

WŁADYSŁAW PASZEK, ALEKSANDER ŻYWIEC

Instytut Metrologii i Maszyn Elektrycznych

BADANIE WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH MASZYNY SYNCHRONICZNEJ O TYRYSTOROWYM ŹRÓDLE WZBUDZENIA PRZY ZAKŁÓCENIACH SYMETRYCZNYCH

Streszczenie. Przedstawiono wyniki pomiarów oraz równania analityczne przebiegów nieustalonych maszyny synchronicznej o tyrystorowym (prostownikowym) źródle wzbudzenia przy zwarciu symetrycznym z biegu jałowego, przy niesynchronicznym załączeniu maszyny do sieci trójfazowej oraz przy ustalonej pracy asynchronicznej.

1. Wstęp

Podczas eksploatacji maszyny synchronicznej występują często zakłócenia jej normalnej pracy. Zakłócenia te mogą być zamierzone - wprowadzone celowo przez użytkownika (jeśli zachodzi konieczność zmiany napięcia, mocy czynnej lub mocy biernej wydawanej przez maszynę), bądź też niezamierzone - jako wynik awarii na zaciskach maszyny lub w jej wnętrzu (zwarcie, resynchronizacja itp.). Przebieg stanu nieustalonego maszyny synchronicznej uwarunkowany jest rodzajem zakłócenia, a ponadto jest zależny od własności źródła wzbudzenia.

Tyrystorowe (prostownikowe) źródło wzbudzenia umożliwia jednokierunkowy przepływ prądu w obwodzie wzbudzenia maszyny. Źródło takie dla prądów obciążenia płynących w kierunku zgodnym z kierunkiem przewodzenia tyrystorów (diod prostowniczych), zachowuje się jak źródło napięciowe, którego parametry zastępcze (napięcie wewnętrzne i impedancja wewnętrzna) nie są stałe, lecz ulegają zmianie w kolejnych obszarach wartości prądu obciążenia i kąta opóźnienia zapłonu tyrystorów [4]. Dla prądów obciążenia płynących w kierunku przeciwnym źródło tyrystorowe (prostownikowe) stanowi bardzo dużą rezystancję, w wyidealizowanym przypadku nieskończenie wielką.

Po zakłóceniu stanu ustalonego maszyny synchronicznej zmienia się wartość prądu w obwodzie wzbudzenia. Na ustalony prąd wzbudzenia o wartości wymuszonej przez źródło wzbudzenia, nakładają się składowe zaburzeniowe wywołane wzajemnym oddziaływaniem obwodów magnetycznej i uzwojenia twornika maszyny. Jeśli maszyna synchroniczna jest wzbudzona ze źródła tyrystorowego, to może się okazać, że w pewnej chwili t_1 nieustalony prąd wzbudzenia osiągnie taką wartość, przy której następuje zmiana zastępczych parametrów wewnętrznych źródła wzbudzenia. W szczególności może nastąpić rozwarcie obwodu wzbudzenia w chwili, gdy malejący prąd wzbudzenia przechodzi przez zero. W chwili t_1 rozpoczyna się kolejny przedział przebiegów nieustalonych wywołany zmianą warunków zasilania i impedancji obwodu wzbudzenia maszyny

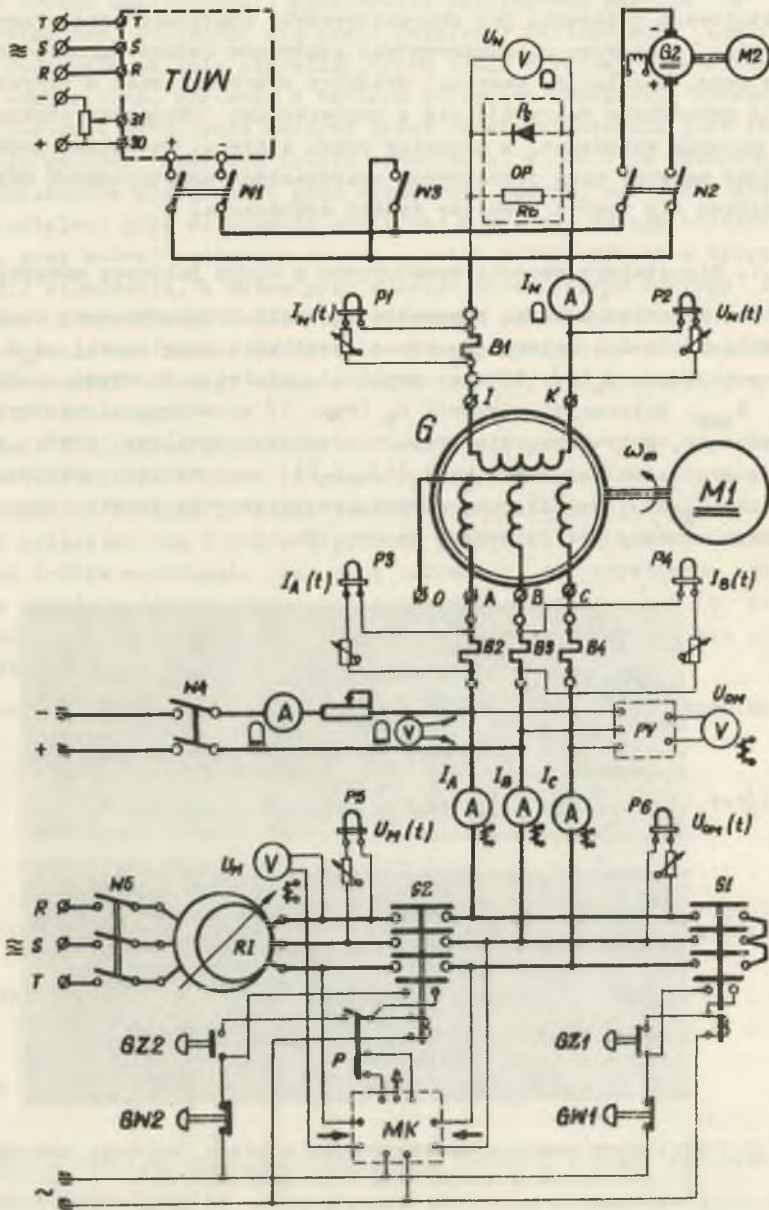
Z przedstawionego rozumowania wynika wnioski, że zastosowanie tyrystorowego (prostownikowego) źródła wzbudzenia zmienia przebiegi nieustalone maszyny synchronicznej. Problem własności dynamicznych maszyny synchronicznej o tyrystorowym źródle wzbudzenia przy zakłóceniach symetrycznych był tematem prac prowadzonych w Zespole Maszyn Elektrycznych Instytutu Metrologii i Maszyn Elektrycznych [1], [2], [3], [4]. W niniejszej pracy przedstawia się wynik pomiarów przebiegów nieustalonych maszyny synchronicznej o tyrystorowym źródle wzbudzenia przy wybranych zakłóceniach symetrycznych oraz porównanie pomiarów z obliczeniami analitycznymi.

