

9. STAN ASYNCHRONICZNY MASZyny SYNCHRONICZNEJ

9.1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

Stan asynchroniczny maszyny synchronicznej może wystąpić przy pracy maszyny synchronicznej bez wzbudzenia, jak np. w przypadku utraty wzbudzenia przez prądnicę synchroniczną współpracującą z systemem energetycznym. W takim stanie prądnica jest wzbudzana od strony stojana, pobierając moc bierną indukcyjną z sieci, jak maszyna indukcyjna. Zwarte obwody wirnika prądnicy spełniają wtedy rolę klatki wirnika maszyny indukcyjnej. Pojawienie się składowej biernej prądu stojana powoduje wzrost prądu stojana i zwiększenie strat w uzwojeniu stojana. W stanie pracy asynchronicznej maszyny synchronicznej nie występują straty w uzwojeniu wzbudzającym, zwartym zwykle w tym stanie przez rezystancję o wartości równej około $4R_f$. Pojawiają się natomiast straty w obwodach zwartych wirnika. Straty te mają niebezpiecznie duże wartości, zwłaszcza w miejscach niestałej styczności, np. w miejscach styczności klinów z kołpakiem. W turbogeneratorach wielkiej mocy uzwojenia wzbudzające są najczęściej chłodzone bezpośrednio, tzn. medium chłodzące omywa bezpośrednio miedź uzwojenia wzbudzającego. Przy takim sposobie chłodzenia bardzo intensywnie jest odprowadzane ciepło od miedzi uzwojenia wzbudzającego, ale mało intensywnie — ciepło wydzielone w obwodach zamkniętych wirnika. Pobór mocy biernej przez prądnicę może spowodować nadmierne obniżenie się napięcia w punkcie przyłączenia prądnicy do sieci. Wszystkie te przyczyny powodują ograniczenie dopuszczalnego obciążenia prądnicy w stanie pracy asynchronicznej. Przykładowo dla turbogeneratorów o mocach znamionowych $165 \div 300$ MW można przy pracy asynchronicznej dopuścić obciążenie mocą czynną do 40% mocy znamionowej i prądem stojana do 110% prądu znamionowego przez 15 minut.

9.2. CHARAKTERYSTYKI CZĘSTOTLIWOŚCIOWE

9.2.1. Zależności podstawowe

Charakterystyki częstotliwościowe są przydatne do rozwiązywania niektórych zagadnień dotyczących maszyn indukcyjnych i synchronicznych, np. do wyznaczania

niektórych parametrów podprzebiegowych maszyny synchronicznej na podstawie pomiarów parametrów maszyny nieruchomej.

W maszynie synchronicznej wirującej synchronicznie (tj. przy wartości względnej prędkości kątowej $\omega = \omega_s = 1$) poślizg $s = (\omega - \omega_s)/\omega_s = 0$, obwody wirnika nie są przecinane strumieniem (wirującym) stojana. Podobnie obwody wirnika nie są przecinane strumieniem (nieruchomym w przestrzeni) stojana w maszynie z nieruchomym wirnikiem (czyli przy $\omega = 0$, $s = 1$) i z uzwojeniem stojana zasilonym jednofazowo prądem stałym. Prędkości kątowej ω w modelu wirującym odpowiada poślizg s w modelu nieruchomym.

Podobnie jak w przypadku maszyn indukcyjnych (np. w p. 8.3) można w rozważaniach nad maszyną synchroniczną zamiast operatora s stosować operator $j\omega$. Wtedy zamiast transmitancją operatorową $G(s)$ można się posługiwać transmitancją widmową $G(j\omega)$. Przy wymuszeniu zespolonym \underline{X} oraz odpowiedzi zespolonej \underline{Y} transmitancją widmowa

$$G(j\omega) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\underline{Y}}{\underline{X}} \quad (9.1)$$

Między transmitancją widmową i transmitancją operatorową zachodzi zależność

$$G(j\omega) = G(s)|_{s=j\omega} \quad (9.2)$$

Transmitancja widmowa jest wielkością zespoloną, więc

$$G(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (9.3)$$

przy czym

$$\begin{aligned} P(\omega) &= \operatorname{Re}[G(j\omega)] \\ Q(\omega) &= \operatorname{Im}[G(j\omega)] \end{aligned} \quad (9.4)$$

Wyrażenie na transmitancję widmową jako stosunek zespolonego licznika do zespolonego mianownika można napisać w postaci

$$\left. \begin{aligned} G(j\omega) &= \frac{L(j\omega)}{M(j\omega)} \\ L(j\omega) &= \sum_{l=0}^m b_l(j\omega)^l \\ M(j\omega) &= \sum_{k=0}^m a_k(j\omega)^k \end{aligned} \right\} \quad (9.5)$$

W wyrażeniach $L(j\omega)$ i $M(j\omega)$ można wyodrębnić części rzeczywiste i urojone, więc

$$G(j\omega) = \frac{L(j\omega)}{M(j\omega)} = \frac{P_1(\omega) + jQ_1(\omega)}{P_2(\omega) + jQ_2(\omega)} \quad (9.6)$$

przy czym $P_1(\omega)$, $P_2(\omega)$ są funkcjami parzystymi, a $Q_1(\omega)$, $Q_2(\omega)$ są funkcjami nieparzystymi pulsacji, czyli

$$\left. \begin{aligned} P_1(\omega) &= P_1(-\omega) \\ P_2(\omega) &= P_2(-\omega) \\ Q_1(\omega) &= -Q_1(-\omega) \\ Q_2(\omega) &= -Q_2(-\omega) \end{aligned} \right\} \quad (9.7)$$

W wyrażeniu (9.2) na transmitancję widmową część rzeczywista jest funkcją parzystą, więc

$$\begin{aligned} P(\omega) &= \operatorname{Re}[G(j\omega)] \\ P(\omega) &= P(-\omega) \end{aligned}$$

a część urojona jest funkcją nieparzystą, więc

$$\begin{aligned} Q(\omega) &= \operatorname{Im}[G(j\omega)] \\ Q(\omega) &= -Q(-\omega) \end{aligned}$$

Wyrażenie na transmitancję widmową można napisać w postaci

$$G(j\omega) = |G(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)} \quad (9.8)$$

przy czym moduł transmitancji widmowej

$$|G(j\omega)| = \sqrt{[P(\omega)]^2 + [Q(\omega)]^2} \quad (9.9)$$

a argument transmitancji widmowej

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \quad (9.10)$$

Charakterystyka częstotliwościowa amplitudowa jest to zależność modułu transmitancji widmowej od pulsacji, czyli zależność $|G(j\omega)| = f(\omega)$.

