

Tablica 7.1. Reaktancje maszyny synchronicznej przy obciążeniu symetrycznym

	Obwód rozpatrywany Obwód otwarty	Obwody twornika d, q	Obwód wzbudzenia f	Obwód podłużny tłumienia D	Obwód poprzeczny tłumienia Q
Reaktancje podłużne	$\frac{f}{D}$	$X_d = \omega_s L_d$	—	—	—
	$\frac{d}{D}$	—	$X_f = \omega_s L_f$	—	—
	$\frac{d}{f}$	—	—	$X_D = \omega_s L_D$	—
	D	$X'_d = \sigma_d X_d$	$X'_f = \sigma_d X_f$	—	—
	f	$X'_{dk} = \sigma_D X_d$	—	$X'_D = \sigma_D X_D$	—
	d	—	$X'_{fk} = \sigma_{kf} X_f$	$X'_{Dk} = \sigma_{kf} X_D$	—
	żaden	$X''_d = \frac{D\psi}{\sigma_{kf}} X_d$	$X''_f = \frac{D\psi}{\sigma_D} X_f$	$X''_D = \frac{D\psi}{\sigma_d} X_D$	—
Reaktancje poprzeczne	Q	$X_q = \omega_s L_q$	—	—	—
	q	—	—	—	$X_Q = \omega_s L_Q$
	żaden	$X''_q = \sigma_Q X_q$	—	—	$X''_Q = \sigma_Q X_Q$

Analogicznie wyznacza się reaktancję podprzejściową poprzeczną

$$X''_q = \sigma_Q X_q \quad (7.143)$$

oraz reaktancje innych obwodów maszyny synchronicznej. Wszystkie reaktancje podano w tabl. 7.1.

7.8. STAN USTALONY SYMETRYCZNY SYNCHRONICZNY

7.8.1. Uwagi ogólne

Stan ustalony maszyny synchronicznej może być *symetryczny*, kiedy wielkość fizyczna (np. prąd, napięcie) ma tylko składową zgodną, albo *asymetryczny*, kiedy wielkość fizyczna ma składową zgodną i przynajmniej jedną z dwóch pozostałych składowych, jakimi są składowa przeciwna i składowa zerowa. Ponadto stan ustalony może być

synchroniczny, kiedy wirnik wiruje z prędkością synchroniczną ($s = 0$), albo *asynchroniczny*, kiedy wirnik wiruje ze stałą prędkością różną od prędkości synchronicznej ($s = \text{const} \neq 0$).

W równaniach równowagi maszyny synchronicznej (7.123) i (7.127) macierz wartości względnych napięć $[u_{Br \text{ rel}}]$ określona wzorem (7.124) zawiera napięcia zewnętrzne doprowadzone do zacisków maszyny, które zgodnie z warunkami przyjętymi w ogólnym równaniu obwodów elektrycznych w maszynie (1.88) oznaczają napięcia skierowane przeciwnie do napięć na zaciskach maszyny. Często dogodniej jest analizować zagadnienie posługując się napięciami na zaciskach maszyny. W takim ujęciu należy zmienić znaki w macierzy napięć (7.124), przy czym dla uproszczenia zapisu do oznaczeń napięć objętych tą macierzą nie będą dodawane indeksy zaznaczające, że tym razem będą brane pod uwagę napięcia na zaciskach.

W stanie ustalonym symetrycznym synchronicznym są spełnione następujące warunki:

- prędkość kątowna jest prędkością synchroniczną, czyli $s = 0$;
- moment obrotowy ma wartość stałą, czyli $M = \text{const}$;
- prąd wzbudzenia ma wartość stałą, czyli $i_f = \text{const}$;
- prąd twornika ma stałą wartość skuteczną (i amplitudę), czyli także $i_d = \text{const}$, $i_q = \text{const}$;
- prądy w zamkniętych obwodach tłumienia mają wartości równe zero, czyli $i_D = i_Q = 0$;
- prąd twornika i napięcie twornika mają tylko składowe zgodne i_1 oraz u_1 , czyli $i_2 = i_0 = u_2 = u_0 = 0$.

Do układu równań (7.123) podstawia się $q_d = R_d/X_d$, $q_q = R_q/X_q$, $q_f = R_f/X_f$ oraz $R_d = R_q = R_l$. W czwartej kolumnie czwartego wiersza równań napięć podstawia się słuszną w wartościach względnych zależność $1 \cdot i_f = u_f = R_f i_f$. W czwartej kolumnie drugiego wiersza wprowadza się uzasadnioną w uwagach podanych przy wyprowadzaniu wzoru (7.123) równość

$$\frac{X_{\mu f} i_f}{\omega_s M_{lf} I_{f(j)}} = \frac{\omega_s M_{lf} i_f}{\omega_s M_{lf} I_{f(j)}} = 1 \cdot i_{f \text{ rel}}$$

co oznacza, że wyrażenie w czwartej kolumnie drugiego wiersza oznacza względną wartość napięcia indukowanego rotacji w osi poprzecznej od prądu wzbudzenia

$$u_{if \text{ rel}} = i_{f \text{ rel}}$$

którego wartość bezwzględna w stanie ustalonym

$$u_{if} = \omega_s M_{lf} i_f$$

Opuszcza się indeksy rel oznaczające wartości względne i z układu równań (7.123) otrzymuje się układ równań dla stanu ustalonego

$$\left. \begin{aligned} R_l i_d + X_q i_q &= -u_d \\ -X_d i_d + R_l i_q - u_{if} &= -u_q \\ R_f i_f &= u_f \\ (X_d i_d + u_{if}) i_q - X_q i_q i_d &= M \end{aligned} \right\} \quad (7.144)$$

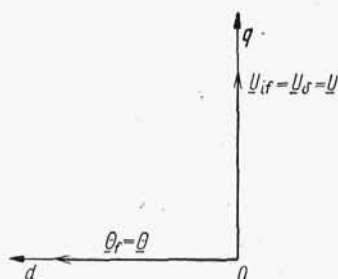
W stanie biegu jałowego ($i_d = 0$, $i_q = 0$) równania (7.144) przybierają postać

$$\left. \begin{aligned} u_d &= 0 \\ u_q &= u_{if} \\ u_f &= R_f i_f \end{aligned} \right\} \quad (7.145)$$

Te równania w wartościach bezwzględnych mają postać

$$\left. \begin{aligned} u_q &= \omega_s M_{lf} i_f \\ u_f &= R_f i_f \end{aligned} \right\} \quad (7.146)$$

Podczas biegu jałowego w maszynie synchronicznej indukuje się tylko napięcie poprzeczne, którego wektor jest ustawiony w osi poprzecznej jak np. na rys. 7.7.



Rys. 7.7. Wykres wektorowy maszyny synchronicznej w stanie biegu jałowego

Przepływ wzbudzenia θ_f ustawiony w osi podłużnej jest równy przepływowi wypadkowemu θ . Napięcie indukowane przez strumień wzbudzenia, oznaczone U_{if} , jest równe napięciu U_δ indukowanemu przez strumień wypadkowy w szczelinie i równe napięciu na zaciskach U .