2. Opis układu pomiarowego

Przeprowadzono pomiary laboratoryjne trójfazowej maszyny synchronicznej typu G4a 16anr 1213/1964 o następujących danych znamionowych; $S_n = 15$ kVA, $P_n = 15$ kW, $U_n = 380$ V, $f_n = 50$ Hz, $n_n = 1000$ obr/min, $U_{wn} = 20$ V, $I_{wn} = 21$ A. Wykonano pomiary przy wzbudzeniu maszyny z prądnicy prądu stałego oraz przy wzbudzeniu ze źródła tyrystorowego zaprojektowanego i wykonanego przez autorów. Schematy ideowe i wyniki pomiarów tyrystorowego źródła wzbudzenia przedstawiono w pracy [4].

Ogólny schemat układu pomiarowego do przeprowadzenia pomiarów własności statycznych i dynamicznych maszyny synchronicznej przedstawiono na rys 1. Badana maszyna synchroniczna G jest napędzana silnikiem prądu stałego M¹ o sztywnej charakterystyce mechanicznej. Uzwojenie wzbudzenia może być zasilane albo z prądnicy prądu stałego G₂, albo też z tyrystorowego źródła wzbudzenia TUV. Wybór źródła wzbudzenia jest możliwy za pomocą wyłączników W₁ i W₂. Uzwojenie wzbudzenia maszyny synchronicznej można zbocznikować układem tłumiącym przepięcia OP (rezystancją bocznikującą R_b bądź elementami półprzewodnikowymi P_s). Przy załączonym styczniku S₁ wykonuje się pomiary zwarcia symetrycznego maszyny badanej. Stycznik S₂ umożliwia załączenie uzwojenia twornika maszyny synchronicznej do przemysłowej sieci trójfazowej poprzez regulator indukcyjny RI. Załączenie stycznika S₂ jest możliwe przy dowolnie wybranej stałej wartości kąta fazowego pomiędzy jednoimiennymi napięciami maszyny G i sieci przemysłowej. Uzyskuje się to dzięki zastosowaniu przekaźnika P sterowanego z miernika kąta mocy MK. Jeśli wyłącznik W₅ jest otwarty regulator indukcyjny RI może być wyzyskany jako regulowana reaktancja obciążenia prądnicy G.

Miernik oraz oscylograf w obwodzie wzbudzenia maszyny synchronicznej umożliwia pomiar wartości średnich (przyrządami magnetoelektrycznymi) oraz rejestrację przebiegów czasowych prądu i napięcia wzbudzenia (pętlcami pomiarowymi P₁ i P₂). Po stronie uzwojenia twornika maszyny G mierzono wartości skuteczne (przyrządami elektromagnetycznymi) oraz rejestrowano przebiegi chwilowe (pętlcami P₃, ..., P₆) prądów i napięć twornika oraz napięcia sieci zasilającej. Przy oscylograficznych pomiarach prądów maszyny stosowano boczniki pomiarowe B₁, ..., B₄.



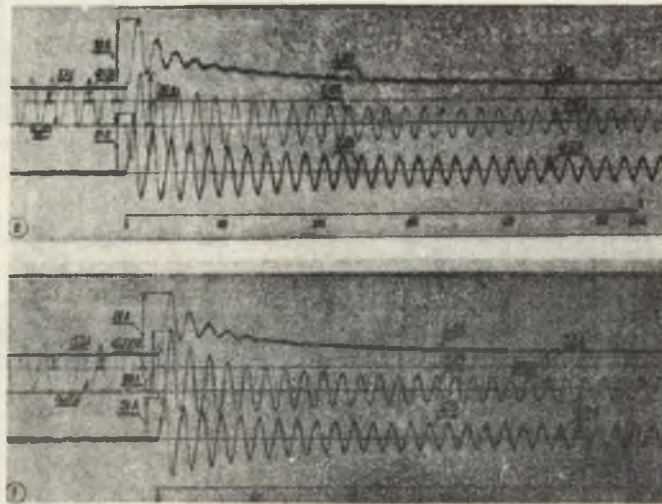
Rys. 1. Schemat ideowy układu pomiarowego

3. Przebiegi nieustalone maszyny synchronicznej o tyrystorowym źródle wzbudzenia przy wybranych zakłóceniach symetrycznych

Przy zasilaniu uzwojenia wzbudzenia maszyny synchronicznej ze źródła tyrystorowego zmierzono jej charakterystyki statyczne oraz własności dynamiczne. Podstawowe charakterystyki statyczne (biegu jałowego, obciążenia zewnętrzne, regulacji, zwarcia) prądnicy synchronicznej o tyrystorowym źródle wzbudzenia pokrywają się z odpowiednimi charakterystykami statycznymi maszyny wzbudzonej z prądnicy prądu stałego. Natomiast przebiegi nieustalone maszyny przy jednakowych zakłóceniach symetrycznych różnią się zasadniczo dla obydwu rodzajów źródeł wzbudzenia.

