

3.6. POLA MAGNETYCZNE I UZWOJENIA MASZYN ELEKTRYCZNYCH

3.6.1. Opis ogólny

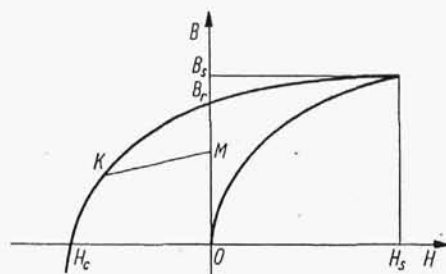
Źródłem pola magnetycznego w maszynach elektrycznych mogą być magnesy trwałe albo prąd przepływający przez uzwojenie. Uzwojenie wykonuje się jako skupione (w postaci cewki), albo jako rozłożone na obwodzie maszyny. Przez uzwojenie może płynąć prąd stały albo prąd przemienny jedno- lub wielofazowy. W zależności od tych okoliczności indukcja pola magnetycznego może mieć różny przebieg w funkcji czasu i różny rozkład na obwodzie maszyny.

W transformatorach obydwa uzwojenia (pierwotne i wtórne) są wykonane w postaci koncentrycznych cewek (cylindrów) obejmujących niezmienną drogę strumienia magnetycznego. Można przyjąć, że indukcja na całym przekroju drogi strumienia magnetycznego ma jednakową wartość. Te cechy odróżniają pole magnetyczne i uzwojenia transformatorów od pól magnetycznych i uzwojeń maszyn elektrycznych wirujących. Pola magnetyczne i uzwojenia transformatorów w zakresie potrzebnym do zrozumienia zasad działania transformatorów omówiono w p. 3.2. Dlatego w dalszym ciągu rozważono tylko pola magnetyczne i uzwojenia maszyn elektrycznych wirujących.

3.6.2. Pole magnetyczne od magnesów trwałych

Magnesy trwałe wykonuje się z materiałów o szerokiej pętli histerezy (rys. 3.54). Można przykładowo wymienić następujące grupy materiałów na magnesy trwałe ze względu na ich skład i metodę otrzymywania:

(1) Stale kowalne martenzytowe hartowane: węglowe, chromowe, wolframowe, kobaltowe.



Rys. 3.54. Część pętli histerezy magnesu trwałego

(2) Stopy kowalne bezwęglowe żelazowo-kobaltowo-molibdenowe.

(3) Stopy lane na bazie żelazo-nikiel-aluminium z miedzią, krzemem, kobaltom, tytanem oraz wypraski i spieki z tych stopów.

(4) Spieki tlenkowo-barowe.

Ukształtowany magnes trwały poddaje się magnesowaniu aż do osiągnięcia przez magnes stanu nasycenia (H_s , B_s). Po usunięciu źródła pola magnetycznego,

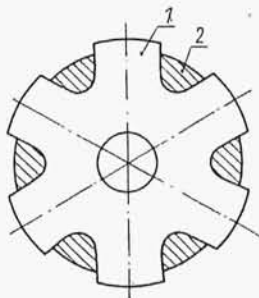
przy natężeniu pola magnetycznego $H = 0$ w magnesie jest *indukcja szczątkowa*, remanencja B_r . Jeśli magnes trwały w maszynie elektrycznej zostanie poddany wpływowi innego pola magnetycznego roz magnesowującego (np. pola oddziaływania twornika), to punkt pracy przesunie się po *krzywej od magnesowania*, tj. po pętli histerezy w drugiej ćwiartce wykresu, np. do punktu K . Po ustaniu działania obcego pola punkt pracy nie znajdzie się w punkcie B_r , lecz w nowym punkcie M . Przejście z punktu K do punktu M i z powrotem odbywa się po krzywych odpowiadających częściowym cyklom przemagnesowania. W przybliżeniu można przyjąć, że te przejścia odbywają się w prostej KM , zwanej *prostą powrotu*. Przy indukcji $B = 0$ w magnesie jest natężenie pola magnetycznego H_c , zwane *natężeniem koercyjnym*. Iloczyn BH jest miarą gęstości energii magnetycznej zawartej w magnesie trwałym. Należy dążyć, aby punkt pracy K leżał w pobliżu punktu $(BH)_{\max}$, oznaczającego maksimum iloczynu BH , czyli maksimum gęstości energii magnetycznej, ponieważ wtedy wymiary magnesu są najmniejsze.

