

Andrzej BOBOŃ, Jerzy KUDŁA  
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych  
Politechniki Śląskiej

## BADANIA SYMULACYJNE STANÓW DYNAMICZNYCH GENERATORA SYNCHRONICZNEGO PRZY WYKORZYSTANIU PARAMETRÓW WYZNACZONYCH METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

**Streszczenie.** Przeprowadzono porównanie modeli obwodowych maszyny synchronicznej dużej mocy (turbogenerators o mocy 200 MW), których parametry elektromagnetyczne wyznaczono na podstawie aproksymacji indukcyjności widmowych obliczonych metodą elementów skończonych. Badania symulacyjne wykonano w dziedzinie częstotliwości i w dziedzinie czasu dla optymalnych zbiorów parametrów elektromagnetycznych otrzymanych w wyniku wcześniejszych badań autorów.

## SIMULATIONS OF SYNCHRONOUS GENERATOR DYNAMIC STATES USING PARAMETERS CALCULATED BY THE FINITE ELEMENT METHOD

**Summary.** The comparison of circuit models of a high-power synchronous machine (200 MW turbogenerator) has been made using electromagnetic parameters obtained from the spectral inductances approximation. These spectral inductances were previously calculated by the finite element method. The simulation investigations have been performed in the frequency and time domains for the optimal set of electromagnetic parameters obtained by the authors in earlier works.

### 1. WSTĘP

Badania symulacyjne stanów dynamicznych maszyn synchronicznych można przeprowadzić przy wykorzystaniu modeli matematycznych, które z różną dokładnością opisują zjawiska elektromagnetyczne występujące w wirniku maszyny. Oddziaływanie prądów wirowych indukowanych w stanie nieustalonym w obwodach elektrycznych wirnika o stałych rozłożonych najdokładniej opisują modele polowo-obwodowe [1] maszyny. Modele

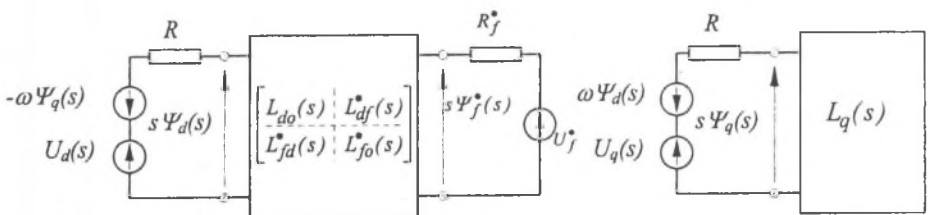
takie wymagają jednak wyznaczania przestrzennego rozkładu pola magnetycznego w maszynie w każdej chwili czasu, powodując znaczne obciążenie zasobów komputera i wydłużenie czasu obliczeń. Znaczące skrócenie czasu obliczeń uzyskuje się stosując modele obwodowe maszyny. Wykorzystywane w badaniach symulacyjnych modele obwodowe maszyny synchronicznej można wyprowadzić z modelu połowo-obwodowego, jako jego przybliżenie. Podstawą takiego przybliżenia są transmitancje operatorowe i odpowiadające im transmitancje widmowe, za pomocą których można opisać model połowo-obwodowy.

W pracy dokonano porównania modeli obwodowych maszyny synchronicznej dużej mocy (turbogeneratorsa o mocy 200 MW), których parametry elektromagnetyczne wyznaczono na podstawie aproksymacji indukcyjności widmowych obliczonych metodą elementów skończonych. Porównanie modeli obwodowych przeprowadzono na podstawie wyników badań symulacyjnych w dziedzinie częstotliwości i w dziedzinie czasu dla optymalnych zbiorów parametrów elektromagnetycznych otrzymanych w wyniku wcześniejszych badań autorów [2-4].

## 2. INDUKCYJNOŚCI WIDMOWE MASZYNY SYNCHRONICZNEJ I ICH APROKSYMACJA

W układzie współrzędnych Parka  $dq$ , model maszyny synchronicznej reprezentowany jest przez czwórnik w osi  $d$  i dwójnik w osi  $q$ , których obwodami wejściowymi są zastępcze uzwojenia twornika w osi  $d$  i  $q$  oraz uzwojenie wzbudzenia (rys. 1).