3.1. Nieustalone zwarcia symetryczne z biegu jałowego maszyny

Przed zwarciem maszyna pracowała w stanie ustalonym przy stałej elektrycznej prędkości kątowej ω_g równej prędkości znamionowej ω_n i przy prądzie wzbudzenia $I_w(0)$. Wówczas amplituda napięcia fazowego prądnicy wynosiła U_{0Mf} . Załączając stycznik S_1 (rys. 1) spowodowano symetryczne zwarcie udarowe, przy czym rejestrowano przebiegi chwilowe prądu wzbudzenia $I_w(t)$, prądu dwu faz twornika $I_A(t)$, $I_B(t)$ oraz napięcie międzyprzewodowe twornika $U_{AB}(t)$. Oscylogramy nieustalonego zwarcia symetrycznego z biegu jałowego maszyny przedstawiono na rys. 2a, b.



Rys. 2. Oscylogram zwarcia symetrycznego z biegu jałowego maszyny synchronicznej typu G4a 16a;

- a) przy wzbudzeniu ze źródła tyrystorowego, b) przy wzbudzeniu z prądnicy prądu stałego

Z oscylogramów przedstawionych na rys. 2, widać, że przebiegi nieustalone prądów w uzwojeniu twornika i w uzwojeniu wzbudzenia posiadają taki sam charakter dla obu rodzajów źródeł wzbudzenia maszyny (źródła tyrystorowego i źródła maszynowego). Opracowując oscylogramy zwarcia w skali półlogarytmicznej stwierdza się pewne różnice w wartościach amplitud i stałych czasowych malenia odpowiadających sobie składowych zaburzeniowych. Jest to uzasadnione, ponieważ w ogólnym przypadku impedancja wnoszona do obwodu uzwojenia wzbudzenia maszyny przez źródło wzbudzenia jest inna dla obu rozpatrywanych rozwiązań źródeł wzbudzenia. W obwodzie wzbudzenia składowe zaburzeniowe powiększają prąd wzbudzenia powyżej wartości początkowej. Nieustalony prąd wzbudzenia zazwyczaj nigdy nie osiąga wartości granicznej, przy której następuje zmiana zjawisk komutacyjnych w tyrystorowym źródle wzbudzenia, a zatem przy zwarceniu symetrycznym maszyny zastępcze parametry wewnętrzne źródła tyrystorowego nie ulegają zmianie. Ponadto prąd wzbudzenia nie zanika do zera, a zatem przy symetrycznym zwarceniu nieustalonym z biegu jałowego maszyny synchronicznej nie wystąpią przepięcia w obwodzie wzbudzenia.

Wykonano obliczenia przebiegów nieustalonych prądów przy symetrycznym zwarceniu nieustalonym z biegu jałowego maszyny synchronicznej posługując się ogólnymi równaniami przedstawionymi w pracy [3], [4]. Kolejne etapy obliczeń przedstawiono w pracy [4]. Przy przyjęciu stałości parametrów zastępczych źródła wzbudzenia oraz przy założeniu, że rezystancja uzwojenia twornika powoduje jedynie tłumienie składowych periodycznych (o pulsacji ω_g) prądów osiowych w zastępczych obwodach maszyny otrzymuje się ostatecznie następujące równania:

- przebieg nieustalony prądu w fazie k ($k=A, B, C$) uzwojenia twornika

$$I_k(t) = \left[I_{du} + \Delta I'_d e^{-\frac{t}{T'_d}} + \Delta I''_d e^{-\frac{t}{T''_d}} + \Delta I_{dp}(t) e^{-\frac{t}{T_a}} \right] \cos(\omega_g t + \varphi_k) + \\ - \left[\Delta I'_q e^{-\frac{t}{T'_q}} + \Delta I''_q e^{-\frac{t}{T''_q}} + \Delta I_{qp}(t) e^{-\frac{t}{T_a}} \right] \sin(\omega_g t + \varphi_k) \quad (1a)$$

- przebieg nieustalony prądu wzbudzenia

$$I_w(t) = I_w(0) + \Delta I'_w e^{-\frac{t}{T'_d}} + \Delta I''_w e^{-\frac{t}{T''_d}} + \Delta I_{wd}(t) e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (1b)$$