Po przekształceniu napięć z układu osi prostopadłych $d, q, 0$ do układu osi naturalnych u, v, w według macierzy (7.25) otrzymuje się trójkę napięć indukowanych fazowych

$$\left. \begin{aligned} u_{iu} &= u_q \sin \gamma = U_{ifm} \sin \gamma \\ u_{iv} &= u_q \sin (\gamma - \varepsilon) = U_{ifm} \sin (\gamma - \varepsilon) \\ u_{iw} &= u_q \sin (\gamma + \varepsilon) = U_{ifm} \sin (\gamma + \varepsilon) \end{aligned} \right\} \quad (7.147)$$

Amplituda napięcia indukowanego fazowego

$$U_{ifm} = u_q = \omega_s M_{lf} i_f \quad (7.148)$$

a skuteczna wartość tego napięcia ($\omega_s = 2\pi f$)

$$U_{if} = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega_s M_{lf} i_f \quad (7.149)$$

albo

$$U_{if} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \xi_{s1} z_s \Phi_f \quad (7.150)$$

ponieważ $\omega_s = 2\pi f$, a $M_{lf} i_f = \Psi_{sf} = \xi_{s1} z_s \Phi_f$, przy czym Ψ_{sf} – amplituda strumienia magnetycznego skojarzonego z uzwojeniem fazowym stojana (twornika)

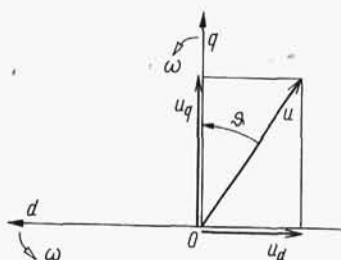
od prądu wzbudzenia i_f ; Φ_f – strumień wzbudzenia wzniesiony prądem i_f ; z_s – liczba zwojów uzwojenia fazowego stojana; ξ_{s1} – współczynnik uzwojenia stojana dla pierwszej harmonicznej określony wzorem (3.85).

Przy analizowaniu stanów ustalonych równania napięć mogą być rozwiązywane niezależnie od równania momentów. Po wyznaczeniu niewiadomych z równań napięciowych można wyznaczyć moment z równania momentów. Traktując napięcie wzbudzenia, a więc także i napięcie indukowane od prądu wzbudzenia, jako parametr można się ograniczyć do rozważania tylko dwóch pierwszych równań układu (7.144), czyli równań

$$\left. \begin{aligned} R_l i_d + X_q i_q &= -u_d \\ -X_d i_d + R_l i_q - u_{if} &= -u_q \end{aligned} \right\} \quad (7.151)$$

Wektor napięcia u jest przesunięty względem osi q i napięcia u_{if} o kąt obciążenia ϑ , który jest mierzony od wektora napięcia u do osi q , jak na rys. 7.8. Składowe podłużna i poprzeczna napięcia są określone następująco

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -u \sin \vartheta \\ u_q &= u \cos \vartheta \end{aligned} \right\} \quad (7.152)$$



Rys. 7.8. Składowe wektora napięcia na zaciskach

Z równań (7.151) i (7.152) otrzymuje się

$$\left. \begin{aligned} X_q i_q + R_l i_d &= u \sin \vartheta \\ R_l i_q - X_d i_d - u_{if} &= -u \cos \vartheta \end{aligned} \right\} \quad (7.153)$$

skąd

$$\left. \begin{aligned} i_d &= - \frac{(u_{if} - u \cos \vartheta) X_q - R_l u \sin \vartheta}{R_l^2 + X_d X_q} \\ i_q &= \frac{(u_{if} - u \cos \vartheta) R_l + X_d u \sin \vartheta}{R_l^2 + X_d X_q} \end{aligned} \right\} \quad (7.154)$$

Po uproszczeniu wynikającym z przyjęcia $R_l = 0$, dopuszczalnym przy dużych maszynach, otrzymuje się

$$\left. \begin{aligned} X_q i_q &= -u_d \\ -X_d i_d - u_{if} &= -u_q \end{aligned} \right\} \quad (7.155)$$

albo

$$\left. \begin{aligned} X_q i_q &= u \sin \vartheta \\ -X_d i_d - u_{if} &= -u \cos \vartheta \end{aligned} \right\} \quad (7.156)$$

skąd

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{u \cos \vartheta - u_{if}}{X_d} \\ i_q &= \frac{u \sin \vartheta}{X_q} \end{aligned} \right\} \quad (7.157)$$

Poszczególne człony pierwszych równań układów (7.151), (7.153), (7.155) i (7.156) mnoży się przez wektor jednostkowy d o module 1 i zwrocie zgodnym ze zwrotem osi d . Wtedy te równania są równaniami wektorów w osi d . Podobnie człony drugich równań tych układów mnoży się przez wektor jednostkowy q o module 1 i zwrocie zgodnym ze zwrotem osi q . Wtedy po dodaniu do siebie stronami równań układu (7.151) otrzymuje się równanie wektorów w dwóch osiach

$$(u_{if} + X_d i_d) q - X_q i_q d - R_l(i_q q + i_d d) = u_q q + u_d d \quad (7.158)$$

albo

$$(u_{if} + X_d i_d) q - X_q i_q d - R_l(i_q q + i_d d) = u \cos \vartheta q - u \sin \vartheta d \quad (7.159)$$

Ponieważ

$$\left. \begin{aligned} i_q q + i_d d &= i \\ u_q q + u_d d &= u \cos \vartheta q - u \sin \vartheta d = u \end{aligned} \right\} \quad (7.160)$$

wobec tego

$$(u_{if} + X_d i_d) q - X_q i_q d - R_l i = u \quad (7.161)$$

Układy równań (7.158)÷(7.160) można traktować jako układy równań wektorów w płaszczyźnie liczb zespolonych. Wtedy wektorami jednostkowymi (wersorami) są: $+1$ (zamiast d) oraz $-j$ (zamiast q), a równania (7.160) przybierają postać

$$\left. \begin{aligned} -ji_q + i_d &= i \\ -ju \cos \vartheta - u \sin \vartheta &= u \end{aligned} \right\} \quad (7.162)$$

Wykres wektorowy z rys. 3.113 jest graficzną ilustracją równań (7.158)÷(7.161). Reaktancje X_d , X_q w tych równaniach i wykres z rys. 3.113 odnoszą się do stanu nienasyconego.

