

WŁADYSŁAW PASZEK, TADEUSZ GLINKA, ADAM RÓŻYCKI,
RYSZARD RUT, ZYGMUNT RÓŻEWICZ, ZDZISŁAW JANSON

Katedra Technologii i Metrologii Elektrycznej

BADANIE CHARAKTERYSTYK MASZYN ELEKTRYCZNYCH

Streszczenie. Podano przegląd prac Katedry Maszyn Elektrycznych obejmujący zakres problematyki związanej z badaniami charakterystyk maszyn elektrycznych.

Przykładowo omówiono: wyniki badań maszyn synchronicznych i prądu stałego za pomocą charakterystyk częstotliwościowych, sposoby wykrywania uszkodzonych kłatek silników asynchronicznych oraz metodę badania zjawisk cieplnych za pomocą analogów elektrycznych.

Spis publikacji pracowników Katedry z tej dziedziny stanowi uzupełnienie artykułu.

1. Wstęp

Szybki rozwój automatyzacji procesów przemysłowych w latach powojennych spowodował konieczność badania zjawisk nieustalonych i procesów regulacyjnych maszyn elektrycznych i ich wyposażenia.

Nastąpiło rozszerzenie zakresu zainteresowań użytkowników maszyn poza dotychczas potrzebne charakterystyki statyczne typowe dla normalnych ustalonych warunków pracy.

Przy badaniu zjawisk nieustalonych i własności dynamicznych maszyn elektrycznych jest konieczna analiza związków fizykalno-matematycznych opisujących proces, pomiarowe wyznaczenie parametrów i pomiarowe sprawdzenie wyników analizy. Zespół pracowników Katedry Maszyn Elektrycznych brał aktywny udział w roz-

woju badań zjawisk i własności dynamicznych maszyn elektrycznych oraz ich układów regulacyjnych charakterystycznym dla powojennej elektrotechniki światowej.

Katedra Maszyn Elektrycznych podejmowała prace w zakresie badania charakterystyk maszyn i transformatorów, które w późniejszym czasokresie były często kontynuowane i rozwijane przez Energopomiar i powstałe instytuty resortowe.

Przy współpracy z energetyką wykonano szereg pionierskich prac w następujących dziedzinach:

- a) regulacji wzbudzenia generatorów synchronicznych ze szczególnym uwzględnieniem budowy nowoczesnych regulatorów napięcia bez strefy nieczułości, które wyparły dawne regulatory elektromechaniczne,
- b) specjalnych przypadków pracy generatorów synchronicznych (samosynchronizacji turbo i hydrogeneratorów, pracy asynchronicznej turbogeneratorów, obciążalności niesymetrycznej turbogeneratorów),
- c) automatyzacji hydroelektrowni,
- d) usprawnienia układu zasilania potrzeb własnych elektrowni (samoczynnego załączania silników na rezerwowe źródła zasilania SZR),
- e) stabilności statycznej i dynamicznej generatorów w szczególności przy niedowzbudzeniu,
- f) wyznaczania podstawowych parametrów elektromagnetycznych generatorów synchronicznych, których znajomość jest konieczna dla nastawy układów regulacji, układów zabezpieczeń i dla analizy zakłóceń systemu energetycznego.

Przy współpracy z przemysłem maszyn elektrycznych Katedry Maszyn Elektrycznych prowadziła badania stanów nieustalonych prze-

biegów regulacyjnych wzmacniaczy elektromaszynowych, zjawisk komutacyjnych w maszynach prądu stałego, badania materiałów szczołkowych, badania niestabilnych przebiegów cieplnych w maszynach elektrycznych i transformatorach oraz badania zwarciowych sił dynamicznych działających na uzwojenia maszyn elektrycznych. Na uwagę zasługuje metoda wykrywania pękniętych prętów klatek w silnikach asynchronicznych, przydatna do wykorzystania w zakładach naprawczych maszyn elektrycznych oraz badania dielektryczne procesów starzenia izolacji w maszynach elektrycznych i transformatorach. Doświadczenia katedry w dziedzinie nienormalnych przypadków pracy i uszkodzeń maszyn elektrycznych przedstawiono w książkowym opracowaniu zawierającym bogaty materiał dokumentacyjny i ilustracyjny.

2. Określenie charakterystyk częstotliwościowych maszyny synchronicznej na podstawie pomiarów maszyny przy wirującej magneśnicy

Pomiary charakterystyk częstotliwościowych maszyny synchronicznej przy nieruchomej magneśnicy dają możliwość wyznaczenia reaktancji operatorowych maszyny zarówno w osi d jak i q .

Wykonanie pomiarów w oparciu o powyższe metody dla dużych maszyn napotyka jednak na poważne trudności. Dla generatorów mocy 200 MW źródło prądu stałego oraz aparatura łączeniowa musi być wymiarowana na prąd rzędu 3000 A. Przygotowanie takiego pomiaru jest skomplikowane i kosztowne.

Parametry generatora w osi d można wyznaczyć na podstawie pomiaru charakterystyki częstotliwościowej generatora przy wirującej magneśnicy. Pomiar przeprowadza się w stanie biegu jałowego oraz w stanie zwarcia symetrycznego maszyny.

Sinusoidalne modulowanie napięcia wzbudzenia maszyny wymusza się poprzez układ regulacji wzbudzenia. Składowa przemienna,

nałożona na dowolną stałą wartość napięcia wzbudzenia, może mieć niewielką amplitudę.

Z operatorowych równań maszyny synchronicznej w stanie biegu jałowego przy pominięciu napięcia transformacji:

$$U_q(p) = G(p) U_w(p),$$

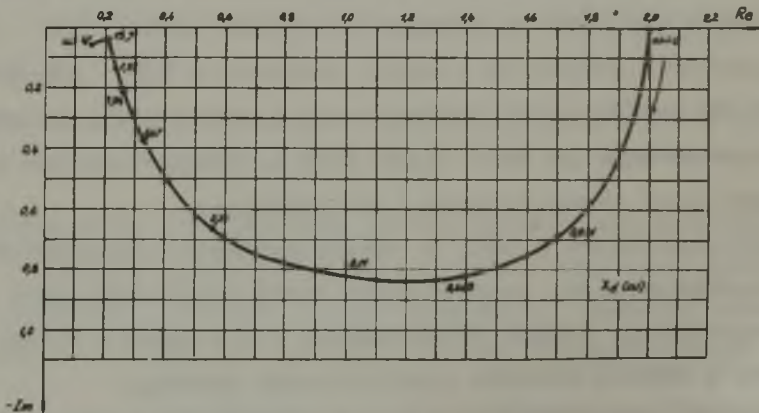
a w stanie zwarcia

$$0 = -X_d(p) I_d(p) + G(p) U_w(p),$$

wynika, że na podstawie pomiaru stosunku amplitud i przesunięcia fazowego wymuszonych oscylacji modulowanego napięcia generatora, prądu generatora oraz napięcia wzbudzenia można wyznaczyć funkcje:

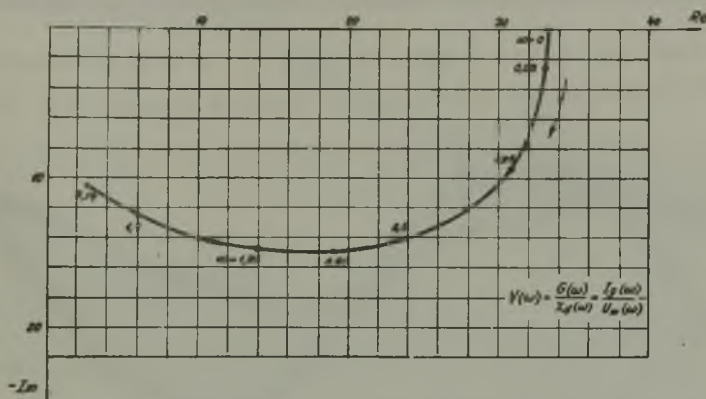
$$G(\omega) \quad \text{oraz} \quad V(\omega) = \frac{G(\omega)}{X_d(\omega)}$$

Z charakterystyk $G(\omega)$ i $V(\omega)$ można wyznaczyć charakterystykę częstotliwościową reaktancji $X_d(\omega)$ (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Charakterystyka częstotliwościowa reaktancji $X_d(\omega)$ turbogeneratora TGW 25 (25 MW)