Współczynnikiem charakteryzującym materiał magnesu trwałego jest *współczynnik wypełnienia* (współczynnik kształtu krzywej od magnesowania)

$$\gamma = \frac{(BH)_{\max}}{B_r H_c}$$

Wartość tego współczynnika powinna być możliwie duża; zwykle zawiera się w przedziale $0,3 \div 0,65$.

Kształt magnesów trwałych w maszynach elektrycznych może być bardzo różnorodny. Przykładowy szkic przekroju wirnika z magnesami trwałymi w kształcie



Rys. 3.55. Schemat przekroju wirnika z magnesami trwałymi

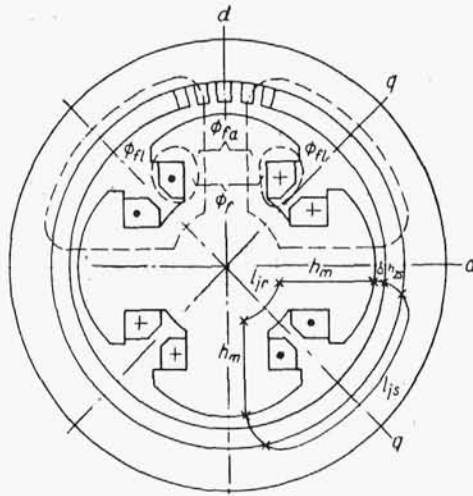
1 – magnes trwały, 2 – materiał niemagnetyczny (np. stop aluminium)

gwiezdy przedstawiono na rys. 3.55. Na końcach magnesów mogą być umieszczone nabiegunniki. Kształt rozkładu indukcji w szczelinie na obwodzie maszyny jest zależny od kształtu nabiegunnika.

3.6.3. Pole magnetyczne wytwarzane prądem stałym

3.6.3.1. Pole magnetyczne w maszynach z biegunami wydutnymi

Na rysunku 3.56 pokazano szkic maszyny elektrycznej z biegunami wydutnymi na wirniku. Stojan maszyny składa się z krążków blach ze żłobkami, w których jest umieszczone uzwojenie twornika. Na wale wirnika jest osadzona piasta z rdzeniami



Rys. 3.56. Obwód magnetyczny maszyny elektrycznej z biegunami wydutymi na wirniku

magnesów, na których są umieszczone nabiegunniki. Na rdzeniach biegunów umieszczone są skupione uzwojenia (cewki), przez które przepływa prąd stały wzbudzenia I_f . Na rysunku zaznaczono osie podłużne maszyny d zgodne z kierunkiem strumienia i osie poprzeczne q (w maszynie dwubiegunowej oś q jest geometrycznie prostopadła do osi d). Magnesia ma $2p$ biegunów (w rozpatrywanym przypadku $2p = 4$).

Przepływ wzbudzenia (jednej pary biegunów) wywołujący strumień magnesów Φ_f wynosi

$$\Phi_f = \frac{z_f}{p} I_f \quad (3.60)$$

przy czym: z_f – liczba zwojów na wszystkich biegunach; p – liczba par biegunów.

Zgodnie z prawem przepływu

$$\Phi_f = \sum U_{\mu x} \quad (3.61)$$

przy czym: $U_{\mu x} = H_x l_x$ – spadek napięcia magnetycznego na danym odcinku drogi strumienia; H_x – natężenie pola magnetycznego w tym odcinku; l_x – długość tego odcinka.