Napięcie za reaktancją synchroniczną poprzeczną

$$\underline{u}_Q = \underline{u}_{if} - j(X_d - X_q) \underline{i}_d \quad (7.163)$$

albo

$$\underline{u}_Q = \underline{u} + (R_l + jX_q) \underline{i} \quad (7.164)$$

Oznaczywszy

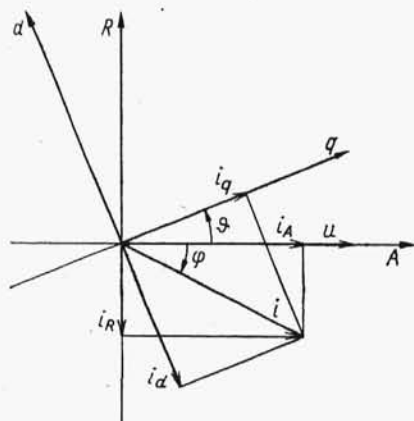
$$\underline{Z}_q = R_l + j X_q \quad (7.165)$$

otrzymuje się

$$\underline{u}_Q = \underline{u} + \underline{Z}_q \underline{i} \quad (7.166)$$

Napięcie u_Q jest to takie napięcie, do jakiego należałoby wzbudzić maszynę synchroniczną dla otrzymania danego stanu ustalonego, gdyby w tej maszynie reaktancja synchroniczna podłużna była równa reaktancji synchronicznej poprzecznej.

Wprowadza się pojęcie *osi aktywnej* (czynnej) A , której kierunek i zwrot jest zgodny z kierunkiem i zwrotem wektora napięcia u , oraz *osi reaktywnej* (bier-



Rys. 7.9. Zależność pomiędzy wielkościami w osiach: aktywna-reaktywna oraz podłużna-poprzeczna

nej) R , obróconej względem osi A w lewo o kąt $\pi/2$ (rys. 7.9). Od osi A do osi q jest kąt ϑ . Od osi A do kierunku prądu jest kąt φ . Wtedy

$$\left. \begin{aligned} i_A &= i \cos \varphi \\ i_R &= i \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (7.167)$$

oraz

$$\left. \begin{aligned} i_A &= i_q \cos \vartheta - i_d \sin \vartheta \\ i_R &= i_q \sin \vartheta + i_d \cos \vartheta \end{aligned} \right\} \quad (7.168)$$

i

$$\left. \begin{aligned} i_q &= i_A \cos \vartheta + i_R \sin \vartheta \\ i_d &= -i_A \sin \vartheta + i_R \cos \vartheta \end{aligned} \right\} \quad (7.169)$$

Przy danej mocy czynnej P i biernej Q w punkcie o napięciu u prąd aktywny i reaktywny wyznacza się z zależności $P = ui_A$; $Q = ui_R$. Z układu równań (7.153) i (7.163) przy uwzględnieniu $-jd = q$ otrzymuje się

$$\left. \begin{aligned} X_q i_q + R_l i_d - u \sin \vartheta &= 0 \\ R_l i_q - u_Q - X_q i_d + u \cos \vartheta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.170)$$

Oznaczywszy lewą stronę pierwszego równania (7.170) przez A , a lewą stronę drugiego równania przez B , po pomnożeniu tych wielkości odpowiednio przez $-\sin \varphi$ i $\cos \varphi$ otrzymuje się

$$A \sin \varphi = 0$$

$$B \cos \varphi = 0$$

oraz

$$A \cos \varphi = 0$$

$$B \sin \varphi = 0$$

Odejmując te równania stronami uzyskuje się zależności

$$B \cos \varphi - A \sin \varphi = 0$$

$$B \sin \varphi - A \cos \varphi = 0$$

Na tej podstawie

$$\begin{cases} (R_l i_q - u_Q - X_q i_d + u \cos \vartheta) \cos \vartheta - (X_q i_q + R_l i_d - u \sin \vartheta) \sin \vartheta = 0 \\ (R_l i_q - u_Q - X_q i_d + u \cos \vartheta) \sin \vartheta - (X_q i_q + R_l i_d - u \sin \vartheta) \cos \vartheta = 0 \end{cases} \quad (7.171)$$

Zc wzorów (7.171) i (7.168) otrzymuje się

$$\begin{cases} R_l i_A - X_q i_R + u = u_Q \cos \vartheta \\ X_q i_A + R_l i_R = u_Q \sin \vartheta \end{cases} \quad (7.172)$$

skąd

$$u_Q = \sqrt{u^2 + 2u(R_l i_A - X_q i_R) + (R_l^2 + X_q^2) i^2} \quad (7.173)$$

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{X_q i_A + R_l i_R}{u + R_l i_A - X_q i_R} \quad (7.174)$$

$$\sin \vartheta = \frac{X_q i_A + R_l i_R}{u_Q} \quad (7.175)$$

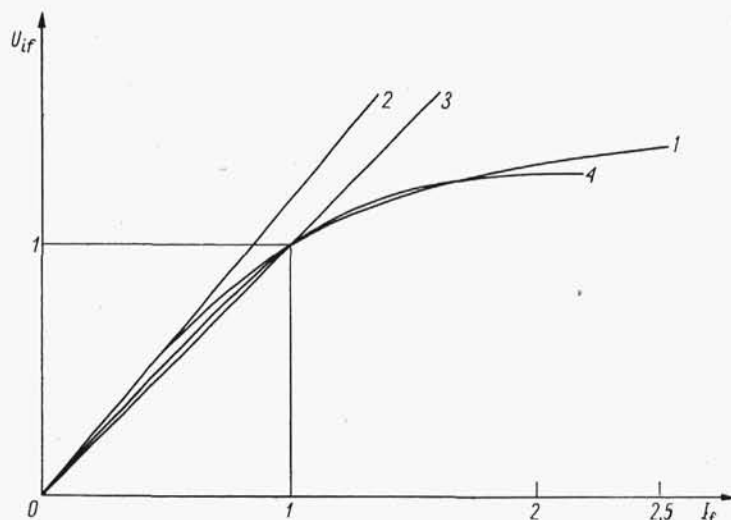
$$\cos \vartheta = \frac{u + R_l i_A + X_q i_R}{u_Q} \quad (7.176)$$

Podane w tym punkcie zależności pozwalają wyznaczyć charakterystyki maszyn synchronicznych w stanie ustalonym.

7.8.2. Charakterystyka biegu jałowego

Charakterystyką biegu jałowego, czyli charakterystyką magnesowania, maszyny synchronicznej nazywa się zależność $U_{if} = f(I_f)$ przy $I = 0$ oraz $n = \text{const}$. Charakterystykę biegu jałowego w ścisłym znaczeniu tego słowa można wyznaczyć eksperymentalnie tylko przy pracy prądnicowej, ponieważ tylko przy tej pracy w stanie bez obciążenia prąd twornika jest równy zero. Przy pracy silnikowej nawet bez obciążenia zewnętrznym momentem (stan biegu jałowego silnika) maszyna pobiera z sieci moc równą stratom w maszynie, a więc przez uzwojenie twornika płynie prąd.