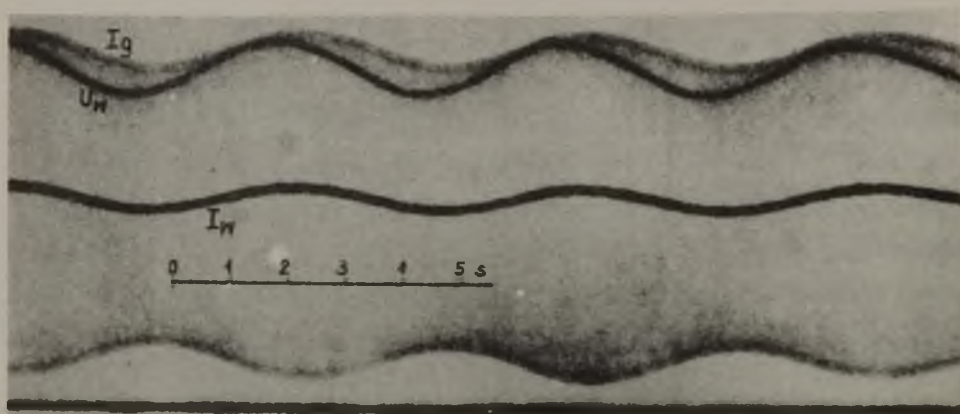
Na rys. 2.2. przedstawiono wyznaczoną eksperymentalnie charakterystykę $V(\omega)$. Pomiar przeprowadzono na generatorze 120 MW. Oscylacje napięcia wzbudzenia o częstotliwości od 0,02÷0,5 Hz wymuszono zasilając układ regulacji wzbudzenia z generatora RC o mocy wyjściowej 2,5 W. Przebiegi prądu twornika i napięcia wzbudzenia mierzono oscylograficznie. Na rys. 2.3 przedstawiono oscylogram prądu stojana i wirnika generatora oraz napięcia wzbudzenia przy wymuszaniu oscylacji o częstotliwości 0,2 Hz.



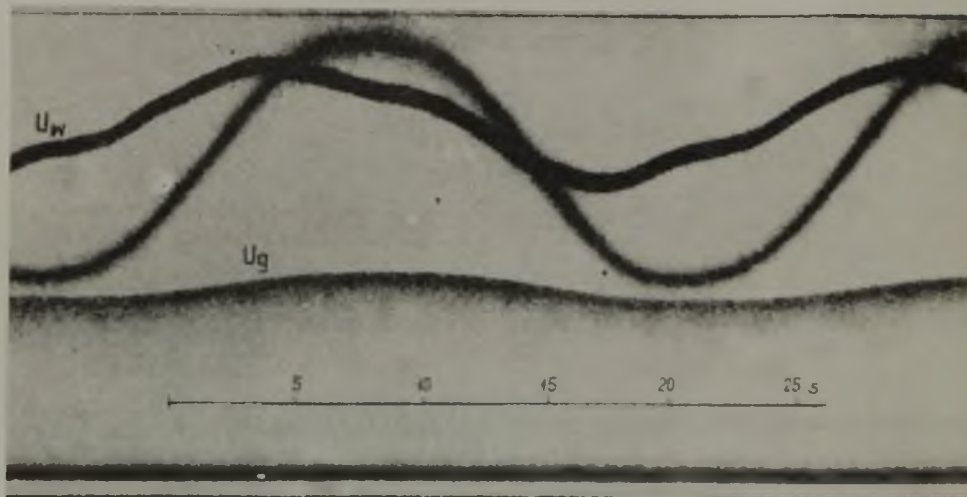
Rys. 2.2. Charakterystyka częstotliwościowa $V(\omega)$ generatora 120 MW

Wymuszenie oscylacji małej częstotliwości na ogół nie przedstawia trudności. Trudności mogą wystąpić przy analizie wyników pomiaru jeśli układ regulacji zawiera nieliniowości. Na rys. 2.4. przedstawiono przykładowo oscylogram napięcia wzbudzenia i napięcia generatora przy wymuszaniu oscylacji o częstotliwości 0,04 Hz.

Nieliniowości zawarte w układzie regulacji są przyczyną poważnego odkształcenia sinusoidalnych drgań. Przy odpowiednio większej mocy generatora małej częstotliwości można zmniejszyć wpływ źródła nieliniowości przez wprowadzenie sygnałów modulujących do końcowych stopni wzmocnienia kaskady regulatora.



Rys. 2.3. Przebiegi prądu twornika (I_g) i napięcia wzbudzenia (U_w) przy wymuszaniu oscylacji o częstotliwości 0,2 Hz



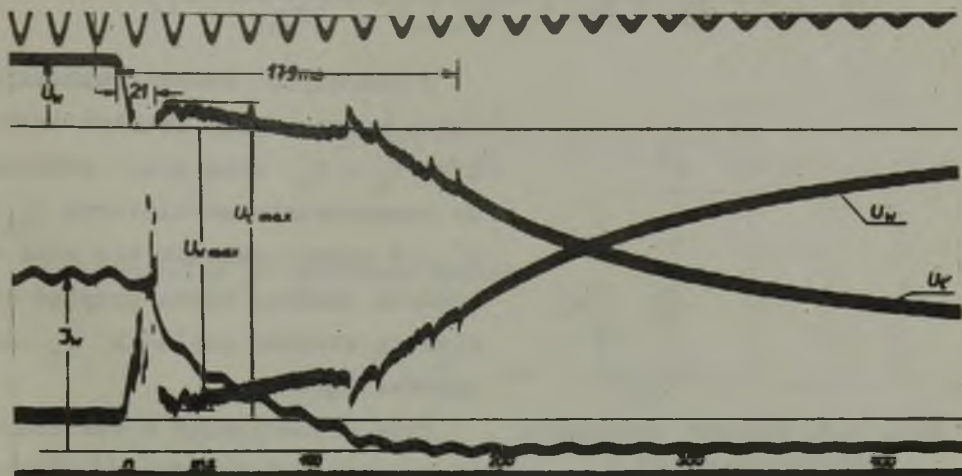
Rys. 2.4. Przebiegi napięcia twornika (U_g) i napięcia wzbudzenia (U_w) przy wymuszaniu oscylacji o częstotliwości 0,04 Hz

3. Przebiegi nieustalone przy pospiesznym łukowym odwzbudzaniu generatorów synchronicznych dużej mocy

Łukowy układ odwzbudzania opiera się na zasadzie pochłaniania przez łuk w komorze wyłącznika odwzbudzenia energii pola magnetycznego maszyny.

Wykonano oscylograficzne pomiary prądów i napięć przy odzwubdzaniu generatora 200 MW za pomocą łukowego układu pospiesznego odzwubdzania.

Oscylogram przebiegu napięcia i prądu łuku w wyłączniku przy odzwubdzaniu ze zwarcia symetrycznego na zaciskach generatora przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Oscylogram przebiegów napięcia i prądu łuku przy odzwubdzaniu ze zwarcia symetrycznego

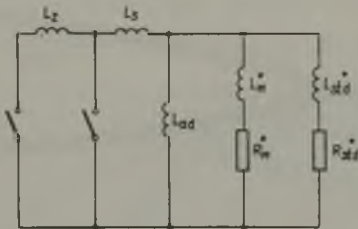
Dla przeprowadzenia analizy przyjęto schemat zastępczy generatora z dwoma obwodami magneśnicy: jednym o dużej stałej czasowej i drugim o małej stałej czasowej. Stanowiło to duże ułatwienie w stosunku do dokładniejszego odwzorowania generatora przez przyjęcie trzech bądź jeszcze bardziej złożonych obwodów magneśnicy. Nie spowodowało to istotnych różnic w otrzymanych wynikach.

Na rys. 3.2 przedstawiono schemat zastępczy generatora w osi d uzyskany przy wyznaczeniu parametrów generatora potrzebnych do określenia przebiegów prądów i napięć przy odzwubdzaniu. Wartości stałych czasowych przejściowej T'_{do} i podprzej-

ściowej T''_{do} w osi d przy otwartym tworniku wynikają z równań:

$$T'_{do} T''_{do} = \frac{L_{ad} L_w + L_{ad} L_{std} + L_w L_{std}}{R_w R_{std}}$$

$$T'_{do} + T''_{do} = \frac{L_{ad} + L_w}{R_w} + \frac{L_{ad} + L_{std}}{R_{std}}$$



Rys. 3.2. Schemat zastępczy generatora w osi d

Z podobnych równań wynikają stałe czasowe przy zwartym tworniku T'_d i T''_d oraz przy zwarciu za transformatorem blokowym T'_{dz} i T''_{dz} . W czasie palenia się łuku w komorze łukowej można przyjąć odciwkową stałość napięcia U_λ na komorze łukowej.

Przy odzwzbudzaniu w warunkach biegu jałowego w czasie palenia łuku otrzymano:

$$I_w(t) = I_{wo} \left\{ 1 - \frac{U_\lambda}{U_{wo}} + \frac{U_\lambda}{U_{wo}} \left[\frac{T'_{do} - T_{tdo}}{T'_{do} - T''_{do}} \exp\left(-\frac{t}{T'_{do}}\right) + \frac{T_{tdo} - T''_{do}}{T'_{do} - T''_{do}} \exp\left(-\frac{t}{T''_{do}}\right) \right] \right\}$$

gdzie:

I_{wo} , U_{wo} - oznaczają wartości początkowe prądu i napięcia wzbudzenia.

