

Stanisław WÓJCIK

Institut Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektroniki  
Politechniki Śląskiej

BADANIE KOŁYSAŃ WŁASNYCH GENERATORA SYNCHRONICZNEGO  
PRZY PRACY SAMOTNEJ

Streszczenie. Wykorzystując model matematyczny generatora synchronicznego, reprezentowany przez schemat zastępczy maszyny o stałych skupionych oraz równanie różniczkowe stanu elektrodynamicznego, obliczono tłumienia i sztywności elektromagnetyczne generatora przy pracy samotnej. Przedstawiono metodę analizy samowzbudnych kołysań generatora w układzie turbina - generator. Wyniki zilustrowano przykładem obliczeniowym.

1. WSTĘP

Występowanie samowzbudnych oscylacji prędkości obrotowej przy pracy samotnej generatorów stwierdzono już wcześniej w praktyce, jednakże teoretyczne wyjaśnienie tych zjawisk pozostaje w dalszym ciągu na etapie badań studialnych, mimo przyjęcia daleko posuniętych założeń upraszczających [3].

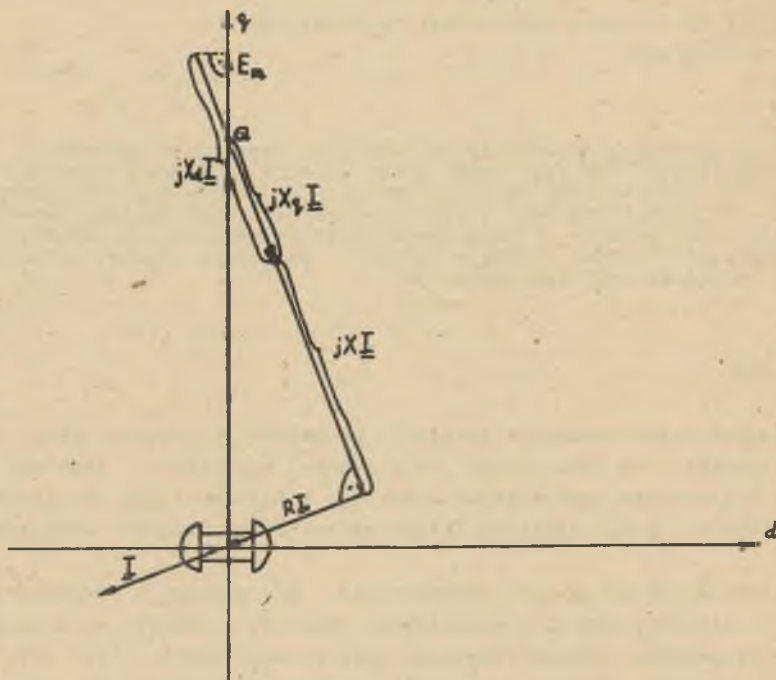
Niniejsza praca ma na celu stwierdzenie, że generator synchroniczny przy pracy samotnej (na sieć wydzieloną) wykazuje w pewnych warunkach obciążenia wyrównanego ujemne tłumienie elektromagnetyczne, które może spowodować w układzie turbina - prądnica samowzbudne kołysania własne.

Przedstawiono metodę badania stabilności lokalnej w oparciu o równanie charakterystyczne układu turbina - generator, przy czym okazało się, że pomimo spełnionego koniecznego warunku stabilności ( $\frac{\partial M_e}{\partial \omega} < \frac{\partial (-M_1)}{\partial \omega}$ ), generator synchroniczny może wykazywać niestabilność pracy typu okresowego (samorozbudzenia okresowych oscylacji prędkości).

Za podstawę analitycznych rozważań przyjęto model Parka maszyny synchronicznej, sformułowany zgodnie z założeniami podanymi w pracy [2], przy czym równania stanu są konsekwencją opisu układów elektrycznych i mechanicznych o stałych skupionych.

## 2. OBLICZENIE SZTYWNOŚCI I TŁUMIENIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO GENERATORA PRZY PRACY SAMOTNEJ

Przyjęto zastępczą maszynę synchroniczną w stanie ustalonym zwarcia trójfazowego o związanej rezystancji twornika i indukcyjności rozproszenia odpowiednio o rezystancję i indukcyjność fazową obwodu obciążenia, która odwzorowuje generator obciążony symetrycznie impedancją  $L, R$ .