Napięcie magnetyczne magnesów

$$F_f = \frac{1}{2} \Phi_f = \frac{1}{2} \sum U_{\mu x} \quad (3.62)$$

Aby obliczyć spadek napięcia magnetycznego $H_x l_x$ w żelazie należy wyznaczyć H_x z wykresu $B = f(H)$ dla danego gatunku żelaza przy danej indukcji $B_x = \Phi_x / S_x$ (przy czym Φ_x – strumień w danym odcinku drogi, a S_x – przekrój

tego odcinka drogi w żelazie). Spadek napięcia magnetycznego od przepływu wzbudzenia w jednej szczelinie o grubości δ_x (wzdłuż promienia maszyny) oblicza się według wzoru

$$\left. \begin{aligned} U_{\mu\delta f} &= H\delta_{fx} l\delta_x \\ l_{\delta x} &= k_C\delta_x \end{aligned} \right\} \quad (3.63)$$

Współczynnik Cartera k_C oznacza obliczeniowe zwiększenie szczeliny powietrznej na skutek istnienia żłobków; zwykle $k_C = 1,05 \div 1,2$. Nabiegownik może mieć powierzchnię zewnętrzną różną od cylindrycznej, wtedy grubość szczeliny δ_x może się różnić od grubości szczeliny δ w osi podłużnej.

Często pomija się spadki napięć magnetycznych w rdzeniu żelaznym. Wtedy

$$U_{\mu\delta f} \approx F_f$$

Ponieważ indukcja w szczelinie

$$B_{\delta x} = \mu_\delta H_{\delta x}$$

przy czym przenikalność magnetyczna powietrza $\mu_\delta = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, zatem w danym punkcie np. odległym o x od osi d indukcja

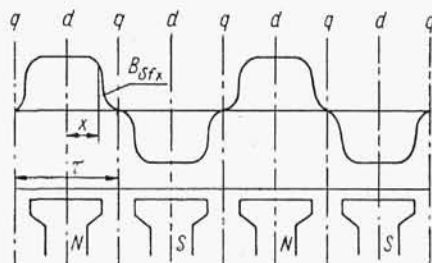
$$B_{\delta fx} = \frac{z_f \mu_\delta}{2pk_C \delta_x} I_f \quad (3.65)$$

Rozkład indukcji od przepływu wzbudzenia w szczelinie wzdłuż obwodu maszyny czterobiegunowej o stałej grubości szczeliny pokazano na rys. 3.57. Gdyby szczelina była większa nad krańcami nabiegowników niż w osi biegunów, to rozkład indukcji na obwodzie byłby zbliżony do kosinusoidy. Wielkość

$\tau = \frac{\pi D}{2p}$ nazywa się *podziałką biegunową*.

Wirnik z czterema biegunami wydawnymi jest stosowany w maszynach synchronicznych niezbyt wielkich mocy, a z dużą liczbą biegunów wydawnych — w hydrogeneratorach.

Maszyny prądu stałego mają układ odwrócony w stosunku do rys. 3.57, to znaczy bieguny wydane są w stojanie, a na wirniku jest umieszczone uzwojenie twornika.



Rys. 3.57. Rozkład indukcji na rozwiniętym obwodzie maszyny z biegunami wydawnymi i szczeliną koncentryczną

3.6.3.2. Pole magnetyczne w maszynach z biegunami utajonymi

Na rysunku 3.30 przedstawiono szkic przekroju wirnika z biegunami utajonymi. Tak konstruuje się wirniki dużych turbogeneratorów. Rozkład napięcia magnetycznego maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi pokazano na rys. 3.31. Przy pominięciu schodków (harmonicznych żłobkowych) jest to rozkład trapezowy.