Przy odzwzbudzeniu ze stanu zwarcia na zaciskach generatora lub za reaktancją transformatora blokowego obowiązuje analogiczne

równanie po zamianie odpowiednio: T'_d albo T'_{dz} w miejsce T'_{do} ; T_{td} albo T_{tdz} w miejsce T_{tdo} ; T''_d albo T''_{dz} w miejsce T''_{do} . Prąd twornika przy odzwyczajaniu w stanie zwarcia symetrycznego w czasie palenia się łuku:

$$I_g(t) = I_{go} \left\{ 1 - \frac{U_z}{U_{wo}} + \frac{U_z}{U_{wo}} \left[\frac{T'_d - T_{std}}{T'_d - T''_d} \exp\left(-\frac{t}{T'_d}\right) + \frac{T_{std} - T''_d}{T'_d - T''_d} \exp\left(-\frac{t}{T''_d}\right) \right] \right\}$$

Prąd twornika po zgaśnięciu łuku:

$$I_g(t) = I'_{go} \exp\left(-\frac{t - t_z}{T_{td}}\right)$$

gdzie:

I_{go} - oznacza prąd twornika dla $t = t_z$.

Po podstawieniu odpowiednich reaktancji i stałych czasowych można określić przebieg prądu przy zwarciu symetrycznym za dowolną reaktancją.

Napięcie generatora w stanie biegu jałowego U_g do chwili zgaśnięcia łuku:

$$U_g(t) = U_{go} \left\{ 1 - \frac{U_z}{U_{wo}} + \frac{U_z}{U_{wo}} \left[\frac{T'_{do} - T_{std}}{T'_{do} - T''_{do}} \exp\left(-\frac{t}{T'_{do}}\right) + \frac{T_{std} - T''_{do}}{T'_{do} - T''_{do}} \exp\left(-\frac{t}{T''_{do}}\right) \right] \right\}$$

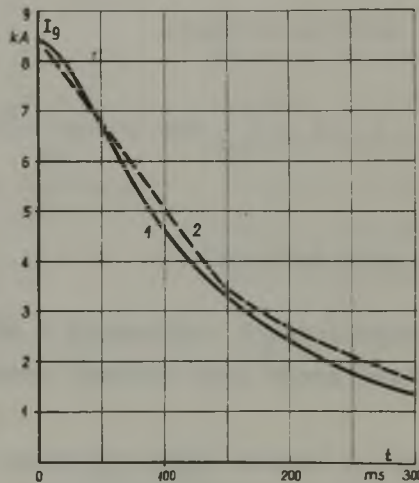
Napięcie generatora po zgaśnięciu łuku:

$$U_g(t) = U'_{go} \exp\left(-\frac{t - t_k}{T_{tdo}}\right)$$

gdzie:

U'_{go} - napięcie generatora po czasie $t = t_k$:

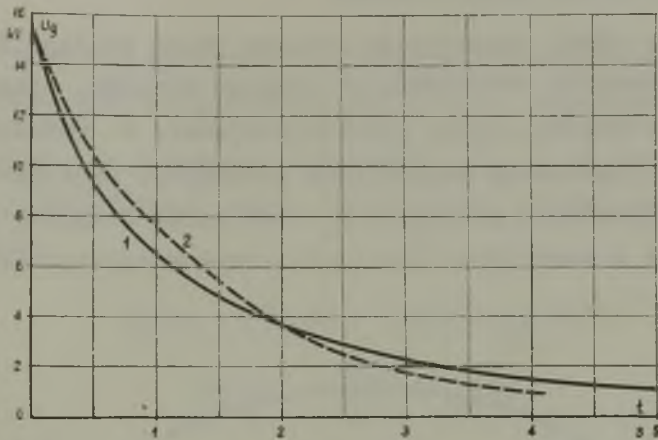
Z równań tych wynika wpływ rezystancji zastępczej obwodu klatki i obwodu prądów wirowych na przebieg napięcia generatora przy pospiesznym odzwbudowaniu.



Rys. 3.3. Porównanie rzeczywistego przebiegu prądu twornika przy odzwbudowaniu ze stanu zwarcia z przebiegiem wyznaczonym analitycznie

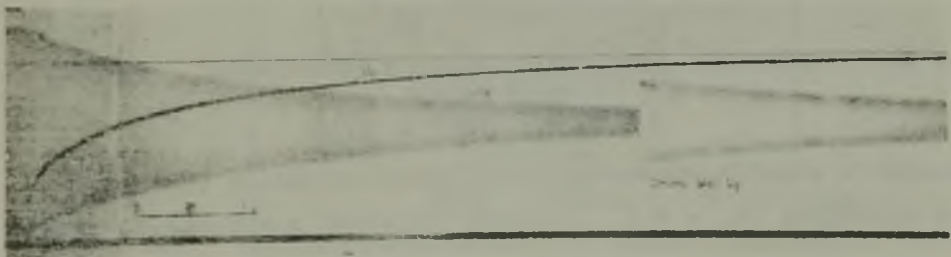
Na rys. 3.3. przedstawiono dla porównania rzeczywisty przebieg prądu stojana generatora przy odzwbudowaniu (1) i przebieg wyznaczony analitycznie (2), a na rys. 3.4 przedstawiono rzeczywisty przebieg napięcia stojana generatora (1) i przebieg wyznaczony analitycznie (2).

Z porównania danych i przebiegów stwierdzono, że zbliżność wyników pomiarów i obliczeń jest duża, a przyjęty schemat zastępczy generatora w osi d jest wystarczająco dokładny dla celów obliczeń przebiegów przy odzwbudzeniu.



Rys. 3.4. Porównanie rzeczywistego przebiegu napięcia twornika przy odzwbudzeniu ze stanu biegu jałowego z przebiegiem wyznaczonym analitycznie

Rys. 3.5. przedstawia oscylogram przebiegów przy konwencjonalnym odzwbudzeniu rezystancyjnym generatora 125 MW, polegającym na przełączeniu obwodu wzbudzenia generatora ze wzbudnicy do rezystancji gaszącej. Przeprowadzono analityczne wyzna-

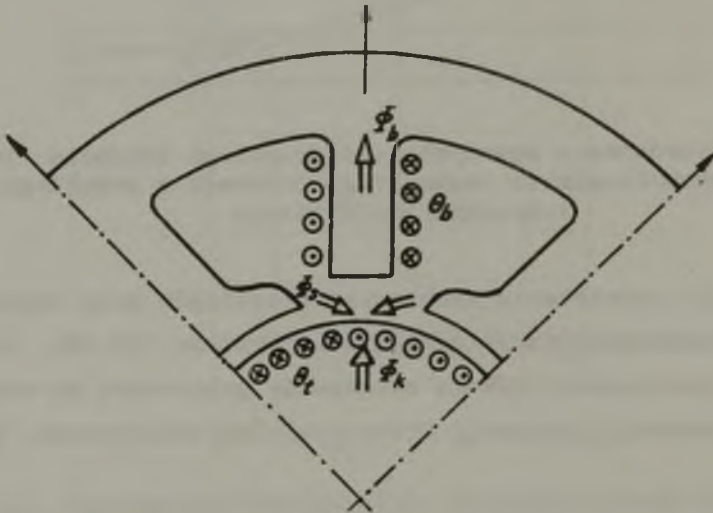


Rys. 3.5. Oscylogram przebiegów przy rezystancyjnym odzwbudzeniu generatora 125 MW ze stanu biegu jałowego

czenie przebiegów, przyjmując również schemat zastępczy generatora z dwoma obwodami magnesuicy i uzyskano wystarczająco dużą zbieżność wyników pomiarowych i analitycznych.