Rys. 1. Wykres wektorowy generatora synchronicznego

Wykres wektorowy tego generatora przedstawiono na rys. 1. Układ równań opisujących stany dynamiczne zastępczej maszyny synchronicznej zapisano w postaci kompleksorowej na płaszczyźnie Parka (przy obranym odbiornikowym systemie strzałkowania).

$$0 = \left( \frac{d}{dt} + j\omega \right) \underline{\psi} + R \underline{I} \quad \text{a)}$$

$$\frac{J_2}{P_b} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_0 + M_{1m} \quad \text{b)} \quad (1)$$

$$M_0 = P_b R_a \left\{ j \underline{\psi} \underline{I}^s \right\} \quad \text{c)}$$

W równaniach (1) oznaczono:

- $R$  - suma rezystancji stojana i rezystancji obciążenia,  
 $J_2$  - moment bezwładności mas wirujących generatora,  
 $\omega$  - elektryczna prędkość kątowna wirnika,  
 $P_b$  - liczba par biegunów uzwojenia twornika,  
 $M_e, M_{1m}$  - moment elektromagnetyczny i mechaniczny generatora,  
 $\underline{\Psi}, \underline{I}$  - kompleksory strumienia skojarzonego i prądu twornika.

Kompleksory  $\underline{\Psi}, \underline{I}$  oznaczone przez  $\underline{W}$  są związane z odpowiednimi wielkościami fazowymi strumieni skojarzonych i prądów twornika za pomocą relacji:

$$\underline{W} = \sqrt{\frac{2}{3}}(W_a + aW_b + a^2W_c)e^{-j(\psi_{a0} + \omega t)} \quad (2)$$

$$a = a e^{j \frac{2\pi}{3}}$$

gdzie:

- $W_a, W_b, W_c$  - przebiegi czasowe strumieni skojarzonych lub prądów twornika,  
 $\psi_{a0}$  - kąt między osią uzwojenia fazy A a osią d magnesu,  
 $a$  - operator.

Do dalszej analizy przyjęto, że w wyniku zakłócenia nastąpiła różniczkowo mała zmiana elektrycznej prędkości kątowej wirowania magnesu o  $\Delta\omega$ . Obowiązuje wówczas przybliżenie:

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = - \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} \quad (3)$$

gdzie:

- $\Delta\delta$  - przyrost kąta położenia osi q magnesu względem wektora wirującego ze średnią elektryczną prędkością kątową wirowania maszyny.

Kąt  $\delta$  można identyfikować z kątem obciążenia generatora względem umyślonej sieci sztywnej, której napięcie zdążyło do zera powodując w konsekwencji stan zwarcia generatora zastępczego.

Znak "-" we wzorze (3) oznacza, że przyspieszeniu magnesu odpowiada zmniejszenie kąta obciążenia i odwrotnie.

Po uwzględnieniu równania (1b) oraz (3) otrzymano równanie operatorowe przyrostów momentów obrotowych:

$$\frac{J_2}{P_b} p^2 + \frac{\Delta M_e(p)}{\Delta \delta(p)} = 0 \quad (4)$$

Wprowadza się sztywność elektromagnetyczną  $K$  i tłumienie elektromagnetyczne  $D$  dla pulsacji  $\dot{\gamma}$  oscylacji kąta obciążenia maszyny, traktowanych jako oscylacje wymuszone:

$$K = \operatorname{Re} \left\{ \frac{\Delta M_e(p)}{\Delta \delta(p)} \right\}_{p=j\dot{\gamma}} \quad (5)$$

$$D = \operatorname{Im} \left\{ \frac{\Delta M_e(p)}{\Delta \delta(p)} \right\}_{p=j\dot{\gamma}} \quad (6)$$

Z charakterystyk sztywności elektromagnetycznej i tłumienia w funkcji pulsacji oscylacji  $\dot{\gamma}$  można wnioskować o podatności układu wirującego do samowzbudnych kołysań [3].