Przy każdej wartości napięcia na zaciskach można dobrać taką wartość prądu wzbudzenia, żeby prąd twornika miał wartość najmniejszą. Wtedy charakterystyka biegu jałowego silnika synchronicznego różni się niewiele od charakterystyki biegu jałowego prądnicy synchronicznej. Przy stałej wartości indukcyjności M_{If} , jak wynika ze wzorów (7.148), (7.149) i (7.150), charakterystyka biegu jałowego jest prostoliniowa. Przy dużych wartościach prądu I_f wartość indukcyjności M_{If} maleje na skutek nasycenia obwodu magnetycznego i charakterystyka biegu jałowego przebiega jak np. krzywa 1 na rys. 7.10. Z powodu dużej szczeliny powietrznej



Rys. 7.10. Charakterystyki biegu jałowego maszyn synchronicznych

charakterystyka biegu jałowego jest prostoliniowa na stosunkowo długim odcinku. Gdyby reluktancja obwodu magnetycznego miała wartość stałą taką jak przy $I_f = 0$, charakterystyka biegu jałowego miałaby przebieg prostoliniowy, jak prosta 2 na rys. 7.10. Niekiedy aproksymuje się charakterystykę biegu jałowego prostą, jak prosta 3 na rys. 7.10, przechodzącą przez początek układu współrzędnych i przez punkt o współrzędnych $I_f = I_{f0N}$, $U_{if} = U_N$ (I_{f0N} – prąd znamionowy wzbudzenia przy biegu jałowym). Charakterystyki biegu jałowego dużych maszyn synchronicznych (np. turbogeneratorów i hydrogeneratorów) są do siebie podobne. Dlatego często

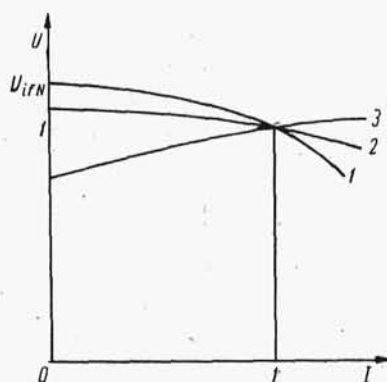
Tablica 7.2. Normalne charakterystyki biegu jałowego generatorów synchronicznych

Prąd wzbudzenia I_f/I_{f0N}		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Napięcie biegu jałowego U_{if}/U_N	turbogenerator	0	0,58	1,00	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51
	hydrogenerator	0	0,53	1,00	1,23	1,30	—	—	—

korzysta się z tzw. normalnych charakterystyk biegu jałowego, których współrzędne podane są w tabl. 7.2. Krzywa 1 na rys. 7.10 oznacza normalną charakterystykę biegu jałowego turbogeneratorsa, a krzywa 4 – normalną charakterystykę biegu jałowego hydrogeneratorsa.

7.8.3. Charakterystyki zewnętrzne prądnic

Charakterystyką zewnętrzną prądnicy synchronicznej nazywa się zależność napięcia na jej zaciskach od prądu twornika przy stałej wartości prędkości obrotowej, prądu wzbudzenia i współczynnika mocy, czyli zależność $U = f(I)$ przy $n = \text{const}$, $I_f = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$. Przebiegi charakterystyk zewnętrznych pokazane są na rys. 7.11. Charakterystyki zewnętrzne są skonstruowane w ten sposób, że przy każdym rodzaju obciążenia, odpowiadającego danym wartościom współczynnika mocy, dobrana jest taka wartość prądu wzbudzenia, że przy prądzie znamionowym twornika ($I = 1$) napięcie na zaciskach twornika ma wartość znamionową ($U = 1$).



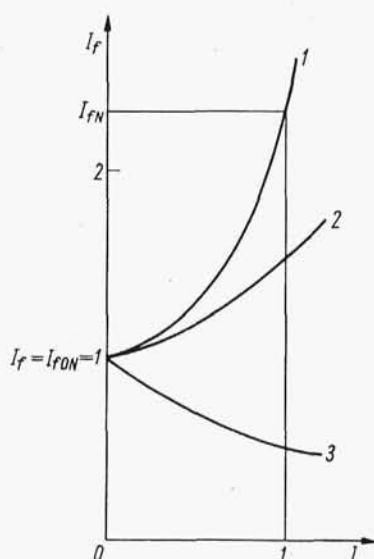
Rys. 7.11. Charakterystyki zewnętrzne prądnicy synchronicznej
1 – przy obciążeniu indukcyjnym
2 – przy obciążeniu czynnym
3 – przy obciążeniu pojemnościowym

Krzywa 1 jest charakterystyką zewnętrzną prądnicy przy obciążeniu ze współczynnikiem mocy znamionowym bardzo często mającym wartość $\cos \varphi = 0,8$ o charakterze indukcyjnym. Opadający charakter charakterystyki zewnętrznej przy obciążeniu o charakterze indukcyjnym wynika z rozmagnesowującej reakcji twornika i spadku napięcia na reaktancji rozproszenia, co jest widoczne z wykresów wektorowych podanych na rys. 3.111 i 3.112. Przy takim obciążeniu prądnica pracuje jako maszyna przewzbudzona, oddając do sieci, oprócz mocy czynnej, także moc bierną indukcyjną.

Przy znamionowym napięciu U_N , znamionowym prądzie twornika I_N oraz znamionowym współczynnikiem mocy $\cos \varphi_N$ prądnica jest wzbudzona znamionowym prądem wzbudzenia I_{fN} . Jeśli przy takim prądzie wzbudzenia I_{fN} prądnica zostanie odciążona ($I = 0$), to na jej zaciskach wystąpi napięcie indukowane od znamionowego prądu wzbudzenia $U_{i f N}$. Zmienność napięcia (względna wartość)

$$\Delta U_{rel} = \frac{U_{i f N} - U_N}{U_N} \quad (7.177)$$

Wartość zmienności napięcia maszyn synchronicznych dochodzi do 0,4.



Rys. 7.14. Charakterystyki regulacyjne prądnicy synchronicznej

1 – przy obciążeniu indukcyjnym ($\cos \varphi = \cos \varphi_N$),

2 – przy obciążeniu czynnym,

3 – przy obciążeniu pojemnościowym

Dla maszyn z biegunami wydutnymi ten stosunek jest mniejszy, a przebiegi charakterystyk regulacyjnych są bardziej płaskie.