4. Charakterystyka częstotliwości poprzecznego obwodu magnetycznego maszyny prądu stałego

Poprzeczny obwód magnetyczny maszyny prądu stałego zbudowany jest z elementów pakietowanych (jarzmo wirnika, bieguny pomocnicze) i elementu litego (jarzmo stojana). W obwodzie tym działają dwa przeciwnie magnesujące przepływy, przepływ θ_t uzwojenia twornika oraz przepływ θ_b uzwojenia biegunów pomocniczych łącznie z przepływem uzwojenia kompensacyjnego (rys.4.1)



Rys. 4.1. Poprzeczny obwód magnetyczny rozpatrywanej maszyny prądu stałego

Strumień w strefie komutacyjnej ϕ_k jest określony przez przepływ wypadkowy ($\theta_b - \theta_t$). Wypadkowy strumień w strefie komuta-

cyjnej Φ_k jest sumą algebraiczną strumieni składowych Φ_b i Φ_s (rys. 4.1).

$$\Phi_k = \Phi_b - \Phi_s, \quad (4.1)$$

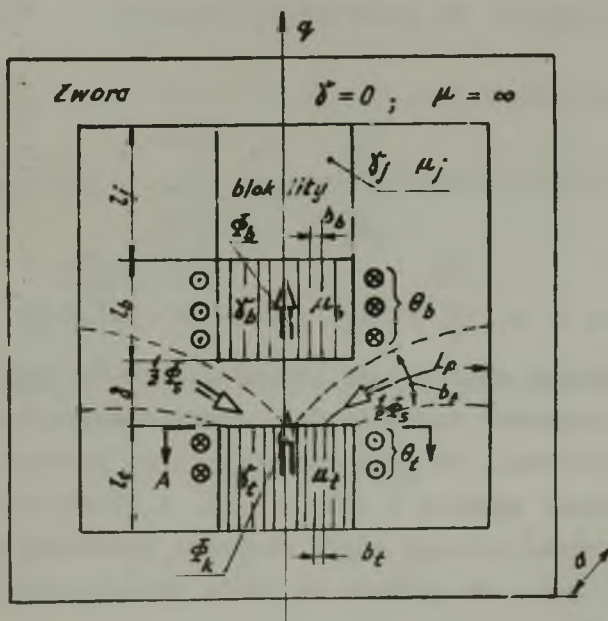
gdzie:

Φ_b - strumień sprzężony z przepływem wypadkowym,

Φ_s - strumień rozproszenia sprzężony z przepływem θ_t .

Równania dla strumieni składowych Φ_b i Φ_s wyznacza się w oparciu o przybliżony model poprzecznego obwodu magnetycznego (rys. 4.2).

$$\begin{aligned} \Phi_b(p) &= [\theta_b(p) - \theta_t(p)] \Lambda_{zb}(p), \\ \Phi_t(p) &= \theta_t(p) \Lambda_{zt}(p), \end{aligned} \quad (4.2)$$



Rys. 4.2. Model poprzecznego obwodu magnetycznego

gdzie:

$$\Lambda_{zt}(p) = \frac{1}{\Lambda_{\delta} + \Lambda_j(p) + \Lambda_b(p) + \Lambda_t(p)},$$

$$\Lambda_{zt}(p) = \frac{1}{\Lambda_s + \Lambda_t(p)},$$

gdzie:

$\Lambda_s, \Lambda_{\delta}$ - przewodności drogi magnetycznej w powietrzu

$\Lambda_j(p), \Lambda_b(p), \Lambda_t(p)$ - operatorowe przewodności magnetyczne jarzma stojana bieguna pomocniczego i jarzma wirnika.

Można przyjąć, że przewodności magnetyczne w powietrzu są stałe

$$\begin{aligned} \Lambda_{\delta} &= \mu_0 \frac{b}{\delta} \frac{a}{\delta}, \\ \Lambda_s &= \mu_0 \frac{2 b a}{l_r}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

Oznaczenia b, a, b_p, δ, l_p podano na rys. 4.2.

Przewodność magnetyczna litych elementów wynika z równań Maxwella opisujących wnikanie fali elektromagnetycznej do rdzenia. Przy założeniach, że pole w rdzeniu jest jednorodne jednoosiowe skierowane zgodnie z osią z (rys. 4.3) strumień przenikający przez rdzeń sprzęga się z obwodami wytwarzającymi przepływ $(\theta_b - \theta_t)$ oraz, że element ma stałą przenikalność magnetyczną

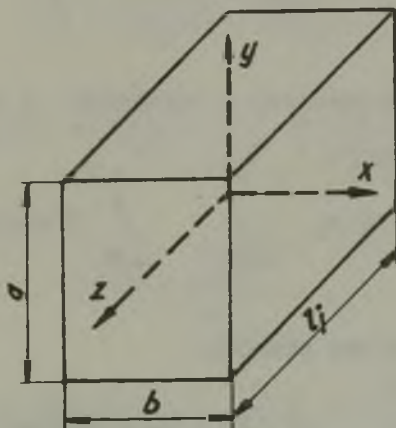
$$\mu_j = \text{const}$$

$$H_x = H_y = 0,$$

$$H_z = H$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} \neq 0, \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial H}{\partial y} \neq 0.$$



Rys. 4.3. Lity blok obwodu magnetycznego

Rozkład pola magnetycznego w rdzeniu opisuje równanie

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \mu_1 \mu_0 \gamma_1 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4.5)$$

Rozwiązanie równania (4.5) z uwzględnieniem warunków brzegowych

$$\text{dla} \quad x = \pm \frac{b}{2}, \quad H = H_0; \quad (4.6)$$

$$\text{dla} \quad y = \pm \frac{a}{2}, \quad H = H_0.$$

ma postać [57]

$$H(x, y, p) = H_0(p) \sum_{k=1,3,5}^4 \frac{4}{k\pi} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \left[\frac{\operatorname{ch} \frac{\xi}{2} x}{\operatorname{ch} \frac{\xi}{2} \frac{b}{2}} \cos k \frac{\pi}{a} y + \frac{\operatorname{ch} \frac{\eta}{2} y}{\operatorname{ch} \frac{\eta}{2} \frac{a}{2}} \cos k \frac{\pi}{b} x \right] \quad (4.7)$$

Strumień magnetyczny zawarty w przekroju a b rdzenia

$$\Phi(p) = \mu_j \mu_0 \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} H(x, y, p) dx dy \quad (4.8)$$

Przewodność operatorowa rdzenia

$$\Lambda_j(p) = \frac{\Phi(p)}{\Theta_b(p) - \Theta_t(p)} \quad (4.9)$$

Po przekształceniach równania (4.8) [57] otrzymuje się

$$\Lambda_j(p) = \frac{2(a+b)}{l_j} \sqrt{\frac{\mu_j \mu_0}{\gamma_j}} \frac{1}{\sqrt{p}} = C_j \frac{1}{\sqrt{p}} \quad (4.10)$$

Rozumując analogicznie można uzyskać równania przewodności magnetycznych pakietu wirnika i bieguna pomocniczego

$$\Lambda_t(p) = n_t \frac{a+b_t}{l_t} \sqrt{\frac{\mu_t \mu_0}{\gamma_t}} \frac{1}{\sqrt{p}} = C_t \frac{1}{\sqrt{p}} \quad (4.11)$$

$$\Lambda_b(p) = n_b \frac{a+b_b}{l_b} \sqrt{\frac{\mu_b \mu_0}{\gamma_b}} \frac{1}{\sqrt{p}} = C_b \frac{1}{\sqrt{p}} \quad (4.12)$$

n_t , n_b - liczba blach jarzma wirnika i bieguna pomocniczego.

Po podstawieniu (4.3) (4.11) (4.12) w równaniu (4.2) oraz przekształceniu uzyskuje się równania transmitancji strumieni składowych

$$K_b(p) = \frac{\phi_b(p)}{I(p)} = \Lambda_\delta(z_b - z_t) \left[\frac{1}{1 + \sqrt{pT_0}} + \left(\frac{z_t}{z_b - z_t} \frac{\Lambda_s}{\Lambda_\delta} \cdot \frac{\sqrt{pT_1}}{(1 + \sqrt{pT_0})(1 + \sqrt{pT_1})} \right) \right],$$

$$K_s(p) = \frac{\phi_s(p)}{I(p)} = \Lambda_s \frac{z_t}{1 + \sqrt{pT_1}}, \quad (4.13)$$

gdzie:

$$\sqrt{T_1} = \frac{\Lambda_s}{c_t},$$

$$\sqrt{T_0} = \Lambda_\delta \left(\frac{1}{c_j} + \frac{1}{c_b} + \frac{1}{c_t} \right); \quad z_t = \frac{\theta_t}{I},$$

W jednostkach względnych

$$\underline{K}_b(p) = \frac{K_b(p)}{K_b(p=0)} = \frac{1}{1 + \sqrt{T_0 p}} + \frac{a \sqrt{pT_1}}{(1 + \sqrt{pT_0})(1 + \sqrt{pT_1})} \quad (4.14)$$

$$\underline{K}_s(p) = \frac{K_s(p)}{K_s(p=0)} = \frac{1}{1 + \sqrt{pT_1}}$$

gdzie:

$$a = \frac{z_t}{z_b - z_t} \frac{\Lambda_s}{\Lambda_\delta}$$

Transmitancja obwodu poprzecznego maszyny prądu stałego. Odnosząc transmitancję

$$K_q(p) = \frac{\Phi_k(p)}{I(p)} = \frac{\Phi_b(p) - \Phi_a(p)}{I(p)} \quad (4.15)$$

do stanu ustalonego

$$K_q(p) = \frac{K_q(p)}{K_q(p=0)} = K \underline{K}_b(p) - (K-1) \underline{K}_s(p) \quad (4.16)$$

gdzie:

$$K = \frac{\Lambda_s(z_b - z_t)}{\Lambda_s(z_b - z_t) - \Lambda_s z_t}$$

Podstawiając w równaniu (4.16) $p = j\omega$ otrzymuje się charakterystykę modułowo-fazową obwodu poprzecznego maszyny prądu stałego

