny od prądu wzbudzenia I_f przechodzący do obwodu twornika wyznacza się według wzoru

$$\Phi_{fa} = \frac{2}{\pi} B_{\delta 1m} \tau l \quad (3.159)$$

Skuteczna wartość napięcia indukowanego w uzwojeniu stojana, którego liczba zwojów wynosi z_s , a współczynnik uzwojenia dla pierwszej harmonicznej ξ_{s1} jest określona wzorem

$$U_{if1} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} z_s \xi_{s1} \Phi_{fa} f \quad (3.160)$$

Strumień skojarzony Ψ_{af} z uzwojeniem fazowym twornika od strumienia Φ_{fa} przy ruchu wirnika zmienia się sinusoidalnie. Napięcie indukowane w tworniku ma wartość maksymalną, kiedy $d\Psi_{af}/dt$ ma wartość maksymalną, czyli kiedy $\Psi_{af} = 0$. Zgodnie z rys. 3.90 następuje to w chwili, kiedy oś q pokrywa się z osią rozpatrywanej fazy u . Chwilowe wartości napięć indukowanych w poszczególnych uzwojeniach fazowych stojana $u_{if1u}, u_{if1v}, u_{if1w}$ można traktować jako rzuty wektora wirującego o module równym amplitudzie napięcia indukowanego U_{if1m} ustawionego w osi q , na osie uzwojeń fazowych twornika (rys. 3.91). Napięcie indukowane w poszczególnych uzwojeniach fazowych są przesunięte względem siebie o kąt $2\pi/3$. Przy ozna-



Rys. 3.91. Wektor indukcji magnesów oraz wektor napięcia i wartości chwilowe napięć indukowanych

czeniu kąta od osi u do osi d przez γ można napisać wyrażenia na chwilowe wartości napięć indukowanych w uzwojeniach stojana

$$\left. \begin{aligned} u_{if1u} &= U_{if1m} \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right) \\ u_{if1v} &= U_{if1m} \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_{if1w} &= U_{if1m} \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3.161)$$

Jest to symetryczna trójka napięć. Kąt $\gamma = \omega t$, przy czym $\omega = 2\pi f$ oznacza pulsację. Przy $p = 1$ prędkość kątowna wirnika jest równa pulsacji ω . Przy $p > 1$ prędkość kątowna wirnika wynosi ω/p . Podobnie jak indukują się także jego wyższe harmoniczne, a wśród nich najważniejsza trzecia harmoniczna. Gdyby uzwojenie twornika było połączone w trójkąt, to powstałaby zamknięta droga dla trzeciej harmonicznej prądów. Dlatego uzwojenia tworników maszyn synchronicznych powinny być łączone w gwiazdę a nie w trójkąt. Trzecie harmoniczne napięć indukowanych występują w napięciach fazowych, a nie występują w napięciach międzyprzewodowych. Dlatego w napięciu na zaciskach uzwojenia twornika połączonego w gwiazdę trzecia harmoniczna nie występuje. W przybliżeniu można traktować omówione pierwsze harmoniczne napięć indukowanych jako całkowite napięcia indukowane i opuścić indeksy 1 we wzorach (3.160) i (3.161).

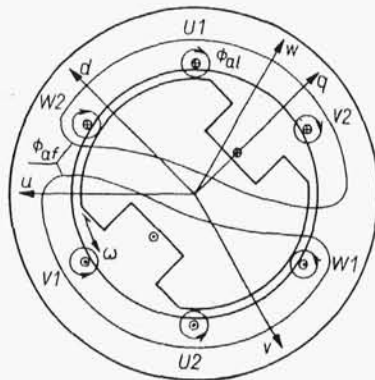
3.9.4.2. Reakcja twornika

Opis ogólny. W przypadku ogólnym w maszynie synchronicznej obciążonej prądy są przesunięte względem napięć indukowanych o kąt ψ . Oznacza to, że wektor prądu \underline{I}_m jest przesunięty względem wektora napięcia indukowanego \underline{U}_{ifm} o kąt ψ .