7.8.5. Charakterystyka zwarcia symetrycznego ustalonego

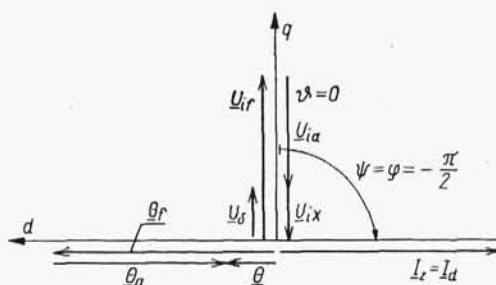
Charakterystyką zwarcia symetrycznego ustalonego maszyny synchronicznej nazywa się zależność prądu twornika od prądu wzbudzenia w stanie ustalonym przy zwartych zaciskach twornika, czyli zależność $I_z = f(I_f)$ przy $U = 0$. Obwód zwarty składa się ze źródła napięcia indukowanego U_{if} oraz z reaktancji synchronicznej podłużnej X_d (przy pominięciu małej rezystancji uzwojenia twornika), więc prąd zwarcia I_z jest prądem podłużnym. Reakcja twornika jest reakcją wyraźnie roz magnesowującą, wobec czego strumień wypadkowy oraz napięcie szczelinowe U_δ są małe, obwód magnetyczny jest nienasycony, a reaktancja synchroniczna X_d ma wartość stałą. Wykres wektorowy maszyny synchronicznej w stanie zwarcia symetrycznego ustalonego pokazano na rys. 7.15. Prąd zwarcia można wyrazić wzorem

$$I_z = \frac{U_{if}}{X_d} = c I_f \quad (7.178)$$

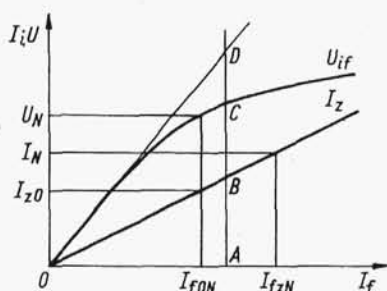
co oznacza prostoliniowy przebieg charakterystyki zwarcia ustalonego symetrycznego maszyny synchronicznej (rys. 7.16).

Przy prądzie wzbudzenia znamionowym biegu jałowego I_{f0N} prąd zwarcia wynosi I_{z0} . Zwykle

$$\frac{I_{z0}}{I_N} = 0,4 \div 1,5$$



Rys. 7.15. Wykres wektorowy maszyny synchronicznej w stanie zwarcia symetrycznego ustalonego



Rys. 7.16. Charakterystyki zwarcia $I_z = f(I_f)$ i biegu jałowego $U_{if} = f(I_f)$ maszyny synchronicznej

Wartości mniejsze odnoszą się do dużych turbogeneratorów, mających dużą – w tym przypadku rozmagnesowującą – reakcję twornika, wartości większe – do małych maszyn z biegunami wydajnymi.

Przy prądzie wzbudzenia znamionowym prąd zwarcia jest większy I_{fN}/I_{f0N} razy od prądu I_{z0} i wynosi zwykle (w wartościach względnych) od 1 do 3,7. Napięcie U_{if} i reaktancja X_d są proporcjonalne do częstotliwości, czyli także do prędkości obrotowej, więc charakterystyka zwarcia jest niezależna od zmian prędkości obrotowej. Tylko przy bardzo małych prędkościach obrotowych (częstotliwościach), kiedy rezystancja uzwojenia twornika jest duża w porównaniu z reaktancją, charakterystyka zwarcia opada przy zmniejszaniu się prędkości obrotowej.

Stosunek wartości bezwzględnych prądu zwarcia symetrycznego ustalonego przy wzbudzeniu biegu jałowego I_{z0} do prądu znamionowego maszyny synchronicznej I_N , równy stosunkowi wartości bezwzględnych prądu znamionowego wzbudzenia przy biegu jałowym I_{f0N} do prądu wzbudzenia znamionowego przy zwarcu I_{fzN} (rys. 7.16), nazywa się *stosunkiem zwarcia*

$$K_z = \frac{I_{z0}}{I_N} = \frac{I_{f0N}}{I_{fzN}} \quad (7.179)$$

Przy stosowaniu wartości względnych prądów stosunek zwarcia wyraża się następująco:

$$K_z = I_{z0} = \frac{1}{I_{fzN}} \quad (7.180)$$

Stosunek zwarcia wynosi od 0,4 do 1,5. Stosunek zwarcia ma wpływ na stabilność pracy prądnicy, która wzrasta ze wzrostem stosunku zwarcia. Ze wzrostem stosunku zwarcia zwiększa się jednak objętość miedzi uzwojenia wirnika i koszt maszyny. Dlatego bardzo duże turbogeneratory mają zwykle mały stosunek zwarcia, ale są wyposażone w szybko działające regulatory wzbudzenia.

Ze wzoru (7.178) wynika

$$X_d = \frac{U_{if}}{I_z} \quad (7.181)$$

co oznacza, że reaktancja synchroniczna podłużna może być wyznaczona jako stosunek napięcia indukowanego przez dany prąd wzbudzenia do prądu zwarcowego symetrycznego ustalonego przy tym samym prądzie wzbudzenia. Z rysunku 7.16 wynika, że reaktancja synchroniczna podłużna nienasyconą

$$X_d = \frac{\overline{AD}}{\overline{AB}}$$

a nasyconą

$$X_d = \frac{\overline{AC}}{\overline{AB}}$$

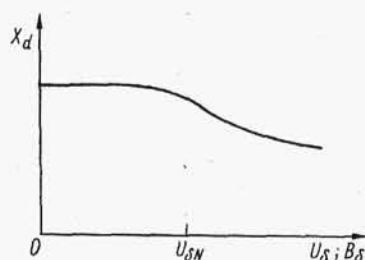
Ponieważ

$$K_z = \frac{I_{z0}}{I_N} = \frac{I_{z0} X_d}{I_N X_d} = \frac{U_N}{I_N X_d} = \frac{Z_N}{X_d}$$

zatem

$$K_z = \frac{1}{X_{d\text{rel}}} \quad (7.182)$$

przy czym $X_{d\text{rel}}$ – wartość względna reaktancji synchronicznej podłużnej nasyconej. Zwykle podaje się wartości względne reaktancji synchronicznej podłużnej nienasy-

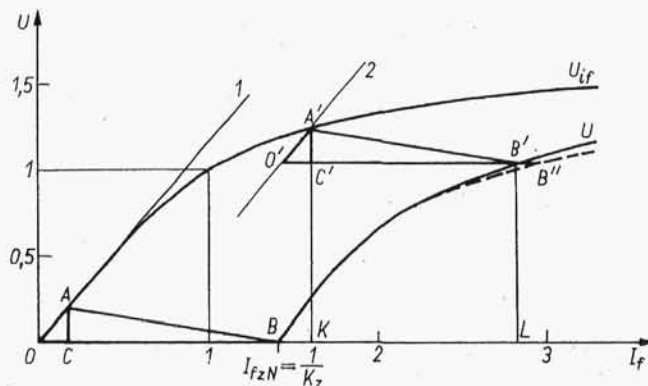


Rys. 7.17. Zależność reaktancji synchronicznej podłużnej od napięcia szczelinowego

conej, dochodzące dla dużych turbogeneratorów do 2,5. Na rysunku 7.17 pokazano przebieg zależności reaktancji synchronicznej podłużnej X_d od napięcia szczelinowego U_δ , albo od indukcji w szczelinie B_δ .