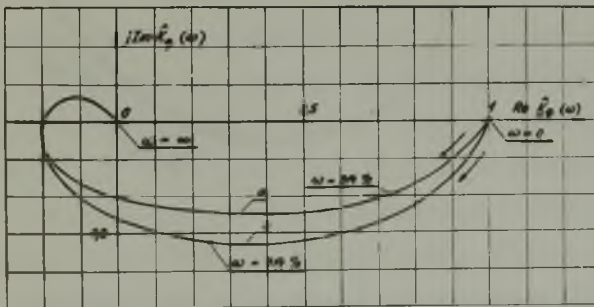
$$\underline{K}_q(\omega) = K \hat{\underline{K}}_b(\omega) - (K-1) \hat{\underline{K}}_s(\omega) = K_1 \hat{\underline{K}}_1(\omega) - K_2 \underline{K}_2(\omega) \quad (4.17)$$

gdzie

$$\begin{aligned} \hat{\underline{K}}_1(\omega) &= \frac{1}{1 + \sqrt{T_0} j\omega} \\ \hat{\underline{K}}_2(\omega) &= \frac{1}{1 + \sqrt{T_1} j\omega} \\ K_1 &= K \left(1 - s \sqrt{\frac{T_1}{T_0}}\right) \\ K_2 &= (K - 1) + K \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} \end{aligned} \quad (4.18)$$

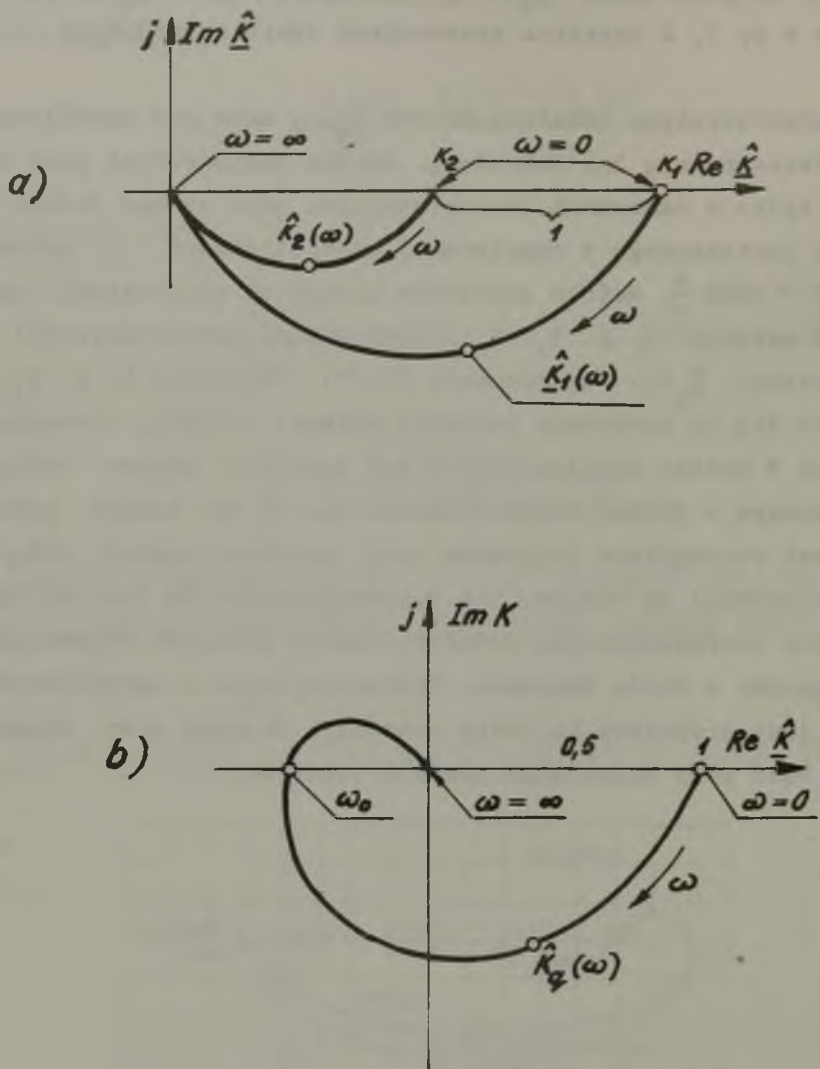
Z uwagi na nierówność $T_1 \ll T_0$ charakterystyka $\hat{K}_q(\omega)$ jest położona w 4, 3, 2 ćwiartce płaszczyzny liczb zespolonych (rys. 4.4).

Charakterystyka modułowo-fazowa $\underline{K}_q(\omega)$ może być określona metodą bezpośrednią lub pośrednią. Metoda bezpośrednia jest przydatna tylko w warunkach laboratoryjnych gdyż wymaga źródła napięcia przemiennego o regulowanej częstotliwości w zakresie $0 \leq \omega < 1000 \frac{r}{s}$. Metoda pośrednia polega na wyznaczeniu parametrów maszyny K , a , T_1 , T_0 i wykreślenie charakterystyki częstotliwości $\hat{K}_q(\omega)$ wg równania (4.17). Parametry K , a , T_1 , T_0 określa się na podstawie pomiarów badanej maszyny, przeprowadzonych w stanie ustalonym przy jej zasilaniu prądem stałym i przemiennym o jednej częstotliwości np. 50 Hz. Metoda pośrednia jest szczególnie przydatna przy pomiarach maszyn będących w eksploatacji na miejscu ich zainstalowania. Na rys. 4.5 przedstawiono charakterystyki modułowo-fazowe silników walcowniczych pracujących w Hucie Warszawa. Charakterystyka częstotliwości $\hat{K}_q(p)$ jest przydatna do oceny komutacji maszyny przy nieustalonym bądź przy pulsującym prądzie twornika.



Rys. 4.5. Charakterystyka modułowo-fazowa silników walcowniczych

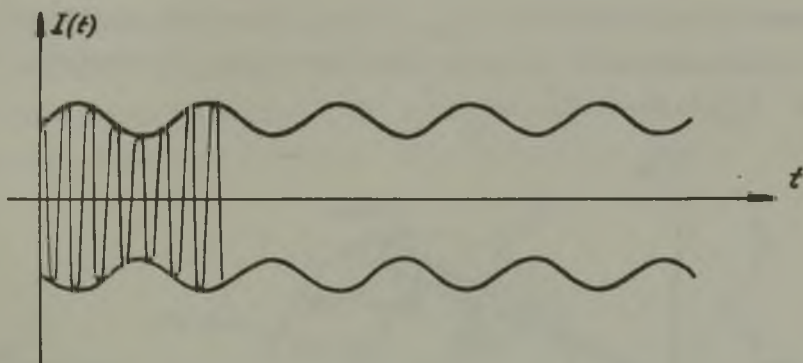
- a - charakterystyka \hat{K}_q silnika P-2300/14/1380/01 2500 kW 800V
3340 A 250 ÷ 500 obr./min.
- b - charakterystyka \hat{K}_q silnika typu K 250/145 3950 kW 5700 A
750V 60 ÷ 120 obr./min.



Rys. 4.4. Charakterystyki modułowo-fazowe obwodu poprzecznego maszyny prądu stałego

5. Wykrywanie uszkodzeń prętów klatki silnika asynchronicznego

W przypadku wewnętrznych uszkodzeń wirnika silnika asynchronicznego, obserwuje się przy jego obciążeniu charakterystyczne pulsacje prądu stojana, pobieranego z symetrycznej sieci zasilającej (rys. 5.1).



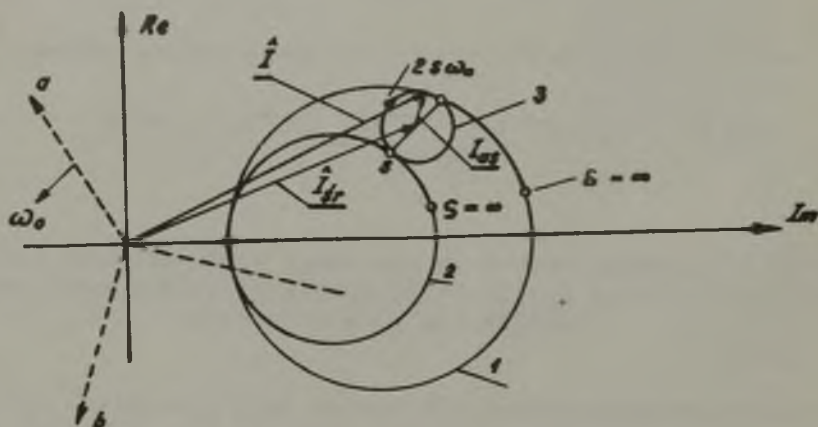
Rys. 5.1. Obwiednia przebiegu czasowego prądu stojana pobieranego z symetrycznej sieci zasilającej w przypadku wewnętrznego uszkodzenia klatki wirnika

Typowa asymetria wewnętrzna występuje w przypadku przerwy jednego lub kilku prętów wirnika. Wpływ asymetrii elektrycznej wirnika można wyjaśnić poglądowo na przykładzie wirnika o symetrii dwuosiowej, w którym w osiach elektrycznie wzajemnie prostopadłych mieszczą się obwody elektryczne o różnych parametrach. Przepływ tych uzwojeń zastępczych, wytworzony przez prąd indukowany przez kołowe pole wirujące stojane, jest przepływem eliptycznym, który można przedstawić jako superpozycję dwóch kołowych pól, wirujących względem wirnika z prędkością poślizgu.