Można zacząć liczyć czas od chwili, kiedy oś d pokrywa się z osią jednej z faz, np. z osią fazy u . Odpowiada temu przyjęcie $\gamma = \omega t$. Wtedy wyrażenia na prądy fazowe mają postać

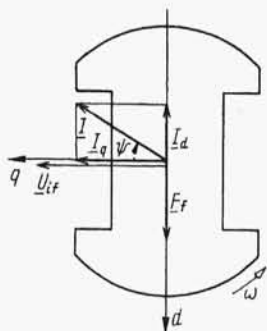
$$\left. \begin{aligned} i_u &= I_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \psi \right) \\ i_v &= I_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \psi - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_w &= I_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \psi - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.162)$$

Prądy te wywołują strumień twornika Φ_a . Część Φ_{a1} tego strumienia jest *strumieniem twornika rozproszonym*, tzn. strumieniem zamykającym się przez żłobki, przez szczelinę wzdłuż obwodu i wokół połączeń czołowych. Strumień Φ_{a1} jest skojarzony tylko z uzwojeniem twornika i nie jest skojarzony z uzwojeniem wzbudzącym. Pozostała, znacznie większa część Φ_{af} strumienia twornika, nazwana *strumieniem reakcji twornika*, przechodzi przez rdzeń magnesów i jest skojarzona z uzwojeniem wzbudzącym. Strumień Φ_{af} jest wywołany wirującym przepływem twornika Θ_a i jest strumieniem wirującym. Strumienie rozproszone Φ_{a1} są wywołane jednofazowymi przepływami poszczególnych faz i są strumieniami oscylującymi, nie kojarzącymi się we wspólny strumień wirujący (rys. 3.92).



Rys. 3.92. Strumienie rozproszone twornika i strumień reakcji twornika

Kierunek strumienia wirującego reakcji twornika pokrywa się z kierunkiem osi fazowej w chwili, kiedy prąd w tym uzwojeniu fazowym ma wartość maksymalną. Przy opisywaniu zjawisk za pomocą wektorów wirujących odpowiada to chwili, kiedy wektor prądu pokrywa się z daną osią fazową. Wektor przepływu wirującego ma ten sam kierunek, co wektor prądu. Na rysunku 3.93 pokazano położenie wektorów (skutecznych wartości) względem osi wirnika: napięcia indukowanego \underline{U}_{if} ,



Rys. 3.93. Położenie wektorów napięcia indukowanego i prądów względem osi wirnika

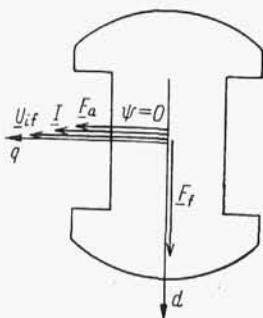
prądu I , oraz składowych prądu poprzecznej I_q i podłużnej I_d , których moduły są określone zależnościami

$$\left. \begin{aligned} I_q &= I \cos \psi \\ I_d &= I \sin \psi \end{aligned} \right\} \quad (3.163)$$