W celu obliczenia transmitancji operatorowej  $\frac{\Delta M_e(p)}{\Delta \delta(p)}$  równanie (1 a) przy uwzględnieniu zależności (3) przekształcono do postaci operatorowej (dla małych przyrostów  $\psi$ ,  $I$ ,  $\omega$  od ustalonego punktu pracy  $\psi_0$ ,  $I_0$ ,  $\omega_1$  po pominięciu iloczynów drugiego rzędu):

W osi  $d$ :

$$-p\psi_{q0} \Delta \delta(p) = p\Delta\psi_d(p) + R\Delta I_d(p) - \omega_1 \Delta\psi_q(p) \quad (7)$$

W osi  $q$ :

$$p\psi_{d0} \Delta \delta(p) = \omega_1 \Delta\psi_q(p) + p\Delta\psi_q(p) + R\Delta I_q(p) \quad (8)$$

Uwzględniając, że:

$$\Delta\psi_d(p) = L_d(p)\Delta I_d(p); \quad \Delta U_f = 0 \quad (9)$$

$$\Delta\psi_q(p) = L_q(p)\Delta I_q(p) \quad (10)$$

gdzie:

$L_d(p)$ ,  $L_q(p)$  - indukcyjności operatorowe w osi podłużnej i poprzecznej

$$L_d(p) = L_d \frac{(1 + pT'_d)(1 + pT''_d)}{(1 + pT'_{d\bullet})(1 + pT''_{d0})} + L \quad (11)$$

$$L_q(p) = L_q \frac{(1 + pT'_q)(1 + pT''_q)}{(1 + pT'_{q0})(1 + pT''_{q0})} + L \quad (12)$$

$T'_{d,d}$ ,  $T''_{d,q}$  - stałe czasowe przebiegów przejściowych lub odporzej-  
ściowych w osi  $d$  lub  $q$  przy zwartym bezrezystan-  
cyjnie tworniku,

$T'_{do,qo}$ ,  $T''_{do,qo}$  - stałe czasowe przebiegów przejściowych bądź odporzej-  
ściowych w osi  $d$  lub  $q$  przy rozwartym tworniku,

otrzymano transmitancje prądowo-kątowe (13) i (14),

$$\frac{\Delta I_d(p)}{\Delta \delta(p)} = \frac{\sigma \psi_{do} \omega_1 L_q(p) - \sigma \psi_{qo} [R + \rho L_q(p)]}{M(p)} \quad (13)$$

$$\frac{\Delta I_q(p)}{\Delta \delta(p)} = \frac{\sigma \psi_{do} [R + \rho L_d(p)] + \sigma \psi_{qo} \omega_1 L_d(p)}{M(p)} \quad (14)$$

$$M(p) = [R + \rho L_d(p)] [R + \rho L_q(p)] + \omega_1^2 L_d(p) L_q(p) \quad (15)$$

Strumień skojarzony generatora  $\psi_{do}$  i  $\psi_{qo}$  obliczono na podstawie (1a),

$$\psi_{do} = - \frac{R I_{qo}}{\omega_1} \quad (16)$$

$$\psi_{qo} = \frac{R I_{do}}{\omega_1} \quad (17)$$

Uwzględniając (1c), (9) i (10) otrzymano dla małych przyrostów  $\Psi$  i  $I$  szukaną transmitancję momentowo-kątową,