7.8.6. Charakterystyka obciążenia i trójkąt Potiera

Charakterystyka obciążenia jest to zależność napięcia na zaciskach prądnicy od prądu wzbudzenia przy stałym prądzie twornika, stałym współczynniku mocy i stałej prędkości obrotowej, czyli zależność $U = f(I_f)$ przy $I_a = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$ oraz $n = \text{const}$. Dla różnych (przy danej charakterystyce stałych) wartości I oraz $\cos \varphi$ można otrzymać całą rodzinę charakterystyk obciążenia. Jedną z nich jest charakterystyka biegu jałowego (magnesowania), tzn. $U = f(I_f)$ przy $I = 0$. Drugą interesującą charakterystyką obciążenia jest charakterystyka $U = f(I_f)$ przy $I = I_N$, $\cos \varphi = 0$ (obciążenie czysto indukcyjne) oraz $n = n_N$. Kończącym punktem tej charakterystyki jest prąd znamionowy wzbudzenia przy zwarcu I_{fzN} określony z charakterystyki zwarcia przy $I_z = I_N$, ponieważ zwarcu odpowiada $\cos \varphi = 0$ o charakterze indukcyjnym.



Rys. 7.18. Charakterystyka obciążenia maszyny synchronicznej

Charakterystykę obciążenia pokazano na rys. 7.18. Krzywa U_{if} jest charakterystyką biegu jałowego. Punkt B , wyznaczający na osi odciętych prąd wzbudzenia $I_{fzN} = 1/K_z$ jest końcowym punktem charakterystyki obciążenia. Prąd wzbudzenia równy odcinkowi \overline{OB} odpowiada przepływowi wzbudzenia Θ_f przy zwarcu. Gdyby znany był przepływ twornika Θ_a przy prądzie znamionowym odpowiadający np. odcinkowi \overline{BC} , to odcinek \overline{OC} odpowiadałby przepływowi wypadkowemu $\Theta = \Theta_f - \Theta_a$. Przepływ wypadkowy Θ wywołuje napięcie szczelinowe $U_s = \overline{AC}$. Przy zwarcu (rys. 7.15) napięcie szczelinowe jest równe iloczynowi reaktancji rozproszenia i prądu, czyli

$$\overline{AC} = X_l I$$

Przy prądzie twornika znamionowym, czyli przy $I = 1$ jest $\overline{AC} = X_l$. Podczas wyznaczania charakterystyki obciążenia $U_{ix} = X_l I = \overline{AC} = \text{const}$ oraz $\Theta_a = \overline{BC} = \text{const}$, czyli trójkąt ABC , zwany trójkątem Potiera, oraz trójkąt OBA mają boki niezmiennie. Przy przesuwaniu trójkąta ABC albo trójkąta OBA tak, żeby wier-

chołek A ślizgał się po charakterystyce biegu jałowego (przykładowe drugie położenie tego trójkąta pokazuje trójkąt $O'B'A'$) wierzchołek B wykreśli charakterystykę obciążenia.

W praktyce trzeba najpierw wyznaczyć boki trójkąta Potiera. W tym celu pomiarowo wyznacza się współrzędne punkt B' , tzn. wyznacza się prąd wzbudzenia I_f i napięcie U przy obciążeniu maszyny synchronicznej prądem znamionowym twornika $I = 1$ oraz przy $\cos \varphi = 0$. Wartość napięcia twornika musi być tak duża (najlepiej $U > 1$), aby punkty trójkąta leżały na krzywych powyżej przebiegu. Od punktu B' odkłada się odcinek $\overline{O'B'} = \overline{OB}$. Przez punkt O' prowadzi się prostą 2 równoległą do prostej 1 będącej przedłużeniem prostoliniowej części charakterystyki biegu jałowego i otrzymuje się punkt A' , jako punkt przecięcia prostej 2 z charakterystyką magnesowania. W ten sposób znane jest położenie wszystkich wierzchołków trójkąta $O'B'C'$. Z wierzchołka A' prowadzi się prostą pionową $A'C'$. W ten sposób otrzymuje się trójkąt Potiera $A'B'C'$, a po przesunięciu trójkąta $A'B'C'$ do początku układu współrzędnych otrzymuje się także trójkąt Potiera ABC w położeniu początkowym. Z trójkąta Potiera wyznacza się przepływ twornika (w skali prądu wzbudzenia) przy danym prądzie twornika (najczęściej znamionowym)

$$\Theta_a = \overline{B'C'} = \overline{BC}$$

oraz reaktancję rozproszenia (wartość względną)

$$X_{l\text{rel}} = \frac{X_l}{Z_N} = \frac{X_l I_N}{U_N} = \frac{U_{ix}}{U_N} = \overline{A'C'} = \overline{AC}$$

W tym wzorze tylko $X_{l\text{rel}}$ oznacza wartość względną reaktancji, pozostałe wielkości podano w wartościach bezwzględnych. Tak wyznaczona reaktancja jest zwykle nieco większa od reaktancji rozproszenia X_l wyznaczonej na podstawie obliczenia przewodności magnetycznej na drodze strumienia rozproszonego. Dlatego najczęściej tak wyznaczoną reaktancję nazywa się *reaktancją Potiera* i oznacza się ją X_p . W maszynach z biegunami utajonymi jest zwykle $X_p = (1,05 \div 1,10) X_l$, a w maszynach z biegunami wydatnymi $X_p = (1,1 \div 1,3) X_l$.

W punkcie pracy B' prąd wzbudzenia $I_f = \overline{OL}$ jest większy od prądu wzbudzenia $I_f = \overline{OK}$ dla punktu pracy A' na charakterystyce biegu jałowego, więc strumień rozproszony uzwojenia wzbudzenia w punkcie B' charakterystyki obciążenia jest większy niż w punkcie A' charakterystyki biegu jałowego, a to oznacza odpowiednie zwiększenie nasycenia biegunów i jarzma wirnika. Dlatego w wyniku pomiarów otrzymuje się zamiast punktu B' punkt B'' , a wykreślona na podstawie pomiarów charakterystyka obciążenia przebiega jak krzywa kreskowana na rys. 7.18.

7.8.7. Charakterystyki katowe

Charakterystyką kątową maszyny synchronicznej nazywa się zależność momentu elektromagnetycznego od kąta obciążenia przy stałej wartości napięcia na zaciskach i stałej wartości napięcia indukowanego przez strumień wzbudzenia, czyli zależność $M_e = f(\vartheta)$ przy $u = \text{const}$ oraz $u_{if} = \text{const}$.