Krzywą trapezową można rozłożyć na szereg Fouriera, według zależności

$$f_{fx} = \sum_1^v f_{fvx} \quad (3.65)$$

w której

$$f_{fvx} = F_{fv} \cos \left(v \frac{\pi}{\tau} x \right) \quad (3.66)$$

$$F_{fv} = \frac{1}{v} \cdot \frac{4}{\pi} \xi_{fv} F_{ft} \quad (3.67)$$

$$F_{ft} = \frac{1}{2} \cdot \frac{z_f}{p} I_f \quad (3.68)$$

przy czym: f_{fvx} – v -ta harmoniczna napięcia magnetycznego; F_{fv} – amplituda v -tej harmonicznej; $v = 1, 3, 5$ itd. – rząd harmonicznej; ξ_{fv} – współczynnik uzwojenia v -tej harmonicznej; F_{ft} – wysokość trapezu.

Często wystarczy rozpatrzeć pierwszą harmoniczną

$$f_{f1x} = F_{f1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \quad (3.69)$$

której amplituda

$$F_{f1} = \frac{4}{\pi} \xi_{f1} F_{ft} = \frac{1}{2} \frac{4}{\pi} \xi_{f1} \frac{z_f}{p} I_f \quad (3.70)$$

Współczynnik uzwojenia pierwszej harmonicznej ξ_{f1} uwzględnia zmniejszenie amplitudy pierwszej harmonicznej przy rozkładzie krzywej trapezowej w porównaniu z pierwszą harmoniczną przy rozkładzie krzywej prostokątnej. Zwykle

$$\frac{4}{\pi} \xi_{f1} \approx 1$$

i wtedy

$$F_{f1} \approx F_{ft}$$

Współczynnik uzwojenia v -tej harmonicznej jest odpowiednio mniejszy.

Wszystkie te harmoniczne napięcia magnetycznego (natężenia pola, indukcji) są harmonicznymi przestrzennymi strefowymi (harmoniczne przestrzenne żłobkowe zostały w tym rozumowaniu pominięte). Są one nieruchome względem wirnika i wirują w przestrzeni razem z wirnikiem.

Przybliżoną wartość indukcji od magnesów w szczelinie można wyznaczyć z wyrażenia

$$B_{\delta fx} = \mu_{\delta} H_{\delta fx} = \mu_{\delta} \frac{f_{fx}}{k_c \delta} \quad (3.71)$$

3.6.3.3. Uzwojenia tworników maszyn prądu stałego

Elementem uzwojenia twornika maszyny prądu stałego jest zezwój pętlicowy lub falisty (rys. 3.27). Zezwroje mogą być wielozwojne (na rys. 3.27 – dwuzwojne) albo jednozwojne. Zezwroje pętlicowe tworzą *uzwojenie pętlicowe*, a zezwoje faliste – *uzwojenie faliste*.

Przykładowy schemat okrągły i płaski uzwojenia pętlicowego prostego przedstawiono na rys. 3.28. Jest to uzwojenie dwuwarstwowe: jeden bok (lewy) zezwoju leży w górnej warstwie żłobka, drugi (prawy) w dolnej warstwie. Końcówki zezwoju są dołączone do sąsiednich wycinków komutatora, a więc poskok komutatorowy (czyli liczba wycinków komutatora zawarta pomiędzy początkiem i końcem zezwoju twornika) $y_k = 1$. Wycinki komutatora (miedziane), poprzedzielane warstwami izolacji (miki) tworzą pierścienią osadzony na wale. Po komutatorze ślizgają się szczotki (tutaj po dwie szczotki jednoimienne A1-A2 i B1-B2 są zwarte). Początek następnego zezwoju jest dołączony do tego samego wycinka komutatora, do którego jest dołączony koniec poprzedzającego zezwoju. Liczba wycinków komutatora K jest równa liczbie zezwojów S . W ten sposób powstaje uzwojenie zamknięte. *Rozpiętość zezwoju* y (rys. 3.27) jest równa podziałce biegunowej τ , albo jest od niej nieco mniejsza, czyli