Charakterystyka częstotliwościowa fazowa jest to zależność argumentu transmitancji widmowej od pulsacji, czyli zależność $\varphi(\omega) = f(\omega)$.

Charakterystyka częstotliwościowa amplitudowo-fazowa jest to zależność części urojonej transmitancji widmowej od części rzeczywistej transmitancji widmowej, czyli zależność $Q(\omega) = f[P(\omega)]$.

Przy zmianie pulsacji ω zmienia się wartość modułu transmitancji widmowej i wartość jej argumentu, a wykres funkcji $Q(\omega) = f[P(\omega)]$, czyli wykres charakterystyki częstotliwościowej amplitudowo-fazowej, jest krzywą. Wektor łączący początek układu współrzędnych z punktem na tej krzywej jest *transmitancją widmową* przy danej pulsacji. Długość tego wektora oznacza moduł transmitancji, a kąt od osi $P(\omega)$ do wektora oznacza argument transmitancji widmowej.

Wymuszenie ma często postać funkcji skokowej mającej w ogólnym przypadku postać

$$x(t) = k \mathbf{1}(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t < a \\ k & \text{dla } t > a \end{cases} \quad (9.11)$$

której szczególnym przypadkiem jest funkcja jednostkowa

$$\varepsilon(t) = 1(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t < 0 \\ 1 & \text{dla } t > 0 \end{cases} \quad (9.12)$$

Charakterystyką skokową $h(t)$ nazywa się odpowiedź układu na wymuszenie w postaci jednostkowej funkcji skokowej przy zerowych warunkach początkowych. Można wykazać, że między charakterystyką skokową $h(t)$ a transmitancją $g(t)$ będącą funkcją czasu

$$g(t) = \frac{y(t)}{x(t)}$$

przy czym: $y(t)$ – odpowiedź będąca funkcją czasu; $x(t)$ – wymuszenie będące funkcją czasu;

zachodzi zależność

$$g(t) = \frac{dh(t)}{dt} = h'(t) \quad \text{przy } h(0) = 0 \quad (9.13)$$

Transformata funkcji skokowej ma postać

$$X(s) = k \frac{1}{s} \quad (9.14)$$

a transformata odpowiedzi na wymuszenie skokowe zwana *operatorową charakterystyką skokową* ma postać

$$H(s) = \frac{1}{s} G(s) \quad (9.15)$$

Analogicznie, posługując się transmitancją widmową $G(j\omega)$, otrzymuje się odpowiedź widmową na wymuszenie skokowe, zwaną *widmową charakterystyką skokową*

$$H(j\omega) = \frac{G(j\omega)}{j\omega} = \frac{P(\omega) + jQ(\omega)}{j\omega} \quad (9.16)$$

przy czym

$$H(j\omega) = \int_0^{\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt \quad (9.17)$$

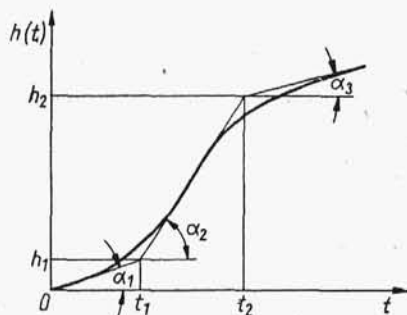
Między transmitancją widmową $G(j\omega)$ a transmitancją $g(t)$ będącą funkcją czasu zachodzi zależność

$$G(j\omega) = \int_0^{\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt \quad (9.18)$$

Na podstawie wzorów (9.13) i (9.18) otrzymuje się

$$G(j\omega) = \int_0^{\infty} h'(t) e^{-j\omega t} dt \quad (9.19)$$

Znając przebieg charakterystyki skokowej $h(t)$, według wzoru (9.19) można wyznaczyć przebieg transmitancji widmowej $G(j\omega) = f(\omega)$ oraz charakterystyk częstotliwościowych: amplitudowej $|G(j\omega)| = f(\omega)$, fazowej $\varphi(\omega) = f(\omega)$ oraz amplitudowo-fazowej $Q(\omega) = f[P(\omega)]$.



Rys. 9.1. Przykładowy przebieg charakterystyki skokowej

Przykładowy przebieg charakterystyki skokowej pokazano na rys. 9.1. Krzywą $h(t)$ aproksymuje się linią łamaną. Oznacza się

$$\beta_k = \operatorname{tg} \alpha_k = \frac{h_k - h_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} \quad (9.20)$$

przy czym $k = 1, 2, 3, \dots$ numer kolejnego odcinka łamanej.