Wartość względna momentu elektromagnetycznego w stanie ustalonym jest wyrażona wzorem (7.144). Po podstawieniu do tego wzoru względnych wartości prądu podłużnego i poprzecznego, które przy pominięciu rezystancji twornika są wyrażone wzorami (7.157), otrzymuje się wyrażenie na wartość względną momentu elektromagnetycznego maszyny synchronicznej w stanie ustalonym w postaci

$$M_e = \frac{u_{if} u}{X_d} \sin \vartheta + \frac{1}{2} u^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\vartheta \quad (7.183)$$

Dla uzyskania bezwzględnej wartości momentu elektromagnetycznego mnoży się lewą stronę powyższego równania przez moment znamionowy M_N , a prawą jego stronę przez równoważne wyrażenie $M_N = \frac{S_N}{\omega_s} = \frac{1}{2\pi n} 3U_N I_N$. Wartości względne reaktancji zastępuje się przez równoważne wyrażenie według wzoru $Z_{rel} = Z/Z_N = ZI_N/U_N$. Wtedy

$$M_e = 3 \frac{1}{2\pi n} \left[\frac{U_{if} U}{X_d} \sin \vartheta + \frac{1}{2} U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\vartheta \right] \quad (7.184)$$

Stąd także moc elektromagnetyczna

$$P_e = \omega_s M_e = 2\pi n M_e$$

czyli

$$P_e = 3 \left[\frac{U_{if} U}{X_d} \sin \vartheta + \frac{1}{2} U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\vartheta \right] \quad (7.185)$$

Wzory (7.184) i (7.185) wyrażające moment elektromagnetyczny i moc elektromagnetyczną maszyny synchronicznej są słuszne w przypadku ogólnym, tzn. przy $X_d \neq X_q$. Dotyczą one jednak przypadku uproszczonego, odpowiadającego założeniu, że rezystancja uzwojenia twornika jest równa zero. Przy tym uproszczeniu moc elektromagnetyczna określona wzorem (7.185) jest równa mocy na zaciskach prądnicy.

Wyrażenie na moc maszyny synchronicznej można w sposób prosty, bez potrzeby korzystania z równań równowagi, uzyskać także na podstawie uproszczonego wykresu wektorowego, jak na rys. 7.19. Na podstawie tego wykresu

$$\left. \begin{aligned} U_{if} &= U \cos \vartheta + X_d I_d \\ U \sin \vartheta &= X_q I_q \end{aligned} \right\} \quad (7.186)$$

skąd

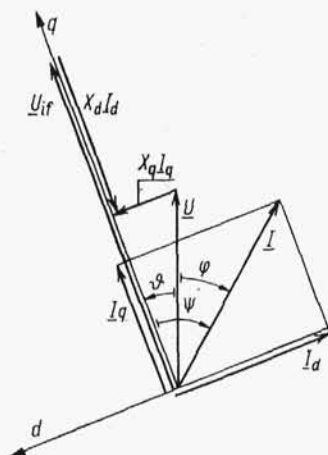
$$\left. \begin{aligned} I_d &= \frac{U_{if}}{X_d} - \frac{U}{X_d} \cos \vartheta \\ I_q &= \frac{U}{X_q} \sin \vartheta \end{aligned} \right\} \quad (7.187)$$

Moc $P = 3UI \cos \varphi = 3UI \cos (\psi - \vartheta)$, czyli

$$P = 3U (I_q \cos \vartheta + I_d \sin \vartheta) \quad (7.188)$$

Po podstawieniu wyrażeń na prąd podłużny i poprzeczny według wzorów (7.187) otrzymuje się wyrażenie na moc identyczne ze wzorem (7.185) i odpowiednio do tego wyrażenie na moment elektromagnetyczny identyczne ze wzorem (7.184).

W maszynie synchronicznej z biegunami utajonymi, stanowiącej prostszy przypadek maszyny synchronicznej, jest $X_d = X_q$. Dla maszyny synchronicznej

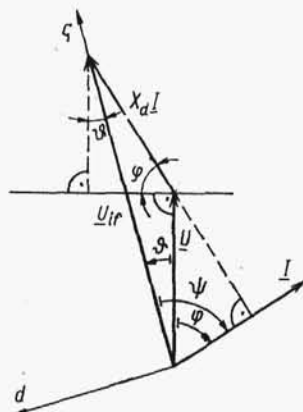


Rys. 7.19. Uproszczony wykres wektorowy maszyny synchronicznej z biegunami wydutnymi

z biegunami utajonymi wyrażenia na moment elektromagnetyczny i na moc na podstawie wzorów (7.184) i (7.185) przybierają postać

$$\left. \begin{aligned} M_e &= 3 \frac{1}{2\pi n} \frac{U_{if} U}{X_d} \sin \vartheta \\ P_e &= 3 \frac{U_{if} U}{X_d} \sin \vartheta \end{aligned} \right\} \quad (7.189)$$

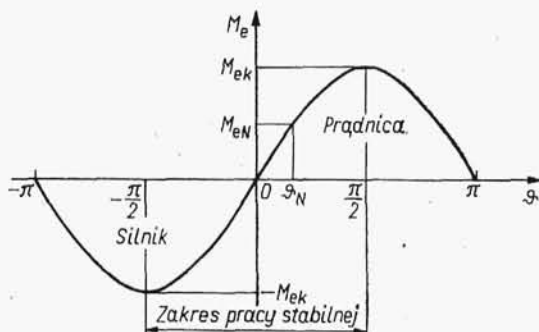
Wyrażenie na moc maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi można w łatwy sposób otrzymać na podstawie uproszczonego wykresu wektorowego, jak na rys. 7.20.



Rys. 7.20. Uproszczony wykres wektorowy maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi

Na podstawie tego wykresu uzyskuje się wyrażenie $X_d I \cos \varphi = U_{if} \sin \vartheta$, które wykorzystane razem ze wzorem na moc $P = 3UI \cos \varphi$ daje wyrażenie na moc i odpowiednio na moment elektromagnetyczny identyczne ze wzorami 7.189.

Charakterystykę kątową maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi, mającą zgodnie ze wzorem (7.189) przebieg sinusoidalny, pokazano na rys. 7.21. W zakresie kątów obciążenia $0 < \vartheta < \pi$ moment ma wartość dodatnią, maszyna pracuje jako prądnica. W zakresie kątów obciążenia $-\pi < \vartheta < 0$ moment ma war-



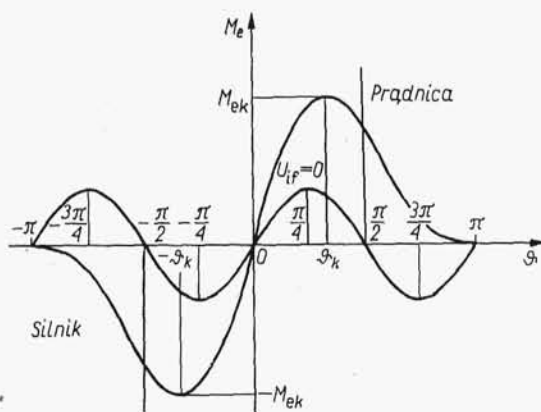
Rys. 7.21. Charakterystyka kątowa maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi

tość ujemną, maszyna pracuje jako silnik. Przy kącie obciążenia $\vartheta = \pm \pi/2$ powstaje w maszynie moment maksymalny, czyli krytyczny $\pm M_{ek}$. Kątom $-\frac{\pi}{2} < \vartheta < +\frac{\pi}{2}$ odpowiada zakres pracy stabilnej. Dla zachowania odpowiedniej przeciążalności momentem

$$\frac{M_{ek}}{M_{eN}} \approx 2$$

kąt obciążenia znamionowy wynosi zwykle $\vartheta_N \approx \pi/6$. Moment krytyczny i przeciążalność są proporcjonalne do napięcia indukowanego od strumienia wzbudzenia U_{if} , czyli zwiększają się ze wzrostem prądu wzbudzenia.