Dla liniowego obwodu magnetycznego i przy stałej prędkości wirowania wirnika, właściwości dynamiczne czwórника i dwójnika w osiach  $d$  i  $q$  mogą być przedstawione za pomocą indukcyjności operatorowych wyrażających relacje pomiędzy sprzężeniami magnetycznymi a prądami w obwodach maszyny



Rys. 1. Schematy zastępcze maszyny synchronicznej dla indukcyjności operatorowych  
 Fig. 1. Equivalent circuits of the synchronous machine for operational inductances

$$\begin{bmatrix} \Psi_d(s) \\ \Psi_f(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{do}(s) & L_{df}^*(s) \\ L_{fd}^*(s) & L_{fo}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_d(s) \\ I_f^*(s) \end{bmatrix}, \quad \Psi_q(s) = -L_q(s) \cdot I_q(s) \quad (1)$$

przy czym wielkości związane z uzwojeniem wzbudzenia sprowadzone są na stronę twornika.

Indukcyjnościom operatorowym  $L_{do}(s)$ ,  $L_{df}^*(s) = L_{fd}^*(s)$ ,  $L_q(s)$  odpowiadają indukcyjności widmowe, które otrzymuje się przez zastąpienie operatora  $s$  w indukcyjnościach operatorowych zespoloną częstotliwością  $j\omega = jv\omega_n$

$$L(s) \rightarrow L(jv\omega_n) \quad (2)$$

gdzie

$$v = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{f}{f_n} \text{ - częstotliwość względna.}$$

Indukcyjności widmowe maszyny mogą być zmierzone lub obliczone z rozkładów pól magnetycznych wyznaczonych dla poszczególnych częstotliwości [1, 3]. Stanowią one podstawę wyznaczania modeli obwodowych maszyny synchronicznej, w których obwody o stałych rozłożonych wirnika zastąpione są przez kilka zastępczych obwodów elektrycznych o stałych skupionych  $RL$ .

Parametry elektromagnetyczne modeli obwodowych wyznacza się na podstawie aproksymacji indukcyjności widmowych, wyznaczonych metodą elementów skończonych, za pomocą funkcji opisujących te indukcyjności w modelu obwodowym. Jako funkcje aproksymujące wybiera się funkcje wymierne, określające indukcyjności widmowe maszyny za pomocą stałych czasowych

$$\begin{aligned} \underline{L}_{do}(v) &= L_d \prod_{i=1}^{n_d} \left( \frac{1 + jvT_{di}}{1 + jvT_{doi}} \right), & \underline{L}_{df}^*(v) &= L_{df}^* \prod_{i=1}^{n_d} \left( \frac{1 + jvT_{Di\sigma}}{1 + jvT_{doi}} \right), \\ \underline{L}_{fo}^*(v) &= L_f^* \prod_{i=1}^{n_d} \left( \frac{1 + jvT_{fi\sigma}}{1 + jvT_{doi}} \right), & L_q(v) &= L_q \prod_{i=1}^{n_q} \left( \frac{1 + jvT_{qi}}{1 + jvT_{qoi}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie  $n_d$  i  $n_q$  oznaczają liczby zastępczych obwodów tłumiących wirnika w osiach  $d$  i  $q$ .

Zadanie aproksymacji definiuje się jako minimalizację funkcji celu wyrażonej w postaci błędu średniokwadratowego

- w osi  $d$

$$\varepsilon_d(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[ \left| \underline{L}_{do}^{(MES)}(v_i) \right| - \left| \underline{L}_{do}(v_i, \mathbf{P}) \right| \right]^2 + \left[ \left| \underline{L}_{df}^{(MES)}(v_i) \right| - \left| \underline{L}_{df}^*(v_i, \mathbf{P}) \right| \right]^2 \right\}, \quad (4)$$

- w osi  $q$

$$\varepsilon_q(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[ \left| \underline{L}_q^{(MES)}(v_i) \right| - \left| \underline{L}_q(v_i, \mathbf{P}) \right| \right]^2 \right\} \quad (5)$$

gdzie:

$\left| \underline{L}_{do}^{(MES)}(v) \right|$ ,  $\left| \underline{L}_{df}^{(MES)}(v) \right|$ ,  $\left| \underline{L}_q^{(MES)}(v) \right|$  – amplitudy indukcyjności widmowych wyznaczonych metodą elementów skończonych (MES),  
 $\left| \underline{L}_{do}(v, \mathbf{P}) \right|$ ,  $\left| \underline{L}_{df}(v, \mathbf{P}) \right|$ ,  $\left| \underline{L}_q(v, \mathbf{P}) \right|$  – amplitudy indukcyjności widmowych określonych przez stałe czasowe (elementy wektora  $\mathbf{P}$ ).

Do wyznaczenia parametrów elektromagnetycznych modeli obwodowych maszyny synchronicznej wystarczy aproksymacja charakterystyk amplitudowych dwóch indukcyjności widmowych w osi  $d$  ( $\underline{L}_{do}(v)$  i  $\underline{L}_{df}(v)$ ) i charakterystyki amplitudowej indukcyjności widmowej w osi  $q$   $\underline{L}_q(v)$ , ze względu na to, że zera i bieguny indukcyjności widmowych położone są w lewej półpłaszczyźnie liczb zespolonych (indukcyjności widmowe są funkcjami minimalnofazowymi).

Do aproksymacji indukcyjności widmowych zastosowano algorytmy nieliniowej optymalizacji (algorytm Levenberga-Marquardta, algorytm genetyczny, algorytm optymalizacji globalnej) [2–4]. Zastosowanie różnych algorytmów optymalizacyjnych umożliwiło pełniejsze zbadanie właściwości minimalizowanej funkcji celu i wyznaczenie optymalnych zbiorów stałych czasowych badanego generatora synchronicznego dla różnych modeli obwodowych.

### 3. RÓWNANIA MODELU OBWODOWEGO

Równania modelu obwodowego maszyny synchronicznej zawierającego  $n_d$  zastępczych obwodów tłumiących w wirniku w osi  $d$  i  $n_q$  obwodów tłumiących w osi  $q$  mają następującą postać (jedn. wzgl.)

$$\begin{bmatrix} U_s \\ U_{rd} \\ U_{rq} \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_n} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_{rd} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_s \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{srd} & L_{srq} \\ L_{srd}^T & L_{rdrd} & 0 \\ L_{srq}^T & 0 & L_{rqrq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_s \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} (M_m - M_e), \quad \frac{d\delta}{dt} = \omega_n (\omega - 1), \quad M_e = \Psi_d I_q - \Psi_q I_d. \quad (8)$$

gdzie:

- $\omega$  – względna prędkość kątowna wirowania wirnika,
- $\delta$  – kąt obciążenia generatora,
- $\omega_n$  – znamionowa prędkość kątowna synchroniczna,
- $T_J$  – elektromechaniczna stała czasowa turboszespolu,
- $M_e, M_m$  – moment elektromagnetyczny i mechaniczny.

Wektory napięć, strumieni skojarzonych i prądów, oznaczone ogólnie przez  $W$ , mają następującą postać

$$W_s = [W_d \mid W_q]^T, \quad W_{rd} = [W_f^* \mid W_{D1}^* \mid W_{D2}^* \mid \dots \mid W_{Dn_d}^*]^T, \\ W_{rq} = [W_{Q1}^* \mid W_{Q2}^* \mid \dots \mid W_{Qn_q}^*]^T. \quad (9)$$

Macierze występujące w równaniach (6), (7) mają następującą strukturę:

$$K_s = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix}, \quad R_s = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}, \quad L_{ss} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}, \quad (10)$$