$$y \leq \tau$$

Rozpiętość zezwoju mierzona liczbą żłobków nazywa się *poskokiem żłobkowym*

$$y_z \leq \frac{Z}{2p}$$

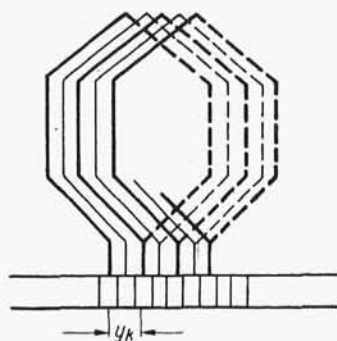
przy czym Z – liczba wszystkich żłobków.

Można łatwo wykazać, że w uzwojeniu pętlicowym prostym liczba par gałęzi równoległych a równa się liczbie par biegunów p , czyli

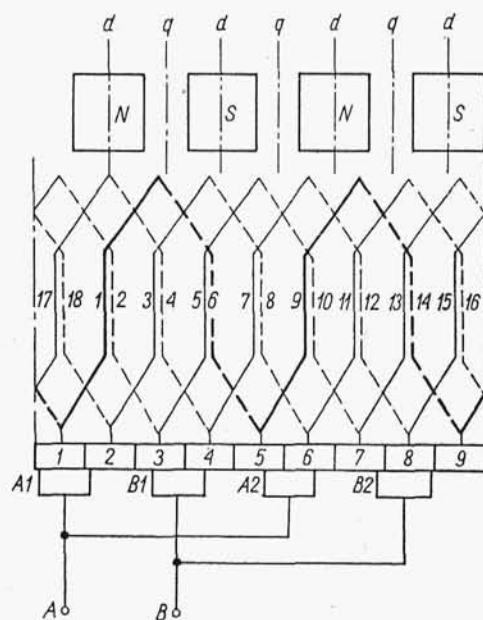
$$a = p$$

Na rysunku 3.58 pokazano fragment schematu rozwiniętego uzwojenia pętlicowego dwukrotnego. Wycinki komutatora do których są dołączone początek i koniec zezwoju nie sąsiadują ze sobą, lecz są oddzielone jednym wycinkiem. Poskok komutatorowy $y_k = 2$. Powstają jakby dwa uzwojenia wplecione w siebie. Tutaj liczba par gałęzi równoległych $a = 2p$.

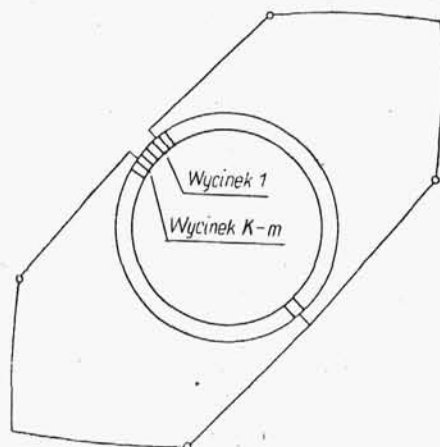
Przykładowy schemat rozwinięty uzwojenia falistego prostego przedstawiono na rys. 3.59. Końcówka czołowa przednia prawa zezwoju jest odgięta w kierunku obiegu uzwojenia i połączona jest z odgiętą w kierunku przeciwnym końcówką przednią lewą zezwoju leżącego pod następną parą biegunów. Jedna fala uzwojenia obiega cały obwód maszyny i dochodzi do wycinka komutatora (9) leżącego w są-



Rys. 3.58. Fragment schematu rozwiniętego uzwojenia pętlicowego dwukrotnego



Rys. 3.59. Schemat rozwinięty uzwojenia falistego prostego



Rys. 3.60. Szkic ideowy uzwojenia falistego wielokrotnego

siedztwie po lewej stronie wycinka (l), z którego zaczynał się obieg tej fali. Poskok komutatorowy takiego uzwojenia

$$y_k = \frac{K-1}{p}$$

W tym uzwojeniu zawsze liczba par gałęzi równoległych $a = 1$ niezależnie od liczby par biegunów.