Poszczególne składowe nieustalonego prądu twornika i prądu wzbudzenia są określone zależnościami;

$$I_{du} = \frac{\omega}{\omega_g} \frac{n}{g} U_{0mf} - \frac{1}{X_d} \quad (2a)$$

$$\Delta I'_d = \frac{\omega}{\omega_g} \frac{U_{oMf}}{X_d} \left(\frac{T'_{do}}{T'_d} - 1 \right) \frac{T'_d - T''_{do}}{T'_d - T''_{do}} \frac{(\omega_g T'_d)^2}{1 + (\omega_g T'_d)^2} \approx \frac{\omega}{\omega_g} U_{oMf} \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \quad (2b)$$

$$\Delta I''_d = \frac{\omega}{\omega_g} \frac{U_{oMf}}{X_d} \left(\frac{T''_{do}}{T''_d} - 1 \right) \frac{T''_d - T'_{do}}{T''_d - T'_{do}} \frac{(\omega_g T''_d)^2}{1 + (\omega_g T''_d)^2} \approx \frac{\omega}{\omega_g} U_{oMf} \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X_d} \right) \quad (2c)$$

$$\Delta I_{dp}(t) = -\frac{\omega}{\omega_g} \frac{U_{oMf}}{2} \operatorname{Im} \left\{ \left[\frac{j e^{pt}}{X_d(p)} \right]_{p=j\omega_g} + \left[\frac{j e^{pt}}{X_d(p)} \right]_{p=-j\omega_g} \right\} \approx -\frac{\omega}{\omega_g} U_{oMf} \frac{1}{X''_d} \cos \omega_g t \quad (2d)$$

$$\Delta I'_q = \frac{-\omega}{\omega_g} \frac{U_{oMf}}{X_q} \frac{T'_q - T''_{qo}}{T'_q - T''_{qo}} \frac{\omega_g (T'_{qo} - T''_q)}{1 + (\omega_g T'_q)^2} \approx 0 \quad (2e)$$

$$\Delta I''_q = -\frac{\omega}{\omega_g} \frac{U_{oMf}}{X_q} \frac{T''_{qo} - T'_q}{T''_{qo} - T'_q} \frac{\omega_g (T'_{qo} - T''_q)}{1 + (\omega_g T''_q)^2} \approx 0 \quad (2f)$$

$$\Delta I_{qp}(t) = \frac{\omega}{\omega_g} \frac{U_{oMf}}{2} \operatorname{Im} \left\{ \left[\frac{j e^{pt}}{X_q(p)} \right]_{p=j\omega_g} - \left[\frac{j e^{pt}}{X_q(p)} \right]_{p=-j\omega_g} \right\} \approx \frac{\omega}{\omega_g} U_{oMf} \frac{1}{X'_q} \sin \omega_g t \quad (2g)$$

$$\Delta I'_w = I_w(0) k_{wF} \frac{\omega_n L_{ad}^2}{X_d R_{wF}} \frac{T'_d - T_{std}}{T'_d (T'_d - T''_d)} \frac{(\omega_g T'_d)^2}{1 + (\omega_g T'_d)^2} \approx I_w(0) k_{wF} \frac{\omega_n L_{ad}^2}{X_d R_{wF}} \frac{1}{T'_d} \quad (2h)$$

$$\Delta I''_w = -I_w(0) k_{wF} \frac{\omega_n L_{ad}^2}{X_d R_{wF}} \frac{T''_d - T_{std}}{T''_d (T''_d - T'_d)} \frac{(\omega_g T''_d)^2}{1 + (\omega_g T''_d)^2} \approx I_w(0) k_{wF} \frac{\omega_n L_{ad}^2}{X_d R_{wF}} \frac{T''_d - T_{std}}{T''_d T'_d} \quad (2i)$$

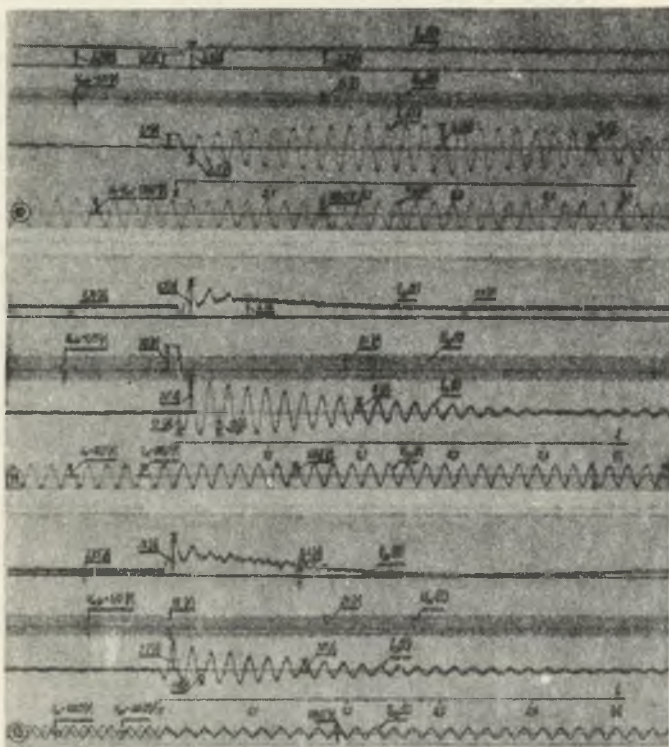
$$\Delta I_{wp}(t) = -I_w(0) k_{wF} \frac{\omega_n L_{ad}}{2} \operatorname{Im} \left\{ \left[\frac{G_{wF}(p)}{X_d(p)} \right]_{p=-j\omega_g} e^{pt} - \left[\frac{G_{wF}(p)}{X_d(p)} \right]_{p=j\omega_g} e^{pt} \right\} \\ \approx -I_w(0) k_{wF} \frac{\omega_n L_{ad}}{X_d R_{wF}} \frac{T_{std}}{T'_d T''_d} \cos \omega_g t \quad (2j)$$

W powyższych równaniach przyjęto ogólnie stosowane oznaczenia parametrów maszyny synchronicznej o tyrystorowym źródle wzbudzenia [3], [4].

Przy znanych parametrach schematu zastępczego maszyny synchronicznej i tyrystorowego źródła wzbudzenia przedstawione równania umożliwiają obliczenie przebiegów nieustalonych przy zwarciu symetrycznym maszyny. Otrzymuje się dobrą zgodność obliczeń z wynikami pomiarów oscylograficznych.