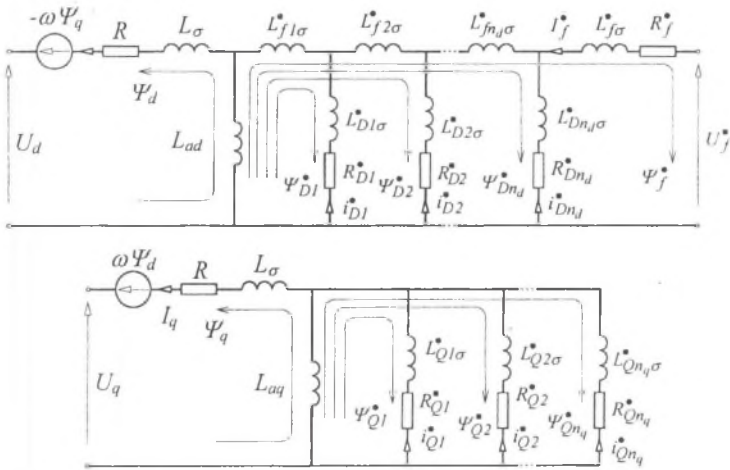
$$R_{rd} = \text{diag}\{R_f^*, R_{D1}^*, R_{D2}^*, \dots, R_{Dn_d}^*\}, \quad R_{rq} = \text{diag}\{R_{Q1}^*, R_{Q2}^*, \dots, R_{Qn_q}^*\}, \quad (11)$$

$$L_{rdrd} = \begin{bmatrix} L_{ad} + L_{f\sigma}^* + \sum_{i=1}^{n_d} L_{f1\sigma}^* & L_{ad} + L_{f1\sigma}^* & L_{ad} + \sum_{i=1}^2 L_{f1\sigma}^* & \dots & L_{ad} + \sum_{i=1}^{n_d} L_{f1\sigma}^* \\ L_{ad} + L_{f1\sigma}^* & L_{ad} + L_{D1\sigma}^* + L_{f1\sigma}^* & L_{ad} + L_{f1\sigma}^* & \dots & L_{ad} + L_{f1\sigma}^* \\ L_{ad} + \sum_{i=1}^2 L_{f1\sigma}^* & L_{ad} + L_{f1\sigma}^* & L_{ad} + L_{D2\sigma}^* + \sum_{i=1}^2 L_{f1\sigma}^* & \dots & L_{ad} + \sum_{i=1}^2 L_{f1\sigma}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{ad} + \sum_{i=1}^{n_d} L_{f1\sigma}^* & L_{ad} + L_{f1\sigma}^* & L_{ad} + \sum_{i=1}^2 L_{f1\sigma}^* & \dots & L_{ad} + L_{Dn_d\sigma}^* + \sum_{i=1}^{n_d} L_{f1\sigma}^* \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$L_{srd} = \begin{bmatrix} L_{ad} & L_{ad} & L_{ad} & \dots & L_{ad} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad L_{srq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ L_{aq} & L_{aq} & \dots & L_{aq} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$L_{rqrq} = \begin{bmatrix} L_{aq} + L_{Q1\sigma}^* & L_{aq} & \dots & L_{aq} \\ L_{aq} & L_{aq} + L_{Q2\sigma}^* & \dots & L_{aq} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{aq} & L_{aq} & \dots & L_{aq} + L_{Qn_q\sigma}^* \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Elementami powyższych macierzy są rezystancje i indukcyjności schematów zastępczych maszyny, przedstawionych na rys.2.



Rys.2. Schematy zastępcze maszyny synchronicznej modelu obwodowego  $(n_d+1, n_q)$   
 Fig.2. Synchronous machine equivalent circuits for the  $(n_d+1, n_q)$  circuit model

#### 4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH W DZIEDZINIE CZĘSTOTLIWOŚCI I W DZIEDZINIE CZASU TURBOGENERATORA O MOCY 200 MW

Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla turbogeneratora TWW-200-2 ( $S_n=235.3$  MV·A,  $P_n=200$  MW,  $U_n=17,75$  kV,  $I_n=8625$  A,  $\cos\varphi_n=0,85$ ). W wyniku aproksymacji indukcyjności widmowych, obliczonych metodą elementów skończonych (MES), wyznaczono zbiory stałych czasowych indukcyjności widmowych modeli obwodowych (tabela 1). Typ modelu obwodowego oznaczono parą liczb  $(n_d+1, n_q)$ , określającą liczbę obwodów elektrycznych w wirniku w osiach  $d$  i  $q$ . W tabeli 2 zamieszczono zbiory parametrów elektromagnetycznych RL modeli obwodowych typu (2,1), (2,2) i (3,3) (jedn. wzgl.), wyznaczone na podstawie stałych czasowych.