Przepływ stojana kompensujący eliptyczny przepływ wirnika wykazuje składową kołową wirującą z prędkością synchroniczną ω_0 i składową wirującą z prędkością $(1-2s)\omega_0$. Równanie opisujące czasowy przebieg wektora prądu stojana na synchronicznej płaszczyźnie liczb zespolonych

$$\hat{I}(t) = \hat{I}_{sr} + \hat{I}_{as} e^{-j2s\omega_0 t}$$

przedstawia dwie składowe \hat{I}_{sr} , której odpowiada działanie zastępczej symetrycznej maszyny asynchronicznej i składowej asymetrii \hat{I}_{as} (rys. 5.2).

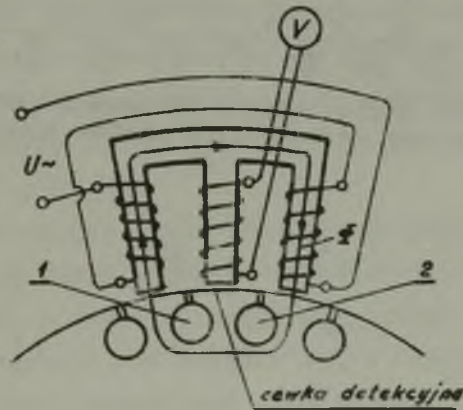


Rys. 5.2. Wektor prądu stojana na płaszczyźnie liczb zespolonych

Okręgi składowe 1.2 odpowiadają wykresom kołowym dwóch zastępczych silników asynchronicznych o symetrycznym wirniku wykalowanym wg poślizgu. Przy określonym poślizgu s maszyny wektor prądu stojana porusza się po okręgu 3 z podwójną prędkością poślizgu. Okrąg 3 jest zatoczony na średnicy łączącej punkty okręgów 1 i 2 przyporządkowane poślizgowi S .

Prąd fazowy w fazach a,b,c stojana zaznaczony na rys. 5.1 jest rzutem wektora prądu na osie a,b,c wirujące synchronicznie z prędkością ω_0 .

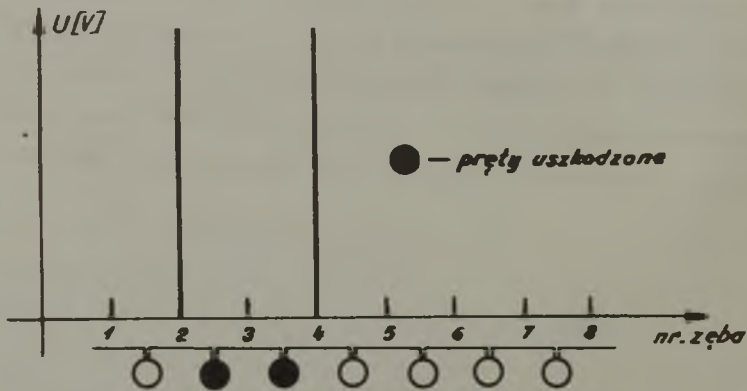
Przy remoncie wirników o uszkodzonej klatce przydatne jest ustalenie prętów uszkodzonych w celu ich wymiany. Do lokalizacji i wykrywania pęknięć prętów zarówno jedno jak i dwuklatkowych wirników może być przydatny czujnik, którego zasadę działania przedstawia rys. 5.3. Uszkodzenie pręta klatki powoduje deformacje symetrii strumienia czujnika na skutek czego strumień w kolumnie środkowej indukuje napięcie w cewce detekcyjnej. Przemieszczając czujnik co podziałkę żłobkową można znaleźć pręty uszkodzone kierując się wskazaniami napięć cewki



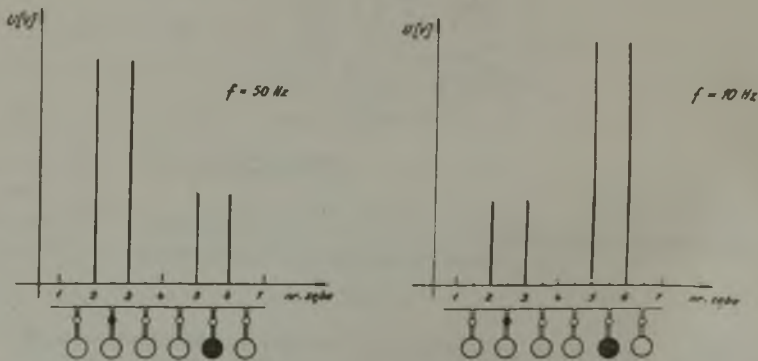
Rys. 5.3. Zasada działania czujnika różnicowego umieszczonego na badanym wirniku klatkowym

detekcyjnej. Rys. 5.4 przedstawia diagram napięć cewki detekcyjnej przy uszkodzeniu dwóch sąsiednich prętów wirnika. W przypadku uszkodzeń dwuklatkowych wirników można selektywnie określić uszkodzone pręty, stosując powyższą metodę przy zasila-

niu czujnika prądem przemiennym o dwóch różniących się znacznie od siebie częstotliwościach np. 50 Hz i 10 Hz. Zjawisko wypierania prądu przy częstotliwości 50 Hz z klatki roboczej, a przemieszczenie prądu do klatki dolnej przy częstotliwości 10 Hz umożliwia selektywne określenie uszkodzenia. Rys. 5.5 przedstawia diagram napięć czujnika w przypadku uszkodzenia pręta w dolnej i górnej klatce.



Rys. 5.4. Diagram napięć zdjęty za pomocą czujnika różnicowego w przypadku dwu uszkodzonych prętów wirnika jednoklatkowego



Rys. 5.5. Diagramy napięć dla wirnika dwuklatkowego zdjęte za pomocą czujnika różnicowego przy zasilaniu prądem o częstotliwości $f = 50$ Hz oraz $f = 10$ Hz

6. Badanie stanów cieplnych w maszynach elektrycznych i transformatorach

Z uwagi na dążenie do uzyskania optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych coraz większą uwagę przywiązuje się do obliczeń cieplnych maszyn elektrycznych wirujących i transformatorów. Znajomość rozkładu temperatury w maszynie elektrycznej lub transformatorze, bądź w ich elementach, jest szczególnie pożądana.

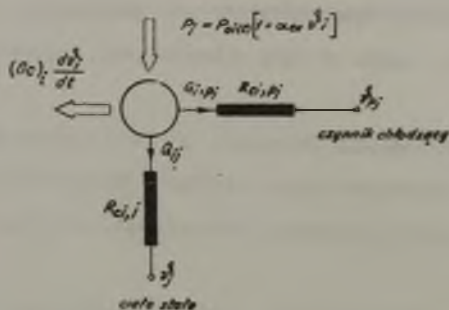
Maszyna elektryczna stanowi skomplikowany układ ciał niejednorodnych. Przestrzenny rozkład temperatury w stanie cieplnie ustalonym jest opisany równaniami różniczkowymi przewodnictwa ciepła.

Rozwiązanie tych równań z uwzględnieniem nieliniowości parametrów oraz pomiary sprawdzające, przeprowadzono na modelu fizycznym uzwojeń transformatora uzyskując w ten sposób sprawdzian adekwatności metody obliczeń. Badania wykazały znaczne różnice między średnią a maksymalną temperaturą uzwojeń. Pracochłonność obliczeń można zmniejszyć przez zastosowanie do obliczeń maszyny cyfrowej.

Pole cieplne maszyny elektrycznej w stanach termo-kinetycznych jest opisane układem równań różniczkowych cząstkowych przewodnictwa ciepła, w których uwzględnić trzeba zależność strat wydzielonych w maszynie od temperatury i czasu. Ścisłe rozwiązanie układu takich równań jest utrudnione. Możliwe jest przybliżone rozwiązanie równań przez przejście z układu o parametrach rozłożonych do przybliżonego układu o parametrach skupionych, opisanego zwykłymi równaniami różniczkowymi.