W przybliżeniu można przyjąć, że dla każdego odcinka łamanej

$$\beta_k = h'(t)_k \quad (9.21)$$

Wtedy na podstawie wzorów (9.19) i (9.21) otrzymuje się przybliżoną zależność

$$G(j\omega) = \sum_{k=1}^n \beta_k \int_{t_{k-1}}^{t_k} e^{-j\omega t} dt \quad (9.22)$$

czyli

$$G(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{j\beta_k}{\omega} (e^{-j\omega t_k} - e^{-j\omega t_{k-1}}) \quad (9.23)$$

Ponieważ

$$e^{-j\omega t_k} = \cos \omega t_k - j \sin \omega t_k$$

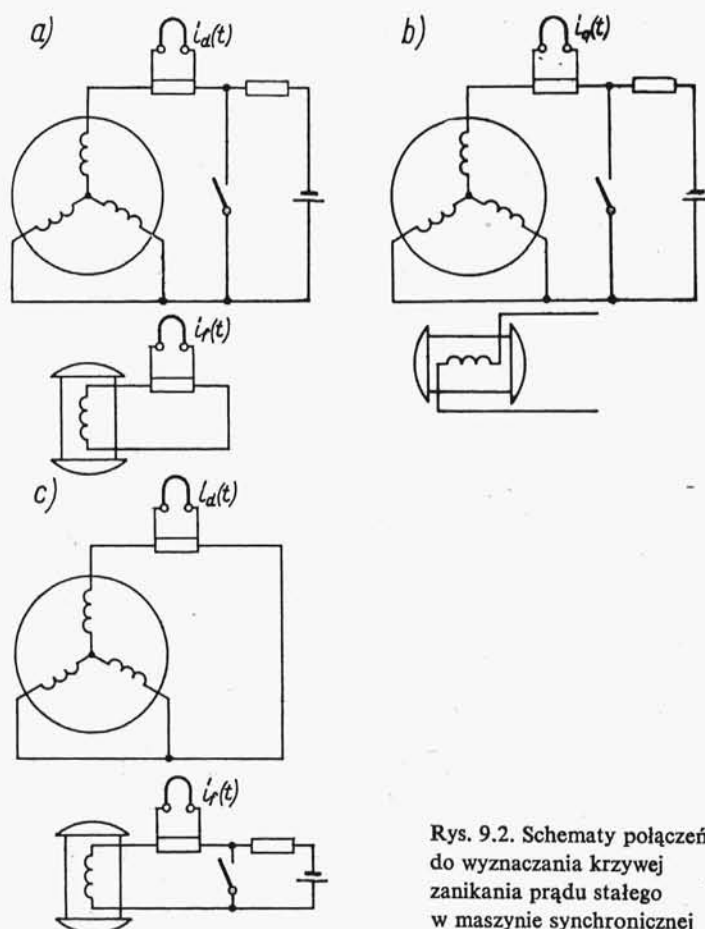
więc

$$\left. \begin{aligned} P(\omega) &= \operatorname{Re} [G(j\omega)] = \sum_{k=1}^n \frac{\beta_k}{\omega} (\sin \omega t_k - \sin \omega t_{k-1}) \\ Q(\omega) &= \operatorname{Im} [G(j\omega)] = \sum_{k=1}^n \frac{\beta_k}{\omega} (\cos \omega t_k - \cos \omega t_{k-1}) \end{aligned} \right\} \quad (9.24)$$

Wzory (9.24) pozwalają wyznaczyć w sposób przybliżony transmitancję widmową na podstawie znanego przebiegu charakterystyki skokowej. Korzystanie z tych wzorów wymaga jednak skomplikowanych obliczeń. Dlatego w praktyce wyznacza się charakterystykę częstotliwościową najczęściej w sposób prostszy, odpowiedni do danego przypadku.

9.2.2. Wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych i reaktancji na podstawie krzywej zanikania prądu stałego

Bardzo często charakterystykę częstotliwościową maszyny synchronicznej wyznacza się na podstawie przebiegu krzywej zanikania prądu stałego w uzwojeniu maszyny w jednym z układów połączeń pokazanych na rys. 9.2. W układach tych ze źródła napięcia stałego zasila się odpowiednio połączone uzwojenia twornika albo uzwojenia wzbudzające przy ustawieniu poprzecznym albo podłużnym wirnika. Przez



Rys. 9.2. Schematy połączeń do wyznaczania krzywej zanikania prądu stałego w maszynie synchronicznej

zamknięcie łącznika powoduje się zwarcie odpowiedniego obwodu uzwojenia wzbudzającego i zanikanie prądu stałego w tym obwodzie. Poślizg s w maszynie nieruchomej odpowiada pulsacji ω w maszynie wirującej, więc z czasowego przebiegu charakterystyki skokowej można zgodnie ze wzorem (9.23) wyznaczyć transmitancję $G(js)$ odpowiadającą transmitancji widmowej $G(j\omega)$. Te transmitancje nazywa się często *transmitancjami operatorowymi*. Poszczególnym transmitancjom operatorowym odpowiadają reaktancje operatorowe $X(js)$ uzyskane z krzywych zanikania prądu stałego:

$X_d(js)$ – z pomiaru zanikania prądu stałego $i_d(t)$ w uzwojeniu stojana przy podłużnym ustawieniu wirnika i zwartym uzwojeniu wzbudzającym (rys. 9.2a);

$X_q(js)$ – z pomiaru zanikania prądu stałego $i_q(t)$ w uzwojeniu stojana przy poprzecznym ustawieniu wirnika i otwartym uzwojeniu wzbudzającym (rys. 9.2b);

$X_f(js)$ – z pomiaru zanikania prądu stałego $i_f(t)$ w uzwojeniu wzbudzającym przy podłużnym ustawieniu wirnika i zwartym uzwojeniu stojana (rys. 9.2c).

Pomiar zanikania prądu stałego w innych układach połączeń pozwala na wyznaczenie innych reaktancji. Przykładowo zostanie omówiony sposób wyznaczania reaktancji operatorowej $X_d(js)$ z pomiaru według rys. 9.2a.