Wyrażenie na moment elektromagnetyczny maszyny synchronicznej z biegunami wydajnymi, zgodnie ze wzorem (7.184) składa się z dwóch członów. Pierwszy z nich, identyczny z wyrażeniem na moment maszyny z biegunami utajonymi, oznacza *moment od wzbudzenia*. Drugi z tych członów, niezależny od wzbudzenia maszyny, a więc występujący także przy $U_{if} = 0$, jak na rys. 7.22, nazywa się *momentem reluktancyjnym*. Przy większych prądach wzbudzenia jest odpowiednio mniejszy wpływ momentu reluktancyjnego. W maszynie synchronicznej z biegunami wydajnymi moment krytyczny jest większy niż w maszynie z biegunami utajonymi, a kąt obciążenia krytyczny $\vartheta_k < \pi/2$.

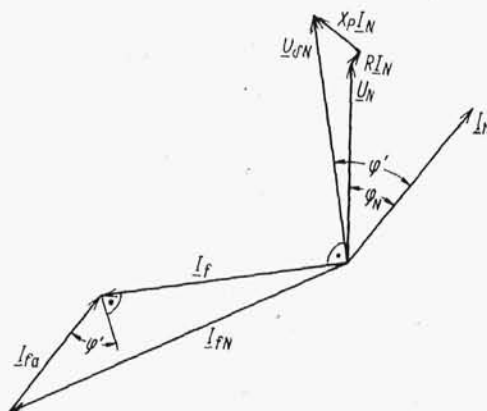


Rys. 7.22. Charakterystyki kątowe maszyny synchronicznej z biegunami wydatnymi

Zjawisko powstawania momentu reluktancyjnego wyzyskuje się w tzw. *silnikach reluktancyjnych*, w których celowo zwiększa się różnicę między X_d i X_q przez zastosowanie w osiach d i q materiałów o różnych permeancjach (np. żelaza i aluminium).

7.8.8. Prąd wzbudzenia znamionowy

Prąd wzbudzenia znamionowy może być wyznaczony pomiarowo w warunkach pracy znamionowej maszyny. Bardzo często jest to trudne do osiągnięcia. W tym przypadku można wyznaczyć prąd wzbudzenia znamionowy np. z odpowiedniego wykresu wektorowego maszyny w stanie nasyconym. Dla maszyny z biegunami utajonymi jednym z takich wykresów jest *wykres Potiera*. Dane jest napięcie znamionowe U_N , prąd znamionowy I_N , kąt fazowy znamionowy φ_N , rezystancja uzwojenia fazowego twornika R oraz reakcja Potiera X_P (z trójkąta Potiera opisanego w p. 7.8.6). Buduje się wykres wektorowy i otrzymuje się napięcie szczelinowe znamionowe $U_{\delta N}$.



Rys. 7.23. Wykres pomocniczy do wyjaśnienia wykresu Potiera

7.8.9. Praca równoległa prądnic synchronicznych

7.8.9.1. Wiadomości ogólne

Prądnice synchroniczne pracujące równolegle, to znaczy prądnice których uzwojenia twornika dołączone do wspólnych szyn zbiorczych są ze sobą związane wspólną bramą twornika. Zmiany parametrów odpowiadających dwóm pozostałym bramom jednej z prądnic (zmiana napięcia i prądu wzbudzenia, zmiana momentu obrotowego i prędkości kątowej) powodują zmiany parametrów bramy twornika nie tylko tej prądnicy, ale także prądnicy drugiej. Jest to przypadek ogólny pracy równoległej prądnic. Rozważanie takiego przypadku pracy równoległej wymaga rozwiązywania skomplikowanego układu równań dla stanów nieustalonych.

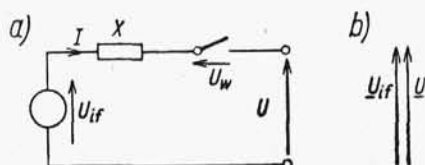
Znacznie prostszym przypadkiem jest praca równoległa prądnicy synchronicznej z siecią sztywną. Sieć sztywna (sieć o niezmienniej wartości napięcia skutecznego i niezmienniej częstotliwości oraz o wartości impedancji równej zero) może być w rozważaniach zastąpiona przez prądnicę o nieskończenie wielkiej mocy. W takim przypadku, niezależnie od zmian parametrów na bramie wzbudzenia i na bramie wału rozpatrywanej prądnicy, na zaciskach jej twornika jest napięcie o stałej wartości skutecznej i stałej częstotliwości. Zamiast rozpatrywać stany nieustalone można w takim przypadku rozpatrywać stany quasi-stacjonarne.

7.8.9.2. Synchronizacja

Obwód złożony z prądnicy synchronicznej i z sieci sztywnej przedstawiono na rys. 7.25. Łącznik między prądnicą i siecią powinien być zamknięty w chwili, kiedy potencjały obu jego biegunów są jednakowe. Wtedy po zamknięciu łącznika przez uzwojenie prądnicy nie płynie prąd, napięcie indukowane na reaktancji synchronicznej X jest równe zero, więc napięcie indukowane w prądnicy od strumienia wzbudzenia jest równe napięciu sieci, czyli $U_{if} = U$ (rys. 7.25b). W ogólnym przypadku napięcia te mogą mieć różne amplitudy i częstotliwości, a ponadto mogą być przesunięte względem siebie o kąt ϑ .

Dla układu trójfazowego warunki uzyskania jednakowych potencjałów na obu biegunach łącznika wynikają z następujących równań:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{2} U_{if} \sin(2\pi f_2 t + \vartheta) - \sqrt{2} U \sin(2\pi f_1 t) &= 0 \\ \sqrt{2} U_{if} \sin(2\pi f_2 t + \vartheta - \varepsilon) - \sqrt{2} U \sin(2\pi f_1 t - \varepsilon) &= 0 \\ \sqrt{2} U_{if} \sin(2\pi f_2 t + \vartheta + \varepsilon) - \sqrt{2} U \sin(2\pi f_1 t + \varepsilon) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.190)$$



Rys. 7.25. Prądnica i sieć sztywna: a) układ połączeń; b) wykres wektorowy dla stanu idealnego zsynchronizowania