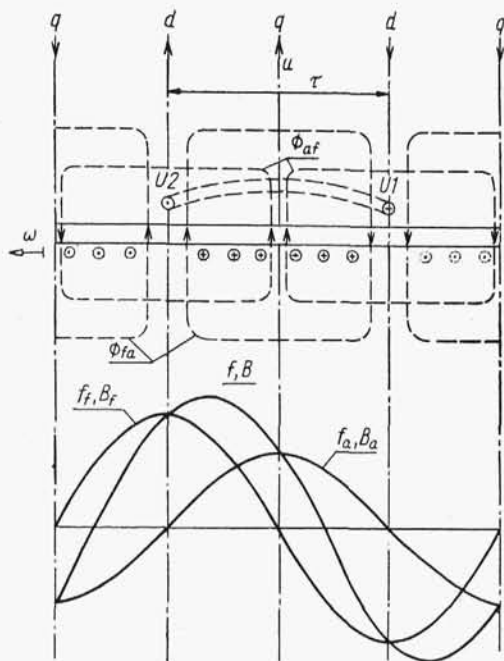
Kąt ψ mierzony od osi q do wektora prądu zgodnie z kierunkiem wirowania ma wartość dodatnią, a mierzony w kierunku przeciwnym ma wartość ujemną. Przy prądzie poprzecznym $I_q > 0$ (zwrot I_q zgodny ze zwrotem osi q) maszyna jest w odniesieniu do napięcia indukowanego U_{if} w zakresie pracy prądnicowej a przy $I_q < 0$ w zakresie pracy silnikowej. Prąd podłużny I_d jest prądem biernym. Przy $I_d > 0$ (zwrot I_d zgodny ze zwrotem osi d) prąd ma względem napięcia U_{if} charakter pojemnościowy, a przy $I_d < 0$ prąd ma charakter indukcyjny.

Wektor napięcia magnetycznego F_f od prądu wzbudzenia ma kierunek i zwrot zgodny z kierunkiem i zwrotem osi d . Strumień uzwojenia wzbudzającego skojarzony z uzwojeniami twornika Φ_{fa} jest skierowany w osi podłużnej. Napięcia magnetyczne F_f i F_a dodają się, tworząc wspólne napięcie magnetyczne wirujące F . Dla zilustrowania wypadkowego napięcia magnetycznego zostaną rozważone rozkłady napięć magnetycznych i indukcji od prądu wzbudzenia i od prądu twornika w chwili, w której wektor napięcia magnetycznego od prądu twornika pokrywa się z osią danej fazy (np. fazy u), czyli w chwili, w której prąd uzwojenia $U1-U2$ ma wartość maksymalną. Wtedy bowiem amplituda napięcia magnetycznego fazowego występuje w tym samym miejscu co i amplituda napięcia magnetycznego wypadkowego, a krzywa indukcji od prądu twornika ma wartość maksymalną w osi u . W zależności od rodzaju obciążenia krzywa indukcji od prądu wzbudzenia jest odpowiednio przesunięta.

Reakcja twornika poprzeczna. Maszyna jest obciążona prądem tylko poprzecznym: $I_q = I$, $I_d = 0$, $\psi = \angle(U_{if}, I) = 0$ (rys. 3.94). Na rysunku 3.95 dany jest rozkład napięcia magnetycznego w maszynie z biegunami utajonymi od prądu poprzecznego twornika f_a [zgodnie ze wzorem (3.98)], indukcji od prądu twornika B_a , napięcia magnetycznego od prądu wzbudzenia f_f [zgodnie ze wzorem (3.96)], indukcji od prądu wzbudzenia B_f oraz napięcia magnetycznego wypadkowego f i indukcji wypadkowej B . Sinusoida napięcia magnetycznego wypadkowego f i indukcji wypad-



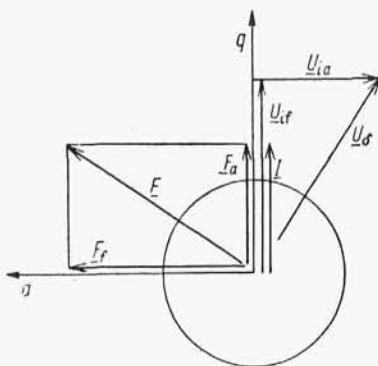
Rys. 3.94. Wektory napięcia indukowanego, prądu i napięć magnetycznych przy obciążeniu prądem poprzecznym



Rys. 3.95. Rozkład napięć magnetycznych i indukcji w maszynie synchronicznej z biegunami utajonymi obciążonej prądem poprzecznym

kowej B jest odpowiednio przesunięta (opóźniona) względem sinusoidy napięcia magnetycznego f_f i indukcji B_f . Szczelina powietrzna jest na całym obwodzie jednakowa, więc – pomijając wpływ nasycenia magnetycznego – przy sinusoidalnym rozkładzie napięcia magnetycznego rozkład indukcji jest także sinusoidalny. Przy uwzględnieniu nasycenia magnetycznego krzywa indukcji B jest spłaszczona.