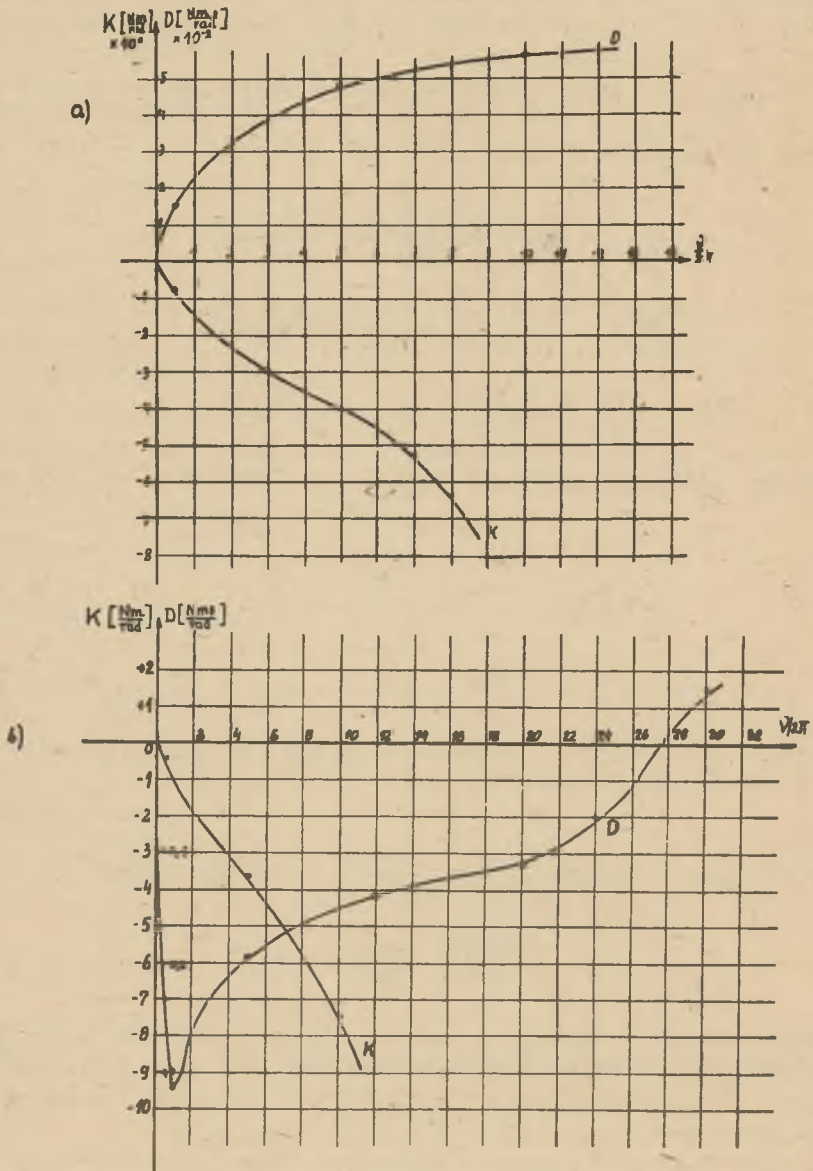
$$\frac{\Delta M_e(p)}{\Delta \delta(p)} = P_b \left\{ [\psi_{do} - I_{do} L_q(p)] \frac{\Delta I_q(p)}{\Delta \delta(p)} - [\psi_{qo} - I_{qo} L_d(p)] \cdot \frac{\Delta I_d(p)}{\Delta \delta(p)} \right\} \quad (18a)$$

$$\frac{\Delta M_e(p)}{\Delta \delta(p)} = \frac{N(p)}{M(p)} \quad (18b)$$

Z przeprowadzonych obliczeń w oparciu o równania (5) i (6) po uwzględ-  
nieniu (18a) wynika, że sztywność elektromagnetyczna jest zawsze ujemna,  
a może wystąpić zakres pulsacji  $\dot{\nu}$ , dla których tłumienie elektromagne-  
tyczne jest ujemne.

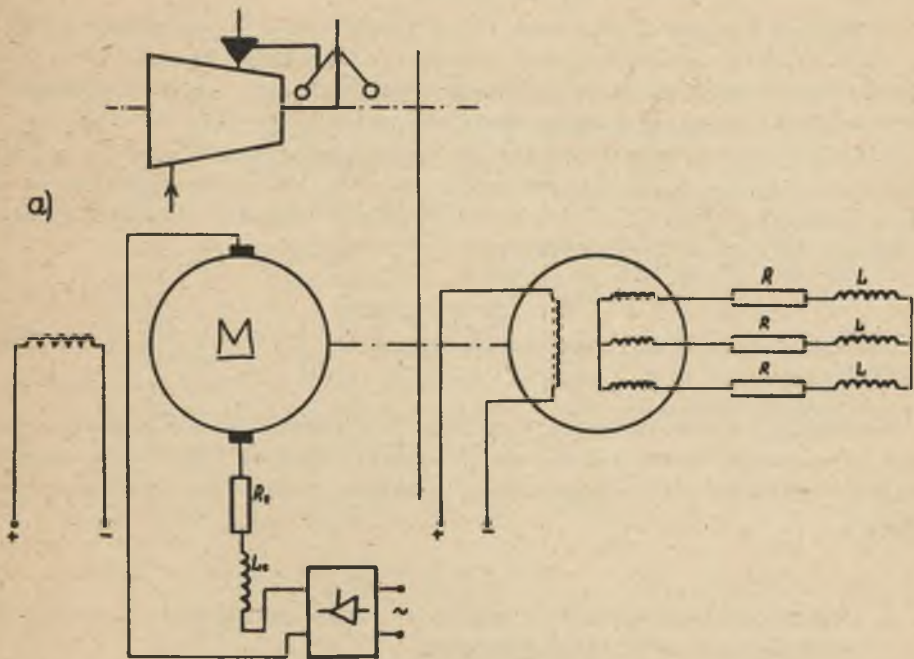
Obliczone wartości tłumienia i sztywności elektromagnetycznej genera-  
tora 200 kVA w funkcji pulsacji kąta obciążenia przedstawiono na rys. 2.  
Dla nieskończenie dużej sztywności mechanicznej wału przewiduje się oscy-  
lacje własne układu turbina-generator o pulsacji:

$$\dot{\nu}_{r1} = \sqrt{\frac{\kappa}{J_1 + J_2}} \quad (19)$$

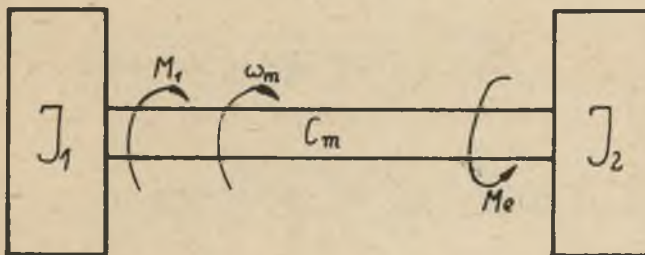


Rys. 2. Tłumienie i sztywność elektromagnetyczna generatora w funkcji częstotliwości kołysań

a) przebiegi obliczone dla prądu twornika  $I_{r1} = 0,5$  i współczynnika mocy obciążenia  $\cos\varphi_1 = 0,8$ , b) jak wyżej  $I_{r2} = 1,5$ ;  $\cos\varphi_1 = 0,8$



b)



Rys. 3. Układ turbina - wał - generator synchroniczny  
 a) schemat układu badanego, b) przybliżony model fizyczny

gdzie:

- $J_1, J_2$  - moment bezwładności turbiny, generatora,  
 $K$  - sztywność elektromagnetyczna.

Ze względu na ujemną sztywność elektromagnetyczną w przedziale pulsacji, dla których występuje ujemne tłumienie, kołysania własne układu o częstotliwości obliczonej na podstawie wzoru (19) nie mogą występować. Wniosek ten jest zgodny z wypowiedzią zawartą w pracy [3].

W rzeczywistości moment mechaniczny turbiny przenoszony jest za pośrednictwem wału, którego sztywność mechaniczna  $C_m$  przyjmuje skończone wartości dodatnie. Wynika stąd druga częstotliwość mogących wystąpić samowzbudnych oscylacji kąta obciążenia:

$$\omega_{r2} = \sqrt{\frac{C_m(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}} \quad (20)$$

W pracy [3] stwierdzono, że przy ujemnym tłumieniu elektromagnetycznym jest to pulsacja własna samowzbudnych kołysań. Wniosek ten nie zawsze znajduje potwierdzenie w szczegółowej analizie zjawisk samowzbudzenia oscylacji.

### 3. ANALIZA KOŁYSAŃ WŁASNYCH W UKŁADZIE SILNIK OBCOZWODNY - GENERATOR SYNCHRONICZNY PRZY PRACY SAMOTNEJ

Działanie turbiny napędzającej aprokymowano za pomocą elektrycznego silnika napędowego - silnika prądu stałego o wzbudzeniu obcym, którego prędkość obrotową można ustalać przez zmianę napięcia twornika, a kąt pochyleń charakterystyki mechanicznej przez dobór rezystancji w obwodzie twornika i strumienia wzbudzenia. Komplet równań różniczkowo-całkowych opisujących stany elektrodynamiczne badanego układu maszyn (rys. 3) zapisano w postaci:

$$\begin{aligned} J_1 \frac{d\omega_1^m}{dt} + C_m \int_0^t (\omega_1^m - \omega_2^m) dt &= M_1 & \text{a)} \\ J_2 \frac{d\omega_2^m}{dt} + C_m \int_0^t (\omega_2^m - \omega_1^m) dt &= M_2 & \text{b)} \\ U &= E + R_t I + L_t \frac{dI}{dt} & \text{c)} \end{aligned} \quad (21)$$



$$E = K_E \Phi \omega_1^m \quad d)$$

$$M_1 = K_E \Phi I \quad e)$$

gdzie:

- $J_1, J_2$  - moment bezwładności silnika i generatora,  
 $M_1, M_e$  - moment elektromagnetyczny silnika i generatora,  
 $C_m$  - sztywność mechaniczna wału,  
 $\omega_1^m, \omega_2^m$  - prędkość mechaniczna silnika i generatora,  
 $U, E, I, R_t, L_t$  - napięcie zasilania, napięcie rotacji, prąd twornika, rezystancja i indukcyjność w obwodzie twornika silnika napędowego.

Przy założeniu sztywnego napięcia zasilania silnika prądu stałego oraz stałego strumienia wzbudzenia równania (21) dla małych przyrostów prędkości przedstawiono w postaci (po wyłączeniu członów określających stan ustalony i zastosowaniu transformacji Laplace'a):

$$(J_1 p^2 + C_m) \Delta \omega_1^m(p) - C_m \Delta \omega_2^m(p) = [\Delta M_1(p) + A(p)] p \quad a) \quad (22)$$

$$-C_m \Delta \omega_1^m(p) + (J_2 p^2 + C_m) \Delta \omega_2^m(p) = p \Delta M_e(p) \quad b)$$

$$\Delta M_1 = - \frac{K_E^2 \Phi^2}{R_t(1 + pT_t)} \Delta \omega_1^m(p) = -K_1(p) \Delta \omega_1^m(p) \quad c)$$

$$A(p) = L\{a(t)\} \quad d)$$

gdzie:

$a(t)$  - dowolnie mały moment zakłócający,

$T_t = \frac{L_t}{R_t}$  - stała czasowa obwodu twornika.

Uwzględniając równanie (3) w zapisie operatorowym oraz po podstawieniu równania (18b) uzyskano rozwiązanie (23):

$$-\Delta \delta(p) =$$

$$\frac{P_b C_m A(p) M(p)}{[J_1 J_2 p^4 + K_1(p) J_2 p^3 + C_m (J_1 + J_2) p^2 + K_1(p) C_m p] M(p) + [J_1 p^2 + K_1(p) p + C_m] P_b N(p)} \quad (23)$$

Miejsca zerowe wielomianu charakterystycznego relacji (23) określają stabilność lokalną generatora synchronicznego, które zależą nie tylko od

jego parametrów i obciążenia ( $M(p)$ ,  $N(p)$ ,  $J_2$ ,  $P_b$ ), ale również od sztywności mechanicznej wału  $C_m$ , przebiegu charakterystyki mechanicznej, stałej czasowej twornika i momentu bezwładności mas wirujących napędu generatora ( $K_1(p)$ ,  $J_1$ ).

#### 4. PRZYKŁAD

Obliczenia przeprowadzono dla turbogeneratorsa przy pracy samotnej obciążonego prądem twornika  $I_r = 0,5$  i  $I_r = 1,5$  o następujących danych znamionowych oraz parametrach wewnętrznych:

$S_N = 200$ kVA;	$X_{dr} = 1,5$	$T'_d = 0,6$ s
$U_N = 380$ V;	$X_{qr} = 1$	$T''_d = 0,053$ s
$f_N = 50$ Hz;	$X'_{dr} = 0,3$ ;	$J_2 = 31$ kgm <sup>2</sup>
$\cos\varphi_N = 0,8$ ;	$X^*_{dr} = 0,2$ ;	
$\omega_N = 50 \frac{1}{s}$ ;	$T'_{do} = 3$ s;	
$P_b = 1$ ;	$T''_{do} = 0,08$ s;	

Założono, że maszyna nie ma obwodów tłumiących w osi  $q$  celem większego uwypuklenia rozpatrywanych zjawisk. Przyjęte założenie powoduje zwiększenie pasma częstotliwości kołysań własnych generatora o ujemnym tłumieniu elektromagnetycznym.