3.2. Załączenie wzbudzonej maszyny synchronicznej do sieci trójfazowej

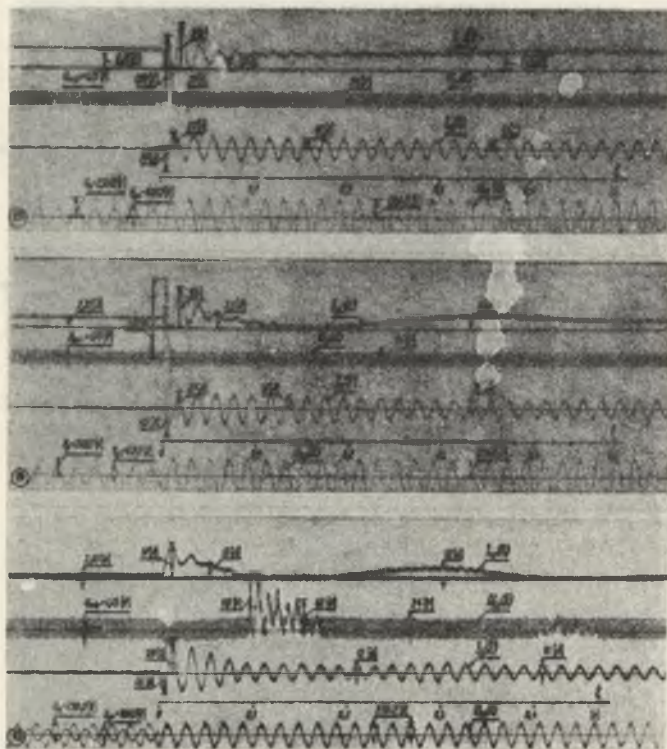
Maszynę synchroniczną wzbudzoną ze źródła tyrystorowego i wirującą ze stałą elektryczną prędkością kątową ($\omega_g = \text{const}$) włączano do sieci trójfazowej o pulsacji ω_s poprzez regulator indukcyjny RI (rys. 1) przy zgodnej kolejności faz napięć maszyny i sieci zasilającej. Za pomocą układu MK (rys. 1) nastawiano chwilę załączenia stycznika S_2 tak, by załączenie następowało przy różnych przesunięciach fazowych β napięcia sieci względem napięcia stanu jałowego maszyny ($\beta > 0$ przy wyprzedzeniu kątowym napięcia maszyny). Wykonano pomiary oscylograficzne przy zmianie kąta β w zakresie $\pm \pi$ radianów dla napięć sieci U_M równych oraz większych od napięcia jałowego U_{0M} maszyny ($U_{0M} < U_M < 2,5U_{0M}$).



Rys. 3. Oscylogram przebiegów prądów i napięć po przyłączeniu wzbudzonej maszyny synchronicznej typu G4a 16a o tyrystorowym źródle wzbudzenia do sieci trójfazowej przy $U_{0M} = U_M = \sqrt{2} 100 \text{ V}$, $\omega_g \approx \omega_s$ dla

$$\text{a) } \beta = 0, \text{ b) } \beta = \frac{\pi}{4}, \text{ c) } \beta = \frac{11}{12} \pi$$

Na rys. 3 przedstawiono oscylogramy przebiegów prądów i napięć wzbudzenia i twornika po załączeniu wzbudzonej maszyny synchronicznej o tyrystorowym źródle wzbudzenia przy równych napięciach sieci i maszyny w chwili załączenia. Jeśli załączenie nastąpiło przy kącie fazowym pomiędzy napięciami sieci i maszyny $\beta = 0$, nie występują składowe zaburzeniowe w prądzie wzbudzenia i prądzie twornika. Odształcenie przebiegu prądu twornika oraz niewielkie zmiany prądu wzbudzenia widoczne na rys. 3a są wynikiem niedokładnego nastawienia napięć sieci i maszyny, prędkości obrotowej maszyny oraz kąta fazowego β . Jeśli załączenie następuje przy przesunięciu fazowym napięć sieci i maszyny ($\beta \neq 0$), to w przebiegach prądu wzbudzenia i prądu twornika występują składowe zaburzeniowe (rys. 3b,c). Wpływ składowych zaburzeniowych na wypadkowy prąd wzbudzenia i prąd twornika zależy od wartości kąta przesunięcia fazowego β . W chwili gdy nieustalony



Rys. 4. Oscylogram przebiegów prądów i napięć po przyłączeniu wzbudzonej maszyny synchronicznej typu G4a 16a o tyrystorowym źródle wzbudzenia do

sieci trójfazowej przy $U_n = \sqrt{2} \cdot 250 \text{ V}$,

$U_{0M} = \sqrt{2} \cdot 100 \text{ V}$, $\omega_g \approx \omega_s$ dla;

a) $\beta = 0$, b) $\beta = \frac{\pi}{4}$, c) $\beta = \frac{11\pi}{12}$

prąd wzbudzenia zmaleje do zera następuje zaporowe spolaryzowanie tyristorów źródła wzbudzenia (otwarcie obwodu wzbudzenia) i na zaciskach uzwojenia wzbudzenia maszyny pojawia się przepięcie (rys. 3b).