Na rysunku 3.96 przedstawiono wykres wektorowy napięć magnetycznych: magnesów \underline{F}_f , twornika \underline{F}_a i wypadkowego $\underline{F} = \underline{F}_f + \underline{F}_a$ oraz opóźnionych względem nich odpowiednio o $\pi/2$ napięć indukowanych: od przepływu magnesów \underline{U}_{if} , od przepływu twornika \underline{U}_{ia} i napięcia wypadkowego $\underline{U}_\delta = \underline{U}_{if} + \underline{U}_{ia}$ od napięcia ma-



Rys. 3.96. Wykres wektorowy napięć magnetycznych i napięć indukowanych przy obciążeniu maszyny synchronicznej prądem poprzecznym

gnetycznego wypadkowego. Napięcie U_{δ} odpowiada strumieniowi przechodzącemu przez szczelinę i nazywa się *napięciem szczelinowym*. Na tym wykresie pominięto wpływ nasycenia obwodu magnetycznego. Dla uwzględnienia nasycenia należałoby wartość wypadkowego napięcia U_{δ} wyznaczyć z charakterystyki magnesowania rozpatrywanego obwodu magnetycznego dla danego napięcia magnetycznego wypadkowego F i tę wartość odłożyć w kierunku opóźnionym o $\pi/2$ względem F . Tak wyznaczona wartość U_{δ} byłaby odpowiednio mniejsza. Przy $\psi = 0$ przepływy twornika poprzeczny i podłużny są następujące

$$\Theta_{aq} = \Theta_a \cos \psi = \Theta_a$$

$$\Theta_{ad} = \Theta_a \sin \psi = 0$$

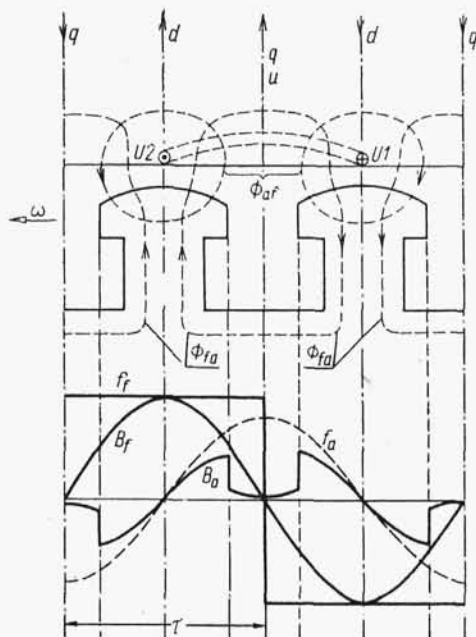
Rozkład napięć magnetycznych i indukcji w maszynie synchronicznej z biegunami wydatnymi obciążonej prądem poprzecznym pokazano na rys. 3.97. Napięcie magnetyczne od prądu wzbudzenia f_f ma rozkład prostokątny, a sinusoidalny rozkład indukcji B_f uzyskuje się dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu szczeliny. Napięcie magnetyczne od prądu twornika f_a ma rozkład sinusoidalny, więc rozkład indukcji B_a przy takiej szczelinie jest odkształcony. Można ten przebieg indukcji B_a rozłożyć na harmoniczne. Amplituda pierwszej harmonicznej indukcji od prądu twornika przy obciążeniu prądem poprzecznym ma w maszynie z biegunami wydatnymi wartość znacznie mniejszą niż w maszynie z biegunami utajonymi. Zastąpienie rzeczywistej krzywej indukcji B_a pierwszą harmoniczną odpowiada zastąpieniu rzeczywistego wirnika z biegunami wydatnymi wirnikiem z biegunami utajonymi o szczelinie δ_0 (jak pod środkiem nabiegunnika) i zmniejszeniu przepływu poprzecznego twornika przez wprowadzenie współczynnika poprzecznej reakcji twornika k_{aq} według zależności