W zapisie symbolicznym, czyli widmowym, równania równowagi napięć (maszyny nieruchomej zasilanej napięciem sinusoidalnym) mają postać

$$\left. \begin{aligned} U_d(j\omega) &= RI_d(j\omega) + jX_d(j\omega) I_d(j\omega) \\ U_q(j\omega) &= RI_q(j\omega) + jX_q(j\omega) I_q(j\omega) \end{aligned} \right\} \quad (9.25)$$

W powyższym zapisie przyjęto konwencję odbiornikową, gdyż maszyna podczas pomiarów jest obiektem zasilanym.

Napięcie doprowadzone do maszyny może być traktowane jako wymuszenie a prąd jako odpowiedź. Wtedy transmitancja widmowa podłużna i poprzeczna są określone wzorami

$$\left. \begin{aligned} G_d(j\omega) &= \frac{I_d(j\omega)}{U_d(j\omega)} = \frac{1}{R + jX_d(j\omega)} \\ G_q(j\omega) &= \frac{I_q(j\omega)}{U_q(j\omega)} = \frac{1}{R + jX_q(j\omega)} \end{aligned} \right\} \quad (9.26)$$

Przy wymuszeniu napięciowym skokowym jednostkowym, skokowa jednostkowa charakterystyka częstotliwościowa, zwana wprost charakterystyką częstotliwościową (widmową, operatorową), jest określona następująco:

$$\left. \begin{aligned} I_d(j\omega) &= U_d(j\omega) G_d(j\omega) = \frac{j}{R + jX_d(j\omega)} \\ I_q(j\omega) &= U_q(j\omega) G_q(j\omega) = \frac{j}{R + jX_q(j\omega)} \end{aligned} \right\} \quad (9.27)$$

We wzorze tym przyjęto, że napięcie wyprzedza odpowiedni prąd o $\pi/2$, czyli jednostkowe napięcie wynosi $j \cdot 1$. Przy $R = 0$ otrzymuje się odpowiednio uproszczone charakterystyki częstotliwościowe

$$\left. \begin{aligned} I_{0d}(j\omega) &= \frac{1}{X_d(j\omega)} \\ I_{0q}(j\omega) &= \frac{1}{X_q(j\omega)} \end{aligned} \right\} \quad (9.28)$$

Rzeczywista maszyna synchroniczna ma więcej niż jeden (teoretycznie nieskończenie wiele) obwód tłumiący. Dlatego prąd zanikający w obwodzie stojana w układzie jak na rys. 9.2a jest sumą wielu składowych (np. n składowych), zanikających wykładniczo, więc

$$i_d(t) = \sum_{l=1}^n i_{dl} e^{-\alpha_{dl} t} \quad (9.29)$$

Jeśli przyjąć, że i_{dl} oznacza wartość względną początkową l -tej składowej prądu w stosunku do całkowitego prądu początkowego, to

$$\sum_{l=1}^n i_{dl} = 1 \quad (9.30)$$

Przyjmując, że napięcie doprowadzone do uzwojenia przed zamknięciem łącznika miało wartość jednostkową, otrzymuje się

$$\sum_{l=1}^n i_{dl} = \frac{1}{R} \quad (9.31)$$

Przy układzie połączeń jak na rys. 9.2a

$$R = \frac{3}{2} R_l$$

przy czym R_l – rezystancja uzwojenia fazowego stojana.

Ponieważ funkcji

$$y(t) = e^{-\alpha t}$$

odpowiada transformata

$$Y(s) = \frac{1}{\alpha + s}$$

zatem wyrażeniu (9.29) odpowiada charakterystyka częstotliwościowa

$$I_d(js) = \sum_{l=1}^n i_{dl} \frac{1}{\alpha_{dl} + js} \quad (9.32)$$

Pamiętając, że przy stosowaniu wartości względnych można ogólnie przyjąć

$$\alpha = \frac{1}{T} = \frac{R}{L} = \frac{R}{X}$$

zanikanie prądu w obwodzie uzwojenia stojana można opisać funkcją

$$I_d(js) = I_d(0) \frac{X_d(js)}{R + js X_d(js)} \quad (9.33)$$

Ponieważ $I_d(0) = 1/R$, więc

$$I_d(js) = \frac{1}{R} \cdot \frac{X_d(js)}{R + js X_d(js)} \quad (9.34)$$

albo

$$I_d(js) = \left[\frac{1}{R} - \frac{1}{R + js X_d(js)} \right] \frac{1}{js} \quad (9.35)$$

Ze wzoru (9.34) wynika

$$X_d(js) = \frac{R^2 I_d(js)}{1 - js R I_d(js)} \quad (9.36)$$

Na podstawie wzorów (9.28) i (9.36) otrzymuje się

$$I_{od}(js) = \frac{1}{X_d(js)} = \frac{1}{R} \left[\frac{1}{R I_d(js)} - js \right]$$

a po wykorzystaniu wzoru (9.32)

$$I_{od}(js) = \frac{1}{X_d(js)} = \frac{1}{R} \left[\frac{1}{R \sum_{i=1}^n \frac{i_{d1}}{\alpha_{d1} + js}} - js \right] \quad (9.37)$$

Z charakterystyki $I_{od}(js)$ określonej wzorem (9.37) można przejść do charakterystyki $I_d(js)$ określonej wzorem (9.27), ponieważ na podstawie wzorów (9.27) i (9.28) można otrzymać zależność

$$I_d(js) = \frac{I_{od}(js)}{1 - js R I_{od}(js)} \quad (9.38)$$

Wykonywanie obliczeń według wzoru (9.37) jest kłopotliwe. Prostsze wyniki otrzymuje się przez wprowadzenie pojęcia *pośredniej charakterystyki częstotliwościowej*

$$I_{sd}(js) = \frac{js}{R + js X_d(js)} = \frac{j}{\frac{R}{s} + j X_d(js)} \quad (9.39)$$