Na rys. 4 przedstawione oscylogramy zdjęte przy przyłączeniu wzbudzonej maszyny synchronicznej o tyristorowym źródle wzbudzenia do sieci trójfazowej w przypadku, kiedy napięcie sieci jest większe od napięcia w stanie jałowym maszyny. Składowe zaburzeniowe w prądzie wzbudzenia i w prądzie twornika występują przy każdej wartości kąta przesunięcia fazowego β nawet przy $\beta = 0$. Wartości początkowe składowych zaburzeniowych są teraz znacznie większe, aniżeli w przypadku $U_M = U_{OM}$. W początkowym okresie stanu nieustalonego prąd wzbudzenia maleje lub wzrasta powyżej wartości początkowej, co jest uwarunkowane wartością kąta przesunięcia fazowego β . Przy pewnych wartościach kąta przesunięcia fazowego napięcie sieci i maszynowy prąd wzbudzenia maleje w początkowym okresie stanu nieustalonego. Może zatem nastąpić otwarcie obwodu wzbudzenia maszyny i w efekcie pojawi się przepięcie na zaciskach uzwojenia wzbudzenia (rys. 4a,b).

W ogólnym przypadku po załączeniu wzbudzonej maszyny synchronicznej do sieci trójfazowej nieustalony prąd wzbudzenia może osiągać wartości graniczne, przy których następuje zmiana procesów komutacji faz w tyristorowym źródle wzbudzenia. W efekcie może następować zmiana zastępczych parametrów wewnętrznych źródła tyristorowego w czasie trwania procesów nieustalonych w maszynie. Analityczne obliczenia własności dynamicznych maszyny przy załączeniu wzbudzonej maszyny do sieci trójfazowej trzeba wykonywać w poszczególnych przedziałach czasowych, w których parametry zastępcze tyristorowego źródła wzbudzenia są stałe. W chwili zmiany zjawisk komutacyjnych w tyristorowym źródle wzbudzenia rozpoczyna się kolejny przedział obliczeń przebiegów nieustalonych wywołanych zmianami impedancji i napięcia w obwodzie wzbudzenia maszyny. Kolejność wykonywania obliczeń oraz odpowiednie równania przedstawiono w pracach [3], [4].

Przy założeniach wymienionych w p.3.1 przebiegi nieustalone prądów maszyny o tyristorowym źródle wzbudzenia w początkowym okresie stanu nieustalonego można obliczyć z następujących równań:

- przebieg nieustalony prądu w fazie k ($k = A, B, C$) uzwojenia twornika

$$I_k(t) = \left[I_{du}(t) + \Delta I'_d e^{-\frac{t}{T'_d}} + \Delta I''_d e^{-\frac{t}{T''_d}} + \Delta I_{dp}(t) e^{-\frac{t}{T'_a}} \right] \cos(\omega_g t + \varphi_k) + \\ - \left[I_{qu}(t) + \Delta I'_q e^{-\frac{t}{T'_q}} + \Delta I''_q e^{-\frac{t}{T''_q}} + \Delta I_{qp}(t) e^{-\frac{t}{T'_a}} \right] \sin(\omega_g t + \varphi_k) \quad (3a)$$

- przebieg nieustalony prądu wzbudzenia:

$$I_w(t) = I_{wu}(t) + \Delta I'_w e^{-\frac{t}{T'_d}} + \Delta I''_w e^{-\frac{t}{T''_d}} + \Delta I_{wp}(t) e^{-\frac{t}{T'_a}} \quad (3b)$$

Dokładne równania składowych prądów stojana i wzbudzenia są przedstawione w pracy [4]. Przy uwzględnieniu nierówności zachodzących pomiędzy stałymi czasowymi maszyn synchronicznych dla $\omega_g \approx \omega_s$ otrzymuje się następujące zależności przybliżone:

$$I_{du}(t) \approx \frac{\omega_n}{\omega_g} \frac{1}{X_d} \left\{ U_{oMf} - U_{Mf} \cos [(\omega_s - \omega_g)t - \beta] \right\} \quad (4a)$$

$$\Delta I_d' \approx \frac{\omega_n}{\omega_g} \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) (U_{oMf} - U_{Mf} \cos \beta) \quad (4b)$$

$$\Delta I_d'' \approx \frac{\omega_n}{\omega_g} \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d} \right) (U_{oMf} - U_{Mf} \cos \beta) \quad (4c)$$

$$\Delta I_{dp}(t) \approx - \frac{\omega_n}{\omega_g} \frac{1}{X_d''} \left[U_{oMf} \cos(\omega_g t) - U_{Mf} \cos(\omega_g t + \beta) \right] \quad (4d)$$

$$I_{qu}(t) \approx - \frac{\omega_n}{\omega_g} \frac{1}{X_q} U_{Mf} \sin [(\omega_s - \omega_g)t - \beta] \quad (4e)$$

$$\Delta I_q' \approx \frac{\omega_n}{\omega_g} \left(\frac{1}{X_q'} - \frac{1}{X_q} \right) U_{Mf} \sin \beta \quad (4f)$$

$$\Delta I_q'' \approx \frac{\omega_n}{\omega_g} \left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_q} \right) U_{Mf} \sin \beta \quad (4g)$$

$$\Delta I_{qp}(t) \approx \frac{\omega_n}{\omega_g} \frac{1}{X_q''} \left[U_{oMf} \sin(\omega_g t) - U_{Mf} \sin(\omega_g t + \beta) \right] \quad (4h)$$

$$I_{wu}(t) \approx I_w(0) \left\{ 1 + k_{wF} \frac{\omega_n L_{ad}^2}{X_d R_{wF}} \frac{\omega_g (\omega_s - \omega_g)}{\omega_s} \frac{U_{Mf}}{U_{oMf}} \sin [(\omega_s - \omega_g)t - \beta] \right\} \quad (4i)$$

$$\Delta I_w' \approx I_w(0) k_{wF} \frac{\omega_n L_{ad}^2}{X_d R_{wF}} \frac{1}{T_d'} (1 - \frac{U_{Mf}}{U_{oMf}} \cos \beta) \quad (4j)$$

$$\Delta I_w'' \approx - I_w(0) k_{wF} \frac{\omega_n L_{ad}^2}{X_d R_{wF}} \frac{T_d'' - T_{std}}{T_d' T_d''} (1 - \frac{U_{Mf}}{U_{oMf}} \cos \beta) \quad (4k)$$