Napęd turbogeneratorsa aproksymowano za pomocą silnika obcowzbudnego prądu stałego o znamionowej prędkości obrotowej  $n'_N = 50 \frac{1}{s}$ , momencie bezwładności  $J_1 = 31$  kgm<sup>2</sup>, zastępczej stałej czasowej  $T_t = 0$  lub  $T_t = 0,5$  s i charakterystyce mechanicznej odpowiednio ukształtowanej przez współczynnik  $[K_1(p)]_{p=0}$  (22c).

Sztywność mechaniczną wału skrętnego obliczono dla wymaganych jego wymiarów  $C_m = 8,78 \cdot 10^4$  Nm/rad.

Wyznaczono miejsca zerowe wielomianów charakterystycznych przyrostu prędkości kątowej przy małych zmianach momentu zakłócającego generatora zakładając:

A. Sztywną charakterystykę momentu mechanicznego turbiny, która odpowiada wartościom nastawianym silnika obcowzbudnego  $K_1(p) = 0$ .

a) Wybrano:  $T_t = 0$ ;  $I_r = 0,5$ ;  $\cos\varphi_1 = 0,8$

$$\begin{aligned}
 W(p) = & 9,1058924 \cdot 10^{-4} p^9 + 0,5593771 p^8 + 183,76351 p^7 + 7584,9264 p^6 + \\
 & + 1041845,2 p^5 + 25038142 p^4 + 170715820 p^3 + 127344360 p^2 + \\
 & + 24239789 p - 51471,169
 \end{aligned}$$

$$p_1 = 0,21 \cdot 10^{-2}; p_2 = 0,4878; p_{3,4} = -0,3371 \cdot 10^{-3} \pm j0,7526 \cdot 10^3;$$

$$p_{5,6} = -0,2940 \cdot 10^3 \pm j0,3067 \cdot 10^3; p_7 = -0,1295 \cdot 10^2; p_8 = -0,3333;$$

$$p_9 = -0,125 \cdot 10^2.$$

Wielomian ma rzeczywiste, dodatnie miejsca zerowe  $p_1$  i  $p_2$ , co powoduje aperiodyczną niestabilność układu.

$$b) T_t = 0; I_r = 1,5; \cos \varphi_1 = 0,8$$

$$W(p) = 247,72071 \cdot 10^{-6} p^9 + 106,70127 \cdot 10^{-3} p^8 + 36,937242 p^7 +$$

$$+ 1528,2964 p^6 + 207991,95 p^5 + 5240352,5 p^4 + 38051349 p^3 +$$

$$+ 37286052 p^2 + 8101719 p - 96854,269$$

$$p_1 = 0,1135 \cdot 10^{-1}; p_2 = -0,7890; p_3 = -0,1400 \cdot 10^2; p_4 = -0,3333;$$

$$p_5 = -0,1250 \cdot 10^2; p_{6,7} = 0,1285 \cdot 10^{-2} \pm j0,7526 \cdot 10^2; p_{8,9} =$$

$$= -0,2016 \cdot 10^3 \pm j0,3025 \cdot 10^3.$$

Niestabilność pracy układu jest taka jak poprzednio ze względu na rzeczywiste dodatnie miejsca zerowe  $p_1$ .

B. Podaną charakterystykę momentu mechanicznego turbiny, która odpowiada  $K_1(p=0) > 0$

$$a) \text{ Wybrano } K_1(p=0) = 1; T_t = 0; I_r = 1,5; \cos \varphi_1 = 0,8$$

$$W(p) = 247,72071 \cdot 10^{-6} p^9 + 106,7091 \cdot 10^{-3} p^8 + 36,940683 p^7 +$$

$$+ 1529,466 p^6 + 208031,5 p^5 + 5243815,4 p^4 + 38135983 p^3 +$$

$$+ 37900121 p^2 + 8706236 p + 39513,52$$

$$p_1 = -0,4631 \cdot 10^{-2}; p_2 = -0,7892; p_3 = -0,14 \cdot 10^2; p_4 = -0,3333;$$

$$p_5 = -0,125 \cdot 10^2; p_{6,7} = -0,6805 \cdot 10^{-2} \pm j0,7526 \cdot 10^2;$$

$$p_{8,9} = -0,2016 \cdot 10^3 \pm j0,3025 \cdot 10^3.$$

Wszystkie miejsca zerowe wielomianu charakterystycznego położone są w lewej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej, a tym samym samowzбудne kołysania własne generatora nie występują.