$$\Theta_{aq} = k_{aq} \Theta_a \cos \psi \quad (3.164)$$

Przy $\psi = 0$ jest oczywiście

$$\Theta_{aq} = k_{aq} \Theta_a$$

Wartość współczynnika k_{aq} wynosi $0,25 \div 0,42$. Opisany wyżej przypadek obciążenia prądem poprzecznym odpowiada pracy prądnicowej ($I_q > 0$). Przy pracy silnik-



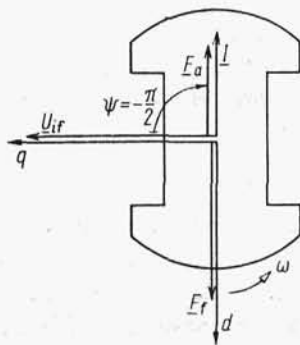
Rys. 3.97. Napięcia magnetyczne i indukcje w maszynie synchronicznej z biegunami wydatnymi obciążonej prądem poprzecznym

wej ($I_q < 0$) krzywe B_d i f_d na rys. 3.95 i 3.97 byłyby przesunięte w lewo o π względem krzywych B_f i f_f , a zwroty wektorów \underline{F}_d , \underline{I} oraz \underline{U}_{id} byłyby przeciwne do zwrotów tych wektorów na rys. 3.96.

Reakcja twornika podłużna. W maszynie synchronicznej obciążonej prądem podłużnym ujemnym ($I_d < 0$), czyli prądem indukcyjnym względem napięcia \underline{U}_{if} , przesuniętym względem tego napięcia o kąt $\psi = -\pi/2$ (rys. 3.98), składowe prądu są następujące

$$I_d = I \sin \psi = -I$$

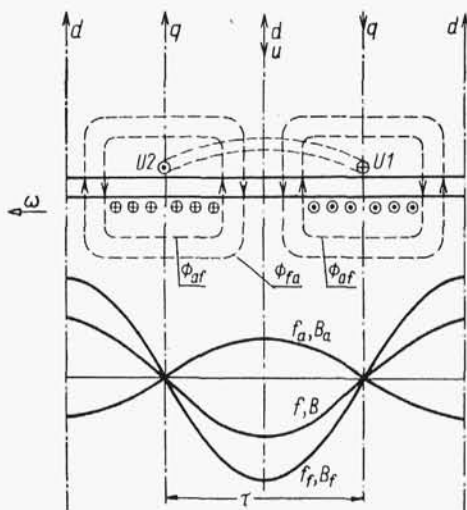
$$I_q = I \cos \psi = 0$$



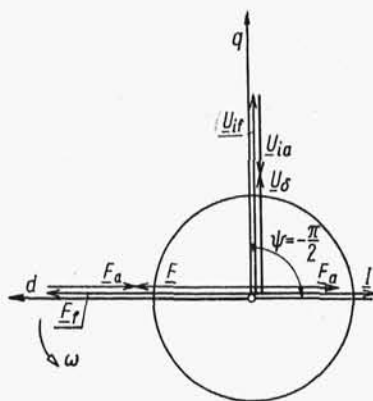
Rys. 3.98. Wektory napięcia indukowanego, prądu i napięć magnetycznych maszyny synchronicznej przy obciążeniu prądem podłużnym ujemnym

Przepływ (napiecie magnetyczne) twornika jest skierowany przeciwko przepływowi (napięciu magnetycznemu) magnesów; przepływ twornika podłużny ujemny jest przepływem wyraźnie rozmagnesowującym.