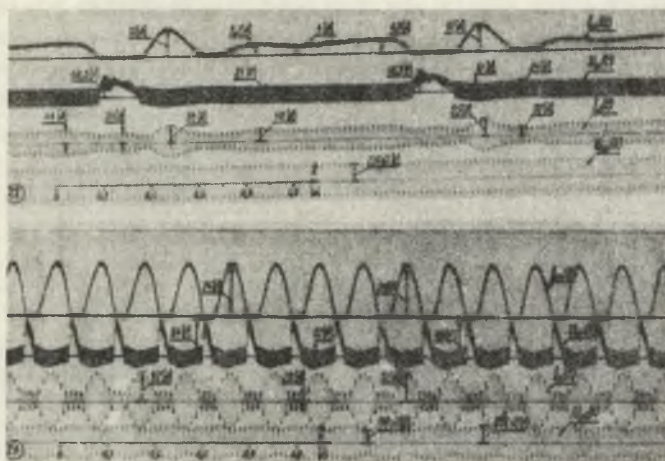
$$\Delta I_{wp}(t) \approx - I_w(0) k_{wF} \frac{\omega_n L_{ad}^2}{X_d R_{wF}} \frac{T_{std}}{T_d' T_d''} \left[\cos(\omega_g t) - \frac{U_{Mf}}{U_{oMf}} \cos(\omega_g t + \beta) \right] \quad (4l)$$

Na podstawie przedstawionych równań można obliczyć przybliżone wartości udarowego prądu w uzwojeniu twornika i w uzwojeniu wzbudzenia przy niesynchronicznym załączeniu maszyny synchronicznej o tyrystorowym źródle wzbudzenia do sieci trójfazowej. Można również wyznaczyć chwilę t_0 pierwszego zerowania się prądu wzbudzenia maszyny, w której następuje rozwarcie obwodu wzbudzenia. Wyniki obliczeń przeprowadzonych dla maszyny G4a16a różniły się od wartości zmierzonych o około 30%. Stosunkowo duża odchyłka rezultatów obliczeń od rezultatów pomiarów wynika z błędu popełnionego przy pomiarach oscylograficznych oraz z błędu popełnionego przy wyznaczaniu parametrów maszyny synchronicznej małej mocy.

Wykonano pomiary przepięć pojawiających się na zaciskach uzwojenia wzbudzenia przy stosowaniu różnych rozwiązań układu ochrony przepięciowej OP (rys. 1) przy niesynchronicznym załączeniu maszyny synchronicznej o tyrystorowym źródle wzbudzenia do sieci zasilającej. Wyniki pomiarów oraz ich porównanie z obliczeniami przedstawiono w pracy [2], [4].

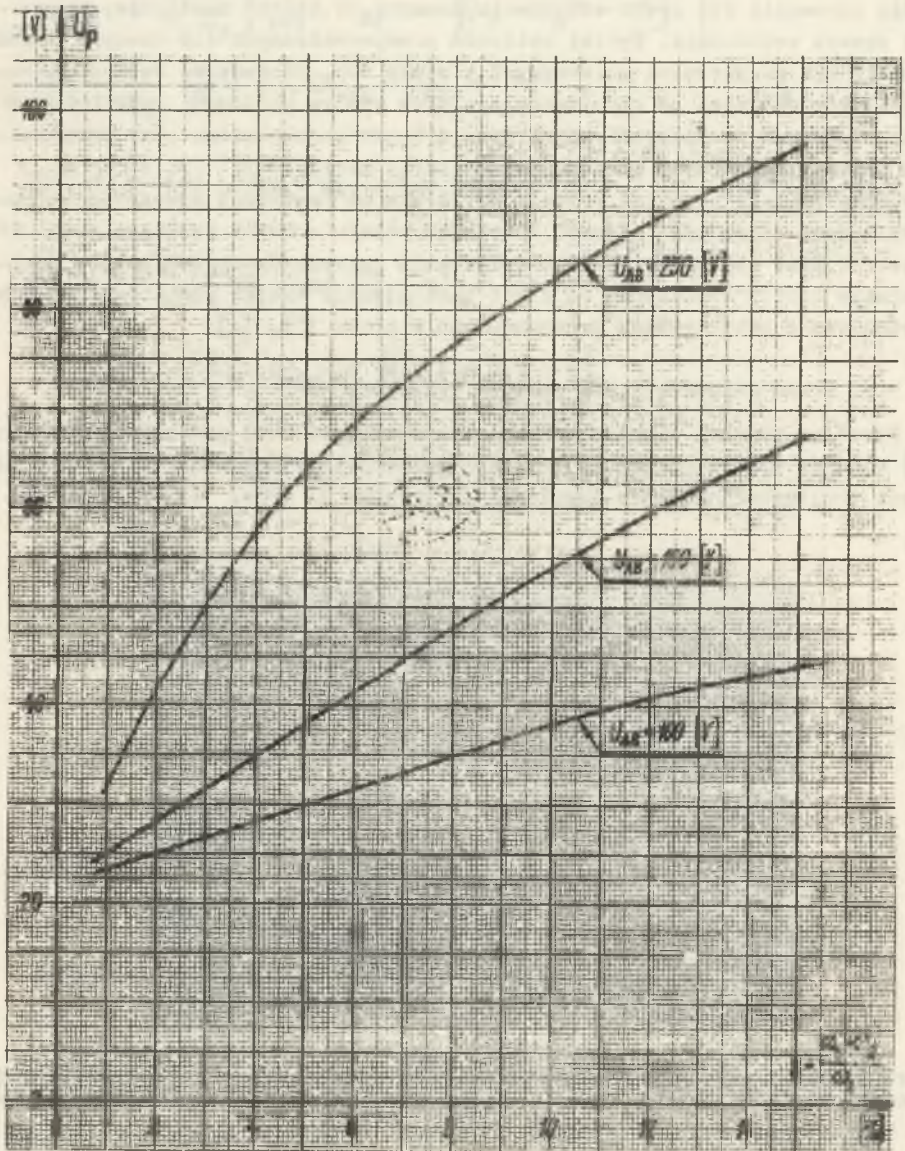
3.3. Praca asynchroniczna maszyny synchronicznej