Szkic ideowy uzwojenia falistego wielokrotnego, czyli m -krotnego (w tym przypadku 3-krotnego) pokazano na rys. 3.60. Po obejściu obwodu maszyny trafia się do wycinka odległego o m wycinków od wycinka pierwszego (w tym przypadku o 3 wycinki). Poskok komutatorowy takiego uzwojenia

$$y_k = \frac{K-m}{p}$$

a liczba par gałęzi równoległych $a = m$.

W zależności od zastosowanego uzwojenia otrzymuje się liczby par gałęzi równoległych $a = 1; m; p; 2p$. Im wyższe (niższe) jest napięcie maszyny, a mniejsza (większa) moc, tym uzwojenie powinno mieć mniej (więcej) par gałęzi równoległych.

Uzwojenia twornika mają różnego rodzaju połączenia wyrównawcze, zapewniające jednakowy rozptyw prądu na poszczególne gałęzie równoległe.

Każde uzwojenie w maszynie prądu stałego z komutatorem jest uzwojeniem zamkniętym, podzielonym przez szczotki na gałęzie równoległe. Podczas ruchu twornika (wornika) wymieniają się poszczególne pręty w poszczególnych gałęziach uzwojenia, ale położenie gałęzi w przestrzeni pozostaje niezmiennie. Jeśli szczotki są włączone w obwód z prądem I_a , to w poszczególnych gałęziach płynie niezmienny prąd

$$I_g = \frac{I_a}{2a} \quad (3.72)$$

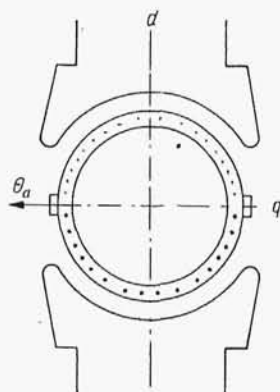
natomiast wartość prądu w poszczególnych prętach zmienia się od $+\frac{I_a}{2a}$ do $-\frac{I_a}{2a}$. Zmiany te następują w czasie T_k , zwanym *okresem komutacji*, to jest w czasie, kiedy boki zezwoju przechodzą z jednej gałęzi do drugiej, a zezwój z tymi bokami jest zwarty przez szczotki, przylegające do wycinków komutatora. W tym czasie boki rozpatrywanego zezwoju powinny znajdować się możliwie blisko osi q .

3.6.3.4. Pole magnetyczne twornika maszyny prądu stałego

Oklad prądu twornika maszyny prądu stałego jest zdefiniowany wyrażeniem

$$A = \frac{NI_g}{\pi D} = \frac{NI_a}{2a\pi D} = \frac{NI_a}{4a\pi r} \quad (3.73)$$

Zamiast rozpatrywać maszynę z prądem I_a , płynącym w prętach ułożonych w żłobkach, można rozpatrywać maszynę z warstwą prądu rozłożoną na obwodzie maszyny (rys. 3.61), czyli z okładem prądu A określonym w amperach na 1 m ob-



Rys. 3.61. Okład prądu twornika

wodu. Okład prądu wywołuje przepływ twornika Θ_a skierowany w osi szczotek. Przy ustawieniu szczotek w osi q kierunek przepływu Θ_a jest zgodny z kierunkiem osi q . Przy ruchu twornika kierunek przepływu Θ_a nie ulega zmianie.