Rozważmy jeden element "i" cieplnego schematu zastępczego "n" ciał wzajemnie cieplnie sprzężonych modelujący maszynę elektryczną.

W elemencie tym wydzielają się straty $P_{oi} = f(\nu^s, t)$ i następuje akumulacja energii cieplnej $(Gc)_i \frac{d\nu_i^s}{dt}$. Element "i" poza tym sprzężony jest z innymi elementami maszyny np. "j" względnie z czynnikiem chłodzonym "pj", między którymi następuje wymiana ciepła.



Rys. 6.1. Ciepły schemat zastępczy "i"-tego elementu maszyny elektrycznej

Otrzymuje się równanie różniczkowe opisujące stan cieplnie nieustalony (rys. 6.1).

$$P_{oi}(t) \left[1 + \alpha_{cu} \nu_i^s \right] - (Gc)_i \frac{d\nu_i^s}{dt} - \left(\frac{\nu_i^s - \nu_{i,j}^s}{R_{ci,j}} \right) - \left(\frac{\nu_i^s - \nu_{i,pj}^s}{R_{ci,pj}} \right) = 0 \quad (6.1)$$

gdzie:

$P_{oi}(t)$ - straty wydzielane w elemencie "i" przy temperaturze 0 [°C]

ν_i^s - temperatura w elemencie "i" [°C]

$(Gc)_i$ - pojemność cieplna "i" - tego elementu $\left[\frac{W \cdot s}{deg} \right]$

$R_{ci,j}$ - opór cieplny łączący element "i" z elementem "j" $\left[\frac{deg}{W} \right]$

$R_{ci,pj}$ - opór cieplny łączący element "i" z elementem "pj" - (czynnik chłodzący) $\left[\frac{\text{deg}}{\text{W}}\right]$

α_{cu} - współczynnik temperaturowy rezystancji $\left[\frac{1}{\text{deg}}\right]$.

Układ "n" równań można rozwiązać za pomocą maszyn analogowych względnie cyfrowych, lub przy użyciu elektrycznego analogu rezystancyjno-pojemnościowego RC.

Analog zbudowano w oparciu o następujące analogie ciepłno-elektryczne:

schemat cieplny - schemat elektryczny

źródło ciepła P [W] - źródło prądu I [A]

strumień ciepła Q [W] - prądy I [A]

temperatury ϑ [$^{\circ}\text{C}$] - napięcia U [V]

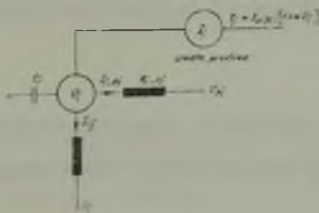
spadki temperatur $\Delta\vartheta$ [deg] - spadki napięcia ΔU [V]

opory cieplne R_c $\left[\frac{\text{deg}}{\text{W}}\right]$ - rezystancje R [Ω]

pojemności cieplne (Gc) $\left[\frac{\text{W}}{\text{deg}}\right]$ - pojemności C [F]

Analogia pozwala na przekształcenie cieplnego schematu zastępczego "i"-tego elementu w schemat elektryczny podany na rys. 6.2 dla którego obowiązuje równanie różniczkowe:

$$I_{oi}(t) \left[1 + \alpha U_i\right] - C_i \frac{dU_i}{dt} - \left(\frac{U_i - U_{i,j}}{R_{i,j}}\right) - \left(\frac{U_i - U_{i,pj}}{R_{i,pj}}\right) = 0 \quad (6.2)$$



Rys. 6.2. Elektryczny schemat zastępczy "i"-tego elementu maszyny elektrycznej

Dla składników elementów obwodu cieplnego i elektrycznego przyjęto skalę:

$$a_V = \frac{V^s}{U}; \quad a_R = \frac{R_c}{R}; \quad a_C = \frac{Gc}{C}; \quad a_I = \frac{P}{I}; \quad a_\tau = \frac{t}{\tau},$$

między którymi występują ponadto następujące związki:

$$a_\tau = a_C a_R, \quad a_I = \frac{a_V}{a_R}, \quad a_\alpha = \frac{1}{a_V}.$$

W skład zaprojektowanego analogu wchodzi:

- 1) 12 źródeł prądowych zbudowanych na układach lampowych pozwalających na wprowadzenie do siatki RC analogu dowolnej wartości prądu w zakresie $0 \div 10$ mA, z możliwością zrealizowania funkcji typu $I_1 = I_{01}(\tau) [1 + \alpha U_1]$, które umożliwiają uwzględnienie zmiany rezystancji na skutek nagrzewania,
- 2) 33 dekad rezystancyjne na obwodach drukowanych pozwalające na nastawienie w sposób ciągły dowolnej wartości rezystancji w zakresie $0 \div 200$ k ,
- 3) 12 kompletów zasad pojemnościowych pozwalających na nastawienie dowolnej wartości pojemności w zakresie $0 \div 109$ μ F,
- 4) układ zadawania warunków początkowych i brzegowych,
- 5) układ zasilający, sterujący i sygnalizujący,
- 6) płyta komutacyjna.

Przebieg temperatury w stanach nieustalonych wyznaczony za pomocą analogu sprawdzono na modelu fizycznym maszyny oraz transformatora.

Jeśli zachodzą szybkie zmiany temperatury powstaje często potrzeba uzyskania większej ilości informacji pomiarowej w o-

kreślonym czasie, a nawet mierzenia temperatur w wielu miejscach badanego obiektu jednocześnie. Powszechnie stosowane urządzenia pomiarowe nie spełniają takich wymagań. Również zakłócające wpływy obcych pól magnetycznych i elektrycznych fałszują dokładność uzyskiwanych wyników. Wykonano więc urządzenie dające możliwość szybkiej wielopunktowej rejestracji cieplnych przebiegów nieustalonych. Urządzenie działa na zasadzie przekaźnika zbudowanego z obwodów drukowanych z pamięcią kondensatorową przy zastosowaniu termoelementów jako sond pomiarowych.

Podczas eksploatacji maszyn elektrycznych zdarzają się zamierzone, względnie awaryjne przypadki pracy maszyny w stanach termokinetycznych. Zaliczyć do nich można: przeciążenia, asymetrie obciążenia, pracę przerywaną, dorywczą, forsowanie wzburzenia, itp.

Analog cieplny można wyzyskać nie tylko do eksperymentalnego wyznaczania przebiegów temperatury, o ile znane są parametry cieplne układu, lecz umożliwia również ocenę wpływu zmian parametrów na wypadkowy przebieg temperatury zarówno w stanie nieustalonym, jak i ustalonym. Jest cennym narzędziem dla konstruktora przy optymalizacji parametrów cieplnych maszyny.

LITERATURA

- [1] Giebułtowiec R.: Zagadnienia krótkotrwałej obciążalności niesymetrycznej dużych turbogeneratorów. Praca doktorska 1965. Katedra Maszyn Elektrycznych.
- [2] Glinka T.: Analiza własności dynamicznych maszyn prądu stałego przy zmiennym obciążeniu (Praca doktorska) 1968, Katedra Maszyn Elektrycznych.

- [3] Glinka T.: Wyznaczanie charakterystyk momentu i prądu w funkcji poślizgu maszyn asynchronicznych na podstawie charakterystyk częstotliwościowych. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 19/1964.
- [4] Glinka T.: Charakterystyki częstotliwości obwodu wzbudzenia maszyn prądu stałego (przyjęto do druku w Przegl. Elektr.).
- [5] Gogolewski Z., Paszek W., Gabrys W., Kubek J.: Uszkodzenia maszyn elektrycznych. WNT 1967.
- [6] Gogolewski Z., Rut R.: Uszkodzenia klatek silników asynchronicznych oraz metody wykrywania przerw w klatkach. Wiadomości Elektrotechn. nr 7/66.
- [7] Gogolewski Z., Hagel R.: Detekcja jonizacji w uzwojeniach maszyn elektrycznych wysokiego napięcia. Energetyka nr 1/1954.
- [8] Hagel R., Kubek J.: Laboratoryjna metoda badania komutacji w maszynach prądu stałego przy użyciu oscylografu katodowego. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 4/1957.
- [9] Hickiewicz J., Kubek J., Pałka E.: Transduktorowo-amplidynewy regulator napięcia. Energetyka nr 5/1964.
- [10] Janson Z., Rozewicz Z.: Analiza łukowego układu pospiesznego odwzbudzenia generatora synchronicznego. Przegląd Elektrotechn. nr 10/1967.
- [11] Kołek Wł.: Praca turbogeneratorsa w układzie energetycznym. PWT - 1955.
- [12] Kołek Wł., Hagel R., Kubek J.: Wpływ własności szczotek oraz warunków zewnętrznych na przebiegi komutacyjne w maszynach prądu stałego. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 1/1954.
- [13] Kołek Wł.: Przebiegi komutacyjne w maszynach prądu stałego. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 1/1954.
- [14] Kołek Wł.: Określanie dopuszczalnej asymetrii obciążenia turbogeneratorsa na podstawie pomiarów. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 1/1954.
- [15] Kołek Wł., Kubek J., Paszek Wł.: Przyłączanie generatorów (maszyn) synchronicznych do pracy równoległej. Wyd. Katedry Maszyn Elektr. Pol. Śl., 1953.
- [16] Kołek Wł., Kubek J., Paszek Wł.: Forsowanie wzbudzenia generatorów synchronicznych. Wyd. Katedry Maszyn Elektr. Pol. Śl. 1954.