Wykonano pomiary oscylograficzne w stanie ustalonej pracy asynchronicznej maszyny synchronicznej o tyrystorowym źródle wzbudzenia załączonej do sieci trójfazowej poprzez regulator indukcyjny RI (rys. 1). Wykonano po-



Rys. 5. Oscylogram przebiegów prądów i napięć dla pracy asynchronicznej maszyny synchronicznej typu G4a 16a o tyrystorowym źródle wzbudzenia dla

a) $s \approx 0,03$, b) $s \approx 0,005$



Rys. 6. Zależność przepięcia pojawiającego się na zaciskach uzwojenia wzbudzenia od poślizgu s przy pracy asynchronicznej maszyny synchronicznej typu G4a 16a o tyrystorowym źródle wzbudzenia, dla stałego kąta opóźnienia zapłonu tyrystorów (przy którym $U_{OM} = \sqrt{245} \text{ V}$)

miary przy różnych wartościach napięcia U_M sieci oraz przy różnych poślizgach $s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$ zachowując niezmienny kąt opóźnienia zapłonu źródła tyrystorowego. Wyniki pomiarów przy pracy bez układu ochrony przepięciowej OP (rys. 1) są przedstawione na rys. 5. Na podstawie pomiarów oscylograficznych wyznaczono zależność amplitudy przepięcia pojawiającego się na zaciskach uzwojenia wzbudzenia maszyny od poślizgu s przy parametrycznie zmienionej wartości napięcia sieci zasilającej (rys. 6). Amplituda przepięcia przy pracy asynchronicznej maszyny synchronicznej o tyrystorowym źródle wzbudzenia wzrasta ze wzrostem poślizgu oraz ze wzrostem napięcia sieci zasilającej.

4. Wnioski końcowe

Przedstawione wyniki pomiarów oscylograficznych pozwalają na stwierdzenie wpływu tyrystorowego źródła wzbudzenia na własności dynamiczne maszyny synchronicznej. Ponadto przedstawione pomiary stanowią potwierdzenie poprawności i zgodności obliczeń analitycznych (przedstawionych w [2], [3], [4]) własności dynamicznych maszyny synchronicznej o tyrystorowym źródle wzbudzenia z przebiegami rzeczywistymi. Prądy udarowe w uzwojeniu twornika i w uzwojeniu wzbudzenia oraz przepięcia występujące na zaciskach uzwojenia wzbudzenia osiągają duże wartości. Obliczając te wielkości z równań analitycznych dla małych maszyn synchronicznych otrzymuje się wartości różniące się od wartości zmierzonych nie więcej niż o (20÷30%). W dużych maszynach synchronicznych odchyłka ta będzie znacznie mniejsza. Znajomość przepięć i przetężeń w obwodzie wzbudzenia jest konieczna do właściwego doboru danych znamionowych tyrystorów źródła wzbudzenia oraz ich zabezpieczeń. Na podstawie pomiarów stwierdzić można wpływ rozwiązania układu ochrony przepięciowej na wartość przepięć pojawiających się w obwodzie wzbudzenia.

LITERATURA

1. Paszek W., Żywiec A.; Identyfikacja niektórych przebiegów przejściowych w prostownikowym obwodzie wzbudzenia maszyn synchronicznych. Prace V Krajowej Konferencji Automatyki, Sekcja 6, Gdańsk 1971 r.
2. Paszek W., Żywiec A.; Przepięcia i przetężenia w obwodzie wzbudzenia maszyn synchronicznych z tyrystorowym źródłem wzbudzenia. Archiwum Elektrotechniki, Nr 4, 1972 r.
3. Paszek W., Żywiec A.; Analiza własności dynamicznych maszyny synchronicznej o tyrystorowym źródle wzbudzenia przy zakłóceniach symetrycznych. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej "Elektryka" z. 38, 1972 r.
4. Żywiec A.; Własności dynamiczne generatorów synchronicznych z tyrystorowym układem wzbudzenia. Praca doktorska 1970. Katedra Technologii i Metrologii Elektrycznej Politechniki Śląskiej.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ синхронной машины
с тиристорным возбуждением при симметричных возмущениях

Резюме

Представлены результаты проведенных измерений и аналитические уравнения переходных процессов синхронной машины с тиристорным (выпрямительным) источником возбуждения при внезапном коротком замыкании, при несинхронном включении машины в трехфазную сеть, а также при асинхронном режиме работы.

TESTING OF DYNAMICAL PROPERTIES OF THE SYNCHRONOUS MACHINE
EQUIPPED WITH THYRISTOR EXCITING SOURCE UNDER SYMMETRICAL
DISTURBANCES

Summary

The paper contains the results of measurements and analytical equations of synchronous machine transients. The machine was equipped with thyristor source of excitation. The results and equations are given for the symmetrical short-circuit from no-load running, asynchronous switching on the machine to the three-phase network and steady asynchronous operation.