Na podstawie wzoru (9.35) można napisać wyrażenie na transformatę pochodnej funkcji czasu

$$\mathcal{L} \frac{di_d}{dt} = - \frac{1}{R + js X_d(js)} \quad (9.40)$$

a na podstawie wzoru (9.29)

$$\mathcal{L} \frac{di_d}{dt} = \mathcal{L} \sum_{i=1}^n (-\alpha_{d1} i_{d1} e^{-\alpha_{d1} t}) = - \sum_{i=1}^n \alpha_{d1} i_{d1} \frac{1}{\alpha_{d1} + js} \quad (9.41)$$

Z porównania wzorów (9.39) i (9.40) wynika

$$I_{sd}(js) = -js \mathcal{L} \frac{di_d}{dt} \quad (9.42)$$

a z porównania wzorów (9.41) i (9.42)

$$I_{sd}(js) = \sum_{l=1}^n i_{dl} \alpha_{dl} \frac{js}{\alpha_{dl} + js} \quad (9.43)$$

albo

$$I_{sd}(js) = s^2 \sum_{l=1}^n \frac{i_{dl} \alpha_{dl}}{\alpha_{dl}^2 + s^2} + js \sum_{l=1}^n \frac{i_{dl} \alpha_{dl}^2}{\alpha_{dl}^2 + s^2} \quad (9.44)$$

Na podstawie wzorów (9.28) i (9.39) związek pomiędzy charakterystyką $I_{0d}(js)$ i charakterystyką $I_{sd}(js)$ może być zapisany w postaci

$$I_{0d}(js) = \frac{I_{sd}(js)}{1 - \frac{R}{js} I_{sd}(js)} \quad (9.45)$$

Reaktancję synchroniczną X_d , czyli $X_d(js)$, w stanie ustalonym (przy $t = \infty$, czyli $s = 0$) można wyznaczyć ze wzoru (9.37)

$$X_d = X_d(j0) = R^2 \sum_{l=1}^n \frac{i_{dl}}{\alpha_{dl}} \quad (9.46)$$

Na podstawie wzorów (9.39) i (9.43) dla $s \rightarrow \infty$ otrzymuje się wyrażenie na reaktancję podprześciową

$$X_d'' = X_d(j\infty) = \frac{1}{\sum_{l=1}^n i_{dl} \alpha_{dl}} \quad (9.47)$$

Charakterystyki częstotliwościowe mogą być doprowadzone do postaci dogodnej dla obliczeń. Wprowadza się oznaczenia

$$\left. \begin{aligned} a &= \sum_{l=1}^n \frac{i_{dl} \alpha_{dl}}{\alpha_{dl}^2 + s^2} \\ b &= \sum_{l=1}^n \frac{i_{dl} \alpha_{dl}^2}{\alpha_{dl}^2 + s^2} \end{aligned} \right\} \quad (9.48)$$

Wtedy wzór (9.44) przybiera postać

$$I_{sd}(js) = s^2 a + jsb \quad (9.49)$$

Ze wzorów (9.45) i (9.49) otrzymuje się

$$I_{0d}(js) = \frac{s^2 a}{s^2 R^2 a^2 + (1 - Rb)^2} + j \frac{s(b - Rb^2) - s^3 R a^2}{s^2 R^2 a^2 + (1 - Rb)^2} \quad (9.50)$$

Po wprowadzeniu oznaczeń

$$\begin{aligned} A &= \frac{s^2 a}{s^2 R^2 a^2 + (1 - Rb)^2} \\ B &= \frac{s(b - Rb)^2 - s^3 R a^2}{s^2 R^2 a^2 + (1 - Rb)^2} \end{aligned} \quad (9.51)$$

otrzymuje się uproszczoną postać wyrażenia na charakterystykę częstotliwościową

$$I_{0d}(js) = A + jB \quad (9.52)$$

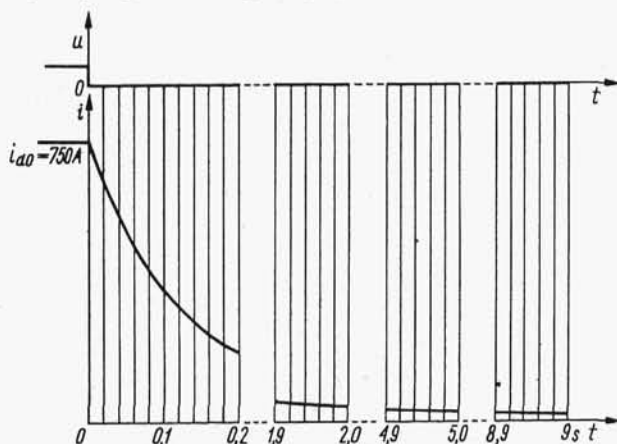
Wzór (9.52) może być stosowany przy badaniu dużych maszyn synchronicznych (np. w turbogeneratorach), w których rezystancja uzwojenia fazowego nie ma wpływu na wartość prądu, a wpływa tylko na tłumienie prądów swobodnych. Przy badaniu maszyn małych należy korzystać z dokładniejszego wzoru, który po uwzględnieniu wzoru (9.52) w zależności (9.38) przybiera postać