- [17] Kołek Wł., Kubek J., Paszek Wł.: Samoczynne załączanie rezerw w elektrowniach cieplnych. Warszawa 1955.
- [18] Kubek J.: Wpływ nieliniowości charakterystyki szczotek na warunki beziskrowej komutacji. Kat. Masz. Elektr. (praca doktorska) 1954.
- [19] Kubek J.: Pomiary komutacji maszyn prądu stałego na modelach. Przegl. Elektrotechniczny nr 10/1967.
- [20] Kuczewski Z.: Analiza układu silnika asynchronicznego z przetwornicą częstotliwości. Kat. Masz. Elektr. (praca doktorska) 1961.
- [21] Nowacki P., Kołek Wł.: Le couplage en asynchrone des machines synchrones. Arch. Elektr. nr 2/1958.
- [22] Paszek Wł.: Podstawowe parametry elektromagnetyczne maszyny synchronicznej. Arch. Elektrotechniki 3/62.
- [23] Paszek Wł.: Wpływ forsowania wzbudzenia na pracę równoległą synchronicznych generatorów. Archiwum Elektrotechniki nr 3/1956.
- [24] Paszek Wł.: Sposoby powiększania szybkości działania układów regulacji napięcia generatorów synchronicznych. Archiwum Automatyki i Telemechaniki nr 2/60.
- [25] Paszek Wł.: Stabilizacja napięcia bezwzbudnicowych generatorów synchronicznych przy pomocy fazowej kompondacji wzbudzenia. Rozpr. Elektrotechniki nr 1/62.
- [26] Paszek Wł.: Przebiegi nieustalone generatorów bezwzbudnicowych z fazową kompondacją wzbudzenia. Arch. Automatyki i Telemechaniki nr 2/63.
- [27] Paszek Wł.: O problemach i pojęciach w technice regulacji napięcia generatorów synchronicznych. Arch. Automatyki i Telemechaniki nr 1/61.
- [28] Paszek Wł.: Przybliżona analiza generatora synchronicznego jako obiektu regulacji. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 16/63.
- [29] Paszek Wł.: Zagadnienia prób i pomiarów przebiegów nieustalonych w generatorze synchronicznym dużej mocy. Wybrane zagadnienia turbogeneratorów dużej mocy. Min. Energetyki 1962.
- [30] Paszek Wł.: Podstawowe problemy w technice regulacji napięcia generatorów synchronicznych - Wybrane zagadnienia turbogeneratorów dużej mocy. Min. Energetyki 1962.

- [31] Paszek Wł.: Analiza podstawowych parametrów maszyn synchronicznych z uwzględnieniem ich pomiaru. Przegl. Elektr. 1/62.
- [32] Paszek Wł.: Własności eksploatacyjne wielostopniowych wzmacniaczy elektromaszynowych. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 12/62.
- [33] Paszek Wł.: Fazowa kompowandacja wzbudzenia małych prądnic synchronicznych przy pomocy stabilizatora wirującego. Przegl. Elektr. nr 2/61.
- [34] Paszek Wł.: Człony pomiarowo-porównawcze układów regulacji napięcia. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 14/63.
- [35] Paszek Wł.: Transformator różniczkujący i stabilizacyjny w układzie samoczynnej regulacji napięcia generatora synchronicznego. Arch. Automatyki i Telemekhaniki nr 4/60.
- [36] Paszek Wł.: Podstawowe własności nowoczesnych samoczynnych regulatorów napięcia. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 5/58.
- [37] Paszek Wł.: Analiza stanów nieustalonych amplitudyny. Zesz. Nauk. Pol. Śl. nr 4/59.
- [38] Paszek Wł.: Wpływ regulacji napięcia na równowagę współpracy generatorów synchronicznych. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 6/60.
- [39] Paszek Wł.: Amplitudynowe sterowanie nowoczesnego zespołu Leonarda. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 3/55.
- [40] Paszek Wł.: Praca maszyny synchronicznej przy stałym poślizgu. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 3/55.
- [41] Paszek Wł.: Samosynchronizacja hydrogeneratorów i kompensatorów synchronicznych. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 2/55.
- [42] Paszek Wł.: Niestateczność napięcia generatora synchronicznego o wzbudzeniu zasilanym z samowzbudnej wzbudnicy boczniowej. Przegl. Elektr. nr 9/56.
- [43] Paszek Wł.: Zespół Leonarda sterowany za pomocą amplitudyny. Przegl. Elektr. nr 1/55.
- [44] Paszek Wł.: Analiza i pomiary charakterystyk statycznych amplitudyn. Przegląd Elektr. nr 5/57.
- [45] Paszek Wł.: Nowoczesny układ sterowania posuwu elektrod pieca łukowego. Przegl. elektr. nr 9/55.
- [46] Paszek Wł.: Pomiary do określenia warunków stosowalności samosynchronizacji. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 2/55.

- [47] Paszek Wł.: Samosynchronizacja turbogeneratorów. Energetyka nr 1/55.
- [48] Paszek Wł.: Forsowanie wzbudzenia jako człon pospieszny samoczynnych regulatorów napięcia. Energetyka nr 4/5/1955.
- [49] Paszek Wł.: Samosynchronizacja generatorów. Energetyka nr 4-5/1954.
- [50] Paszek Wł.: Wybrane zagadnienia regulacji napięcia generatorów synchronicznych. Przegląd Elektr. nr 10/61.
- [51] Paszek Wł.: Przyłączanie generatorów synchronicznych do sieci sposobem samosynchronizacji. Wyd. Sesji Nauk. Pol. Śl. 1955.
- [52] Paszek Wł.: Analiza i pomiary oddziaływania podłużnego zewojów komutujących maszyn prądu stałego ze szczególnym uwzględnieniem amplidyny. Wyd. Sesji Nauk. Pol. Śl. 1955.
- [53] Paszek Wł.: SZR przy modernizacji elektrowni cieplnych. Wyd. Sesji Nauk. Pol. Śl. 1955.
- [54] Paszek Wł.: Fazowa compoundacja wzbudzenia prądnic synchronicznych przy pomocy stabilizatora wirującego. III Seminarium Maszyn i Napędów. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA 1960.
- [55] Paszek Wł.: Regulacja napięcia prądnicy prądu stałego przy pomocy transduktorów. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 17/64.
- [56] Paszek Wł.: Pospieszne odwzbudzenie turbogeneratorsa przy pomocy oporności gaszącej. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 19/64.
- [57] Paszek Wł., Glinka T.: Wyznaczenie dynamicznej strefy beziskrowej komutacji maszyn prądu stałego na podstawie charakterystyki częstotliwości. (Archiwum Elektr. 1970).
- [58] Różycki A.: Powstawanie uszkodzeń w uzwojeniach wirników dużych turbogeneratorów. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 16/1963.
- [59] Grzywak A.: Metody obliczania i pomiaru dynamicznego silników asynchronicznych indukcyjnych. Katedra Maszyn Elektr. Praca doktorska, 1959.
- [60] Puchała A.: Szczególne własności obwodu magnetycznego i ich wpływ na postać równań silnika ze zwojem zwartym. Katedra Maszyn Elektrycznych. Praca doktorska, 1960 r.

- [61] Paszek Wł., Walichiewicz J.: Pospieszne odzbudzanie turbogeneratorsa przy pomocy oporności gaszącej. Zesz. Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA nr 19/1964.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Р е з ю м е

Приведен обзор трудов Кафедры Электрических Машин включающий объем проблематики, связанной с исследованиями характеристик электрических машин.

Примерно рассмотрены результаты исследования синхронных машин и машин постоянного тока при помощи частотных характеристик, способы выявления поврежденных беличьих клеток асинхронных электродвигателей и метод исследования термических явлений при помощи электрических аналогов.

Дополнением статьи является список публикаций трудов кафедры по этой проблематике.

INVESTIGATION ON CHARACTERISTICS OF ELECTRIC MACHINES

S u m m a r y

Review of problems related to investigation of electric machines characteristics is given.

The testing results as examples are discussed of both, synchronous and d.c. machines by means of frequency characteristics, the method of detection of faulty conductors in squirrel cages of induction motors and method of study of heat phenomena by means of electrical analogs. The report is completed by the list of publications of Electric Machines Department on this field.