Rozkład napięć magnetycznych i indukcji w maszynie z biegunami utajonymi przy $I_d = -I$ pokazano na rys. 3.99, a wykres wektorowy napięć magnetycz-



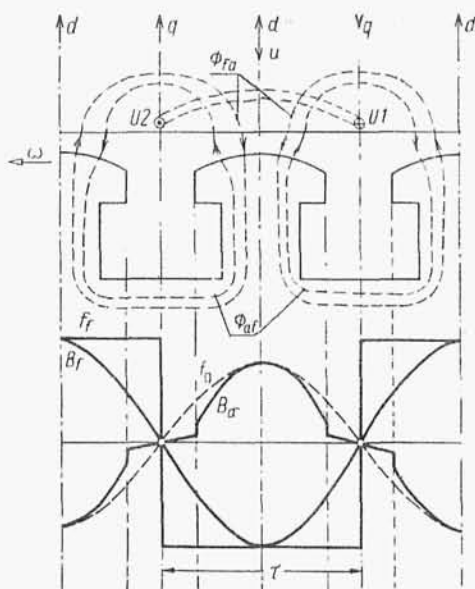
Rys. 3.99. Napięcia magnetyczne i indukcje w maszynie synchronicznej z biegunami utajonymi, obciążonej prądem podłużnym ujemnym



Rys. 3.100. Napięcia magnetyczne i napięcia indukowane w maszynie synchronicznej z biegunami utajonymi, obciążonej prądem podłużnym ujemnym

nych, prądu i napięć indukowanych – na rys. 3.100. Widać wyraźne rozmagnesowanie maszyny i zmniejszenie napięcia szczelinowego U_d w stosunku do napięcia U_{if} .

W maszynie synchronicznej z biegunami wydutnymi, obciążonej prądem podłużnym ujemnym, na skutek niejednorodnej szczeliny następuje także zmniejszenie



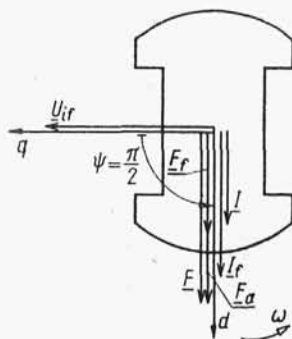
Rys. 3.101. Napięcia magnetyczne i indukcje w maszynie synchronicznej z biegunami wydatnymi, obciążonej prądem podłużnym ujemnym

indukcji B_a w stosunku do rozkładu sinusoidalnego (rys. 3.101), ale zmniejszenie to jest niewielkie. Przepływ podłużny twornika oblicza się według wzoru

$$\Theta_{ad} = k_{ad} \Theta_a \sin \psi \quad (3.165)$$

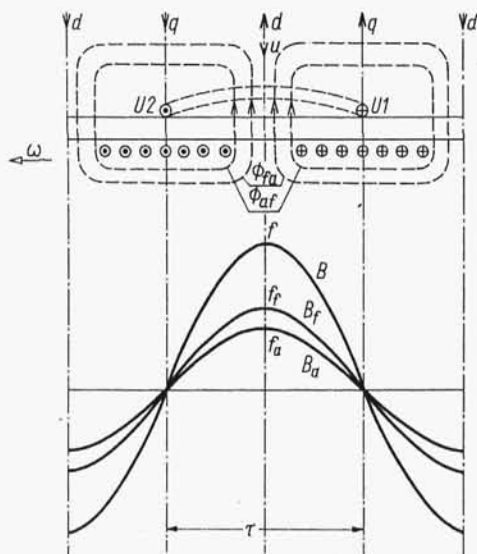
przy czym wartość współczynnika podłużnej reakcji twornika k_{ad} wynosi $0,79 \div 0,92$.