$$I_d(js) = C + jD \quad (9.53)$$

przy czym

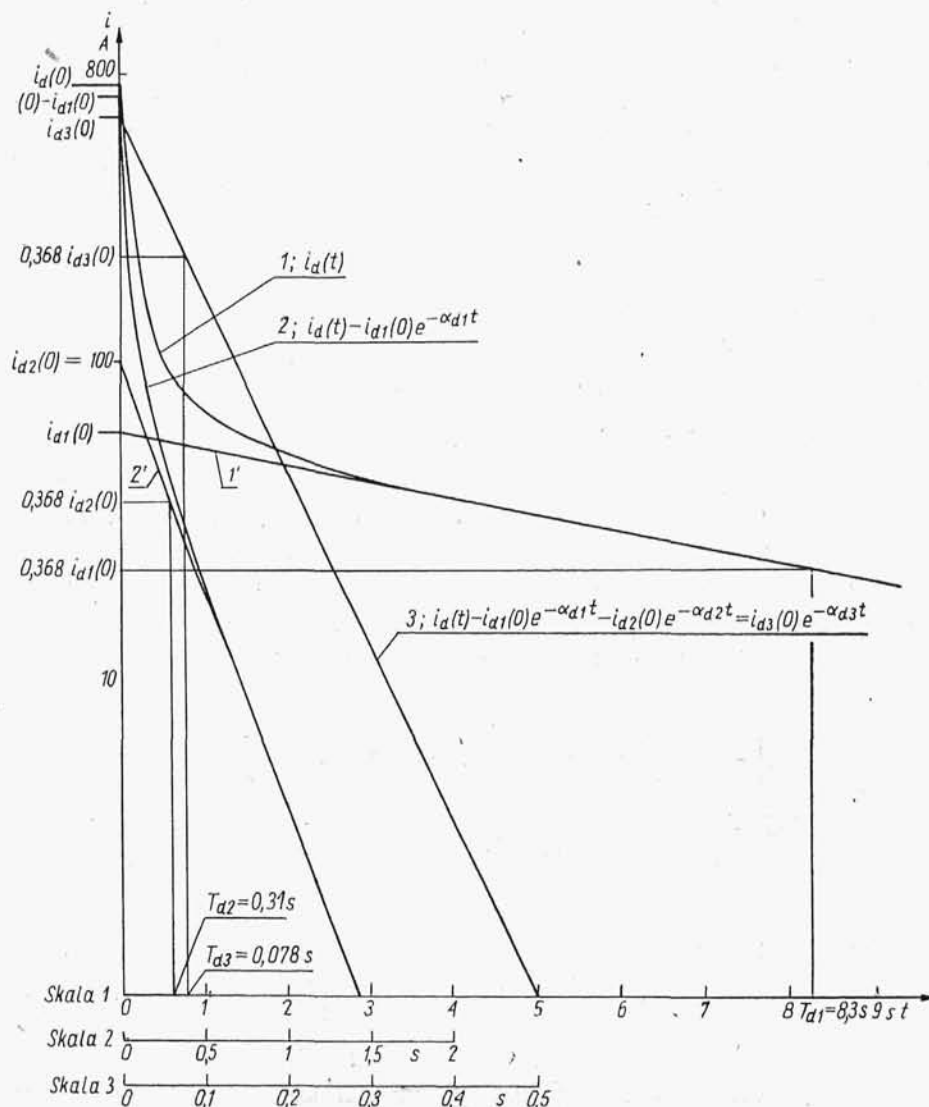
$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{A}{R^2 A^2 + (1 + RB)^2} \\ D &= \frac{R(A^2 + B^2) + B}{R^2 A^2 + (1 + RB)^2} \end{aligned} \right\} \quad (9.54)$$

W celu wyznaczenia charakterystyki częstotliwościowej w osi podłużnej maszyny wykonuje się pomiary w układzie połączeń według rys. 9.2a. Zamyka się łącznik zwierający uzwojenie twornika i za pomocą oscylografu wyznacza się krzywą zanikania prądu $i_d(t)$ oraz $i_f(t)$. Krzywą zanikania prądu $i_d(t)$ pokazano na rys. 9.3, a rozkład tej krzywej na siatce półlogarytmicznej na składowe wykładnicze pokazano



Rys. 9.3. Krzywa zanikania prądu stałego w uzwojeniu stojana przy ustawieniu wirnika w osi podłużnej

na rys. 9.4. Wszystkie wielkości wyrażane są w wartościach względnych z opuszczeniem indeksu rel. Po przyjęciu wartości względnej doprowadzonego napięcia za 1, wartość względna początkowa prądu wynosi $1/R_{rel}$. Wartość względna rezystancji wynosi $R_{rel} = R/Z_N$, przy czym $R = 3R_{ph}/2$; R_{ph} – rezystancja uzwojenia fazowego; $Z_N = U_{Nph}/I_{Nph}$; U_{Nph} – napięcie fazowe znamionowe; I_{Nph} – prąd fazowy znamionowy; czas względny (synchroniczny) $\tau = \omega_s t = 314 s^{-1}$. Na rysunku 9.4 czas podano w sekundach.



Rys. 9.4. Rozkład krzywej zanikania prądu w uzwojeniu stojana na składowe wykładnicze

Krzywa 1 oznacza prąd $i_d(t)$ wyrażony wzorem (9.29). Prowadzi się styczną 1' do końcowej części krzywej 1 i w ten sposób otrzymuje się początkową wartość $i_{d1}(0)$ oraz stałą czasową T_{d1} . Kreśli się krzywą 2 oznaczającą przebieg

$$i_d(t) - i_{d1}(0) e^{-\alpha_{d1} t}$$

oraz prowadzi się styczną 2' do końcowej części tej krzywej i w ten sposób otrzymuje się wartość początkową $i_{d2}(0)$ oraz stałą czasową T_{d2} . Kreśli się krzywą 3 oznaczającą przebieg

$$i_d(t) - i_{d1}(0) e^{-\alpha_{d1} t} - i_{d2}(0) e^{-\alpha_{d2} t} = i_{d3}(0) e^{-\alpha_{d3} t}$$

Można uznać, że ta krzywa jest już prostą. Odpowiednio otrzymuje się $i_{d3}(0)$ oraz stałą czasową T_{d3} . Na rysunku 9.4 stałe czasowe podano w sekundach, więc współczynniki tłumienia oblicza się według wzoru

$$\alpha_{d1} = \frac{1}{\omega_s T_{d1}} \quad (9.55)$$

Reaktancję podłużną synchroniczną X_d oblicza się według wzoru (9.46), a reaktancję podłużną podprzejściową X_d'' — według wzoru (9.47).