$$b) K_1(p=0) = 1; T_r = 0.5 \text{ s}; I_r = 1.5; \cos\varphi_1 = 0.8;$$

$$W(p) = 1,2386035 \cdot 10^{-4} p^{10} + 5,3598355 p^9 + 18,57533 p^8 + 801,08888 p^7 + \\ + 105525,43 p^6 + 2828207,7 p^6 + 2828207,7 p^5 + 24269489 p^4 + \\ + 5677900 p^3 + 41950980 p^3 + 8657808,9 p + 39513,52.$$

Za pomocą algebraicznego kryterium stabilności Routha stwierdzono istnienie zespolonych sprzężonych miejsc zerowych wielomianu charakterystycznego z dodatnią częścią rzeczywistą, a tym samym wykazano wystąpienie samowzbudnych kołysań własnych generatora przy pracy samotnej.

## 5. WNIOSKI

- a) Metoda badania kołysań własnych turbogeneratora przy pracy samotnej polega na linearyzacji równań układu turbina-generator i wyznaczeniu wielomianu charakterystycznego funkcji operatorowej przyrostu kąta obciążenia a zatem przyrostu prędkości kątowej przy małych zmianach parametrów określających stan pracy ustalonej maszyny synchronicznej. Położenie miejsc zerowych tego wielomianu (stopnia dziewiątego lub dziesiątego) na płaszczyźnie zespolonej określa stabilność lokalną generatora synchronicznego.
- b) Nie występują kołysania własne układu turbina-generator o częstotliwości  $\nu_{r1} = \sqrt{\frac{K}{J_1 + J_2}}$  ze względu na ujemną sztywność elektromagnetyczną maszyny synchronicznej (rys. 2a i 2b).
- c) Mimo spełnionego warunku stabilności statycznej układu silnik napędowy - generator ( $\frac{\partial M_e}{\partial \omega} < \frac{\partial(-M_1)}{\partial \omega}$ ) mogą wystąpić samowzbudne kołysania własne, przy odpowiedniej wartości elektromagnetycznej stałej czasowej twornika silnika prądu stałego (przykład 2b). Miejsca zerowe wielomianu charakterystycznego są zespolone sprzężone o dodatniej części rzeczywistej i rzeczywiste ujemne. Pominięcie w analizie elektromagnetycznej stałej czasowej napędu powoduje wykluczenie samowzbudnych kołysań (przykład 2a).
- d) Przy niezachowaniu koniecznego warunku stabilności układu turbina-generator, określonego przez charakterystyki statyczne, występuje zawsze niestabilność pracy typu aperiodycznego (następuje aperiodyczna zmiana prędkości obrotowej układu - przykład 1a i 1b).

## LITERATURA

- [1] Gogolewski Z., Paszek W., Gabryś W., Kubek J.: Uszkodzenia maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa 1967.
- [2] Paszek W.: Stany nieustalone w maszynach elektrycznych. Część II - Maszyny synchroniczne. Skrypt uczelniany Politechniki Śląskiej, 1981.
- [3] Jordan H.: Wykłady na temat zagadnień specjalnych w maszynach elektrycznych. Gliwice - Katowice, wrzesień 1979.

Wpłynęło do redakcji 3 VI 1981 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Władysław Paszek

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА,  
РАБОТАЮЩЕГО ПРИ АВТОНОМНОЙ НАГРУЗКЕ

Р е з ю м е

Используя математическую модель синхронного генератора с учетом схемы машины с сосредоточенными постоянными, а также дифференциального уравнения электродинамического состояния, рассчитаны электромагнитные демпфирование и жесткость генератора, работающего при автономной нагрузке. Представлен метод исследования собственных колебаний системы турбина-генератор. Результаты иллюстрированы расчетным примером.

INVESTIGATION OF THE SELF EXCITED HUNTING OF A SYNCHRONOUS  
GENERATOR AT SINGLE OPERATION

S u m m a r y

The mathematical model of the synchronous generator at single operation with lumped constants in the equivalent circuit was taken into consideration at computing the electromagnetic damping and stiffness. The analysis of self excited speed oscillation of the turbine-generator set was presented. The results were discussed on a computed example.