Przy obciążeniu maszyny synchronicznej prądem podłużnym dodatnim przepływ wypadkowy, indukcja i napięcie wypadkowe zwiększają swoje wartości (rys. 3.102 ÷ 3.105).

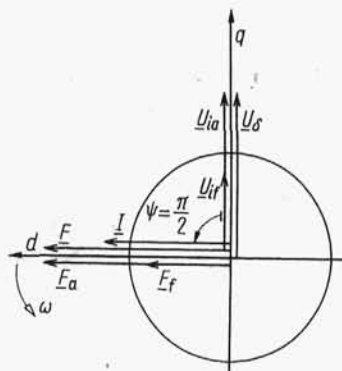


Rys. 3.102. Wektory napięcia indukowanego, prądu i napięć magnetycznych w maszynie synchronicznej przy obciążeniu prądem podłużnym dodatnim

Przypadek ogólny reakcji twornika. W przypadku ogólnym wektor prądu I jest przesunięty o kąt ψ względem wektora indukowanego napięcia U_{ir} i osi q . Prąd podłużny I_d i poprzeczny I_q mają wartości określone wzorami (3.163). W maszynie



Rys. 3.103. Napięcia magnetyczne i indukcje w maszynie synchronicznej z biegunami utajonymi, obciążonej prądem podłużnym dodatnim



Rys. 3.104. Napięcia magnetyczne i napięcia indukowane w maszynie synchronicznej z biegunami utajonymi, obciążonej prądem podłużnym dodatnim

z biegunami utajonymi istnieje wtedy przepływ twornika podłużny i poprzeczny

$$\left. \begin{aligned} \Theta_{ad} &= \Theta_a \sin \psi = c_a I_d \\ \Theta_{aq} &= \Theta_a \cos \psi = c_a I_q \end{aligned} \right\} \quad (3.166)$$

Przepływy Θ_{ad} i Θ_{aq} działają w obwodach o jednakowej reluktancji, współczynniki c_a są jednakowe. Przepływy Θ_a , Θ_{ad} i Θ_{aq} i napięcia magnetyczne F_a , F_{ad} , F_{aq} mają kierunki i zwroty zgodne z kierunkami i zwrotami wywołujących je prądów (rys. 3.106).

W maszynie z biegunami wydutnymi, na skutek różnej grubości szczeliny i reluktancji w osi d i q , przepływy poprzeczny i podłużny są określone wzorami (3.164) i (3.165), czemu odpowiadają wzory

$$\left. \begin{aligned} \Theta_{ad} &= k_{ad} c_a I_d \\ \Theta_{aq} &= k_{aq} c_a I_q \end{aligned} \right\} \quad (3.167)$$

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

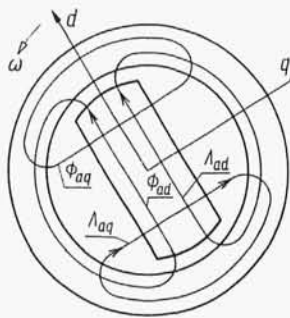
Reaktancja reakcji twornika. Napięcia reakcji twornika wywołane są zmiennością strumienia twornika przenikającego przez magnesy skojarzonego z uzwojeniem twornika. Prąd podłużny $i_d = \sqrt{2} I_d$ wywołuje strumień podłużnej reakcji twornika skojarzony z uzwojeniem fazy u . Ten strumień skojarzony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

Chwilowe wartości strumieni skojarzonych Ψ_{uad} w fazie u i opóźnionych odpowiednio o $2\pi/3$ i $4\pi/3$ strumieni Ψ_{vad} i Ψ_{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 Λ_{ad} dla strumienia podłużnej reakcji twornika Φ_{ad} (rys. 3.108).



Rys. 3.108. Strumień podłużny i poprzeczny reakcji twornika

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

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