Na rysunku 3.62 przedstawiono rozkład natężenia pola magnetycznego $H_{\delta ax}$ na obwodzie twornika przy szczotkach ustawionych w osi q . Na odcinku $2x$, mającym środek w osi d , przepływ wywołujący strumień

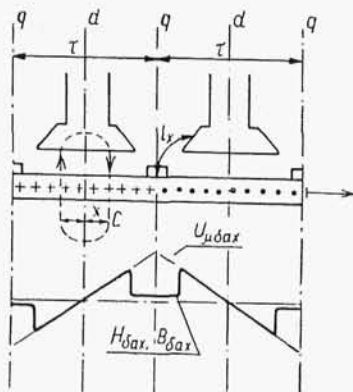
$$\Theta_{2x} = A2x \quad (3.74)$$

Przy pominięciu spadków napięcia w rdzeniu żelaznym napięcie magnetyczne na szczelinie (pomiędzy powierzchnią twornika i powierzchnią nabiegunknika) w punkcie C

$$U_{\mu \delta ax} = \frac{1}{2} \Theta_{2x} = Ax \quad (3.75)$$

i jest przedstawione prostą $U_{\mu \delta ax}$ na rys. 3.62. Natężenie pola magnetycznego

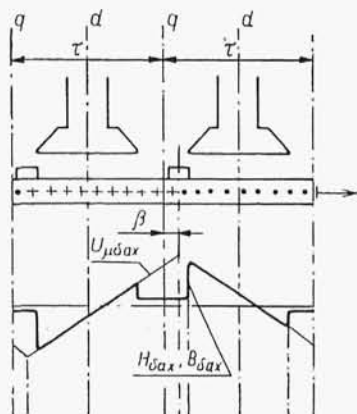
$$H_{\delta ax} = \frac{U_{\mu \delta ax}}{l_x} = \frac{A}{l_x} x \quad (3.76)$$

Rys. 3.62. Pole magnetyczne od prądu twornika przy szczotkach ustawionych w osi q

Długość drogi strumienia w powietrzu l_x pod nabiegunnikami ma stałą wartość $l_x = \delta' = k_c \delta$. Poza nabiegunnikiem wartość tej drogi zwiększa się, więc w tej strefie natężenie pola magnetycznego ma wartość bardzo małą (krzywa $H_{\delta ax}$ na rys. 3.62). Odpowiednio do tego indukcja magnetyczna w szczelinie od prądu twornika wynosi

$$B_{\delta ax} = \mu_\delta H_{\delta ax} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{A}{l_x} x \quad (3.77)$$

Pole magnetyczne od prądu twornika nazywa się *polem reakcji twornika*.



Rys. 3.63. Pole magnetyczne od prądu twornika przy szczotkach wysuniętych z osi q

Na rysunku 3.63 pokazano pole magnetyczne od prądu twornika przy szczotkach wysuniętych z osi q . Razem ze szczotkami przesuwają się krzywa napięcia magnetycznego od prądu twornika $U_{\mu \delta ax}$. Kształt szczeliny i rozkład reluktancji na obwodzie maszyny pozostaje niezmienny, więc krzywa natężenia pola magnetycznego od prądu twornika $H_{\delta ax}$ i indukcji od prądu twornika $B_{\delta ax}$ ma przy szczotkach przesuniętych inny kształt niż przy szczotkach ustawionych w osi q .

3.6.4. Pole magnetyczne wytwarzane prądem przemiennym

3.6.4.1. Uzwojenia bezkomutatorowe prądu przemiennego

Pojęcia zasadnicze. Stosuje się uzwojenia wielofazowe, w tym najczęściej trójfazowe rzadziej jednofazowe, niekiedy dwufazowe. W *uzwojeniach jednowarstwowych* jeden bok zezwoju zajmuje cały żłobek. W *uzwojeniach dwuwarstwowych* bok jednego zezwoju zajmuje jedną (np. dolną) warstwę w żłobku, a bok drugiego zezwoju zajmuje drugą (np. górną) warstwę.

Stosuje się następujące oznaczenia:

Z – liczba żłobków w obwodzie maszyny;

$2p$ – liczba biegunów, na jaką zostało uzwojenie wykonane;

m – liczba faz;

$q = \frac{Z}{2pm}$ – liczba żłobków na biegun i fazę;

y – poskok uzwojenia (rozpiętość zezwoju), zwykle $y \leq \frac{Z}{2p}$;