Na podstawie wzoru (9.28) wyznacza się uproszczoną charakterystykę częstotliwościową

$$I_{0d}(js) = \frac{1}{X_d(js)}$$

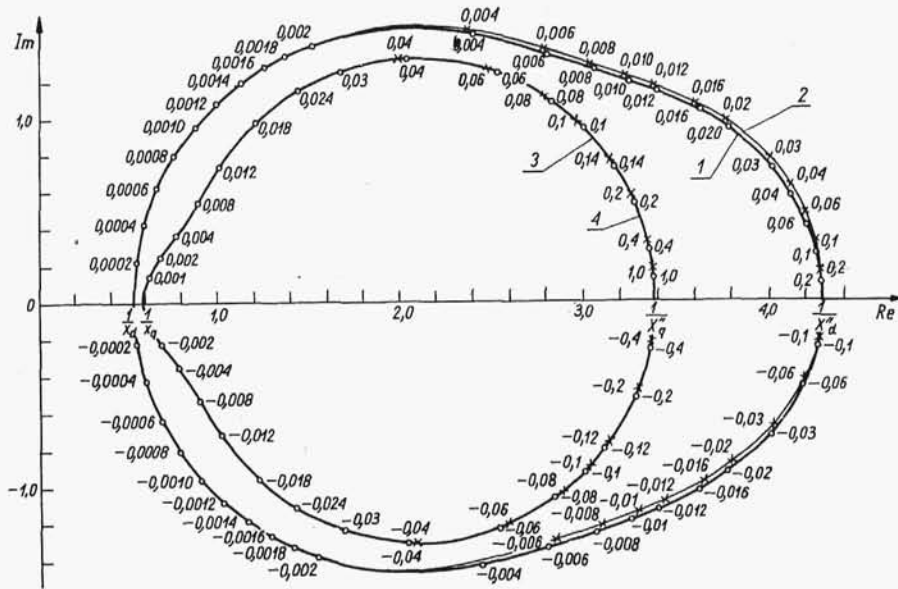
przebiegającą jak krzywa 1 na rys. 9.5, a na podstawie wzoru (9.27) charakterystykę częstotliwościową

$$I_d(js) = \frac{j}{R + jX_d(js)}$$

przebiegającą jak krzywa 2 na rys. 9.5.

Często na stykach łącznika zwierającego uzwojenie stojana występuje spadek napięcia, na skutek czego prąd w uzwojeniu stojana nie maleje do zera, ale do pewnej wartości ustalonej i_{du} . Wtedy na poszczególne składowe należy rozkładać różnicę prądów $i_d(t) - i_{du}$.

Opisana metoda statyczna wyznaczania reaktancji i charakterystyk częstotliwościowych jest obciążona błędem. Przyczynami tych błędów są między innymi różnice w rozkładzie strumieni rozproszonych i strat w maszynie nieruchomej (w stanie statycznym) i w maszynie wirującej. W metodzie statycznej wyższe harmoniczne przestrzenne napięcia magnetycznego są nieruchome względem harmonicznej podstawowej, a w maszynie o wirniku wirującym wyższe harmoniczne wirują z odpowiednimi prędkościami względem harmonicznej podstawowej. Na skutek tego indukcyjność rozproszenia wirnika jest w maszynie nieruchomej odpowiednio większa niż w maszynie wirującej. Różnica reaktancji rozproszenia jest największa przy $s = 0$, czyli przy wyznaczeniu reaktancji synchronicznej, ale reaktancja rozproszenia jest mała w porównaniu z reaktancją synchroniczną, więc i błąd przy



Rys. 9.5. Charakterystyki częstotliwościowe turbogeneratora 200 MW

wyznaczaniu reaktancji synchronicznej jest niewielki. Podobnie niewielki jest błąd spowodowany różnicą w rozkładzie strat. Błąd spowodowany różnicą stanu nasycenia obwodów magnetycznych można zmniejszyć przez dobranie takiej wartości prądu wzbudzenia, przy którym nasycenie w stanie statycznym jest zbliżone do nasycenia znamionowego i przez zastosowanie odpowiednich oporników spowodować, że po zamknięciu łącznika zwierającego następuje stosunkowo niewielki wzrost prądu stałego.

Z powodu błędów popełnianych przy wyznaczaniu wartości prądów z oscylogramu powyższa metoda pozwala na wyodrębnienie praktycznie nie więcej niż trzech składowych prądu.

Analogicznie na podstawie analizy krzywej zanikania prądu $i_q(t)$ wyznaczonej w układzie połączeń jak na rys. 9.2 otrzymuje się charakterystyki częstotliwościowe $I_{0q}(js)$ i $I_q(js)$ w osi poprzecznej, praktycznie pokrywające się, jak krzywe 3 i 4 na rys. 9.5 oraz wyznacza się:

- reaktancję poprzeczną widmową (operatorową)

$$X_q(js) = \frac{R^2 I_q(js)}{1 - js R_d(js)} \quad (9.56)$$

- reaktancję poprzeczną podprześciową

$$X_q'' = X_q(j\infty) = \frac{1}{\sum_{l=1}^n i_{q1} \alpha_{ql}} \quad (9.57)$$

- reaktancję poprzeczną synchroniczną

$$X_q = X_q(j0) = R^2 \sum_{l=1}^n \frac{i_{dl}}{\alpha_{dl}} \quad (9.58)$$

Na podstawie analizy krzywej zanikania prądu $i_f(t)$ wyznaczonej w układzie połączeń według rys. 9.2 wyznacza się:

- reaktancję wzbudzenia widmową (operatorową)

$$X_f(js) = \frac{R_f^2 I_f(js)}{1 - js R_f I_f(js)} \quad (9.59)$$

- reaktancję wzbudzenia podprzejściową

$$X_f'' = X_f(j\infty) = \frac{1}{\sum_{l=1}^n i_{fl} \alpha_{fl}} \quad (9.60)$$

- reaktancję wzbudzenia synchroniczną

$$X_f = X_f(j\infty) = R_f^2 \sum_{l=1}^n \frac{i_{fl}}{\alpha_{fl}} \quad (9.61)$$

W osi poprzecznej maszyny może być o jeden obwód zwarty (obwód tłumienia) mniej niż w osi podłużnej, więc w prądzie $i_q(t)$ może być o jedną składową mniej niż w prądach $i_d(t)$ oraz $i_f(t)$.

9.3. MOMENT I MOC W STANIE ASYNCHRONICZNYM

Z charakterystyki częstotliwościowej można wyznaczyć odpowiadające każdemu poślizgowi prądy podłużne i poprzeczne, a na tej podstawie wyznaczyć moc i moment odpowiadające każdemu poślizgowi. Często jednak stosuje się metodę uproszczoną. Moment wypadkowy M (albo moc wypadkowa P) może być traktowany jako suma momentu synchronicznego M_s (albo mocy synchronicznej P_s) istniejącego dzięki wzbudzeniu i momentu asynchronicznego M_{as} (albo mocy asynchronicznej P_{as}) istniejącego dzięki obwodom zamkniętym w wirniku. Stąd

$$\left. \begin{aligned} M &= M_s + M_{as} \\ P &= P_s + P_{as} \end{aligned} \right\} \quad (9.62)$$

Przyjmując, że $s > 0$ przy $\omega > \omega_s$, otrzymuje się związek między wartościami względnymi momentu i mocy

$$M = \frac{P}{1+s} \quad (9.63)$$

Dla uproszczenia zakłada się, że maszyna jest symetryczna, czyli że zjawiska w osiach d i q przebiegają identycznie. Przy poślizgu stałym lub wolno zmieniającym się moc

asynchroniczna może być wyrażona jak moc maszyny asynchronicznej przy danej, każdorazowo stałej, wartości poślizgu

$$P_{as} = \frac{U^2 R_s}{R^2 + (X_s)^2} = M_{as} \quad (9.64)$$

przy czym: R, X – parametry maszyny synchronicznej przy pracy asynchronicznej. Ze wzoru (9.64) otrzymuje się

$$M_{as} = \frac{U^2 s \frac{X}{R}}{X \left[1 + \left(\frac{X}{R} s \right)^2 \right]} \quad (9.65)$$

Można przyjąć, że przy niewielkich wartościach poślizgu prąd wywołujący moment asynchroniczny odpowiada składowej przejściowej prądu twornika maszyny synchronicznej, czyli reaktancja

$$X = \frac{X'_d X_d}{X_d - X'_d} \quad (9.66)$$

a stała czasowa

$$T'_d = \frac{X}{R} \quad (9.67)$$

więc

$$M_{as} = \frac{U^2 (X_d - X'_d)}{X_d X'_d} \cdot \frac{s T'_d}{1 + (s T'_d)^2} \quad (9.68)$$

Przy małych poślizgach można przyjąć w przybliżeniu

$$M_{as} = P_{as} = \frac{U^2 (X_d - X'_d)}{X_d X'_d} s T'_d \quad (9.69)$$

Moc bierna synchroniczna

$$Q_{as} = \frac{U^2 X_s^2}{R^2 + (sX)^2} \quad (9.70)$$

skąd po podstawieniu wzorów (9.66) i (9.67) otrzymuje się

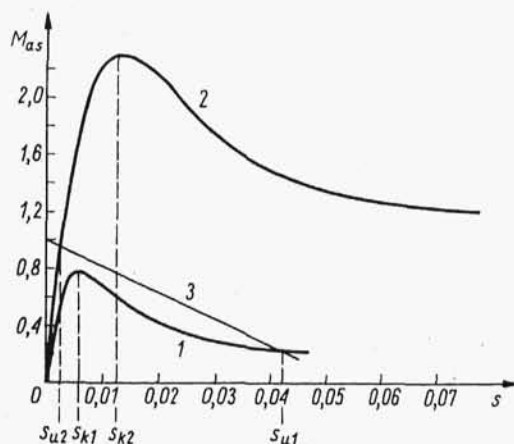
$$Q_{as} = \frac{U^2 (X_d - X'_d)}{X_d X'_d} \cdot \frac{s^2 T'^2_d}{1 + (s T'_d)^2} \quad (9.71)$$

Ponieważ $\vartheta = s\tau$, więc moc synchroniczna (mająca charakter pulsujący)

$$P_s = \frac{U_f U}{X_d} \sin s\tau \quad (9.72)$$

Na rysunku 9.6 przedstawiono przebiegi momentów asynchronicznych M_{as} turbogeneratorów w funkcji poślizgu. Krzywa momentu asynchronicznego turbogeneratora dużej mocy (krzywa 1) z powodu dużych wartości względnych reaktancji

przebiega znacznie niżej, niż krzywa momentu asynchronicznego turbogeneratora małego (krzywa 2), mającego reaktancję o stosunkowo małych wartościach względnych. Prosta 3 oznacza charakterystykę statyczną turbiny. Ustalony stan pracy



Rys. 9.6. Przebiegi momentów asynchronicznych turbogeneratorów w funkcji poślizgu

1 — turbogenerator dużej mocy z chłodzeniem bezpośrednim,
2 — turbogenerator małej mocy z chłodzeniem pośrednim, 3 — charakterystyka statyczna turbiny

asynchronicznej (przy otwartym obwodzie wirnika) w turbogeneratorze bardzo dużej mocy może nastąpić przy stosunkowo dużym poślizgu (np. rzędu $0,04 \div 0,05$) oraz przy małej wartości momentu (np. $0,2 \div 0,3$ momentu znamionowego).