Tabela 1

Stałe czasowe indukcyjności widmowych turbogeneratora  
 TWW-200-2 (jedn. wzgl.)

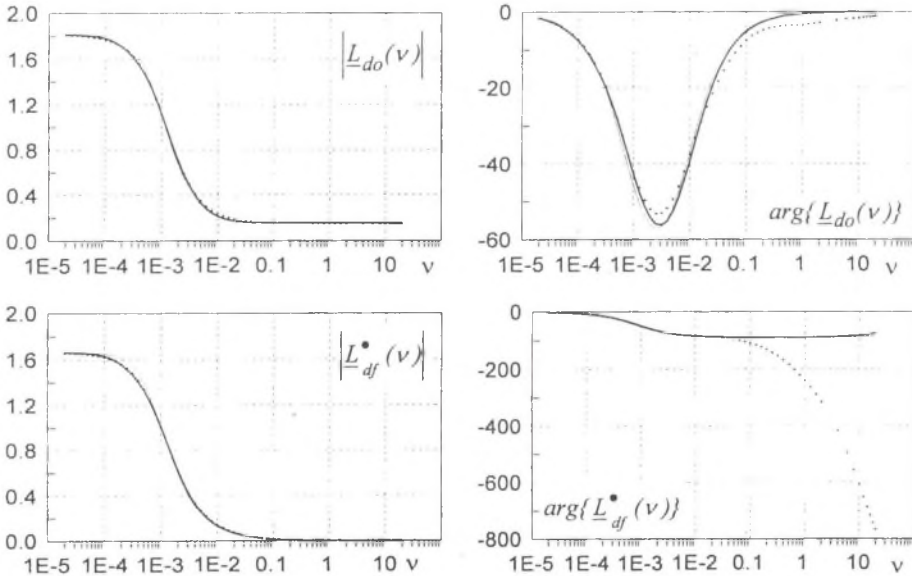
Para- metr	Model (2,1)	Model (2,2)	Model (3,3)	Para- metr	Model (2,1)	Model (2,2)	Model (3,3)
$T_{d01}$	1306.91	1306.91	4010.82	$T_{q01}$	671.4	741.21	3509.16
$T_{d1}$	113.29	113.29	3616.26	$T_{q1}$	84.78	147.07	3061.13
$T_{D1\sigma}$	0.00607	0.00607	3564.07	$T_{q02}$	□	6.104	536.22
$T_{d02}$	□	□	1076.85	$T_{q2}$	□	2.600	110.26
$T_{d2}$	□	□	101.594	$T_{q03}$	□	□	3.81
$T_{D2\sigma}$	□	□	0.01501	$T_{q3}$	□	□	1.716

Tabela 2

Parametry elektromagnetyczne schematów zastępczych turbogeneratora  
TWW-200-2 (jedn. wzgl.)

Para- metr	Model (2,1)	Model (2,2)	Model (3,3)	Para- metr	Model (2,1)	Model (2,2)	Model (3,3)
$L_{11\sigma}^*$	0.00719	0.00719	0.15866	$L_{Q1\sigma}^*$	0.07727	0.25313	11.7925
$L_{D1\sigma}^*$	$7.75 \cdot 10^{-6}$	$7.75 \cdot 10^{-6}$	21.4807	$R_{Q1}^*$	0.00253	0.00268	0.00413
$R_{D1}^*$	0.00128	0.00128	0.00603	$L_{Q2\sigma}^*$	□	-0.00018	0.20827
$L_{f2\sigma}^*$	□	□	-0.1533	$R_{Q2}^*$	□	0.033819	0.00316
$L_{D2\sigma}^*$	□	□	0.00002	$L_{Q3\sigma}^*$	□	□	-0.0064
$R_{D2}^*$	□	□	0.00137	$R_{Q3}^*$	□	□	0.04351
$L_{f\sigma}^*$	0.092810	0.092810	0.09469				
$R=0.00181$			$L_d=1.813$				
$R_f=0.00122$			$L_q=1.772$			$L_\sigma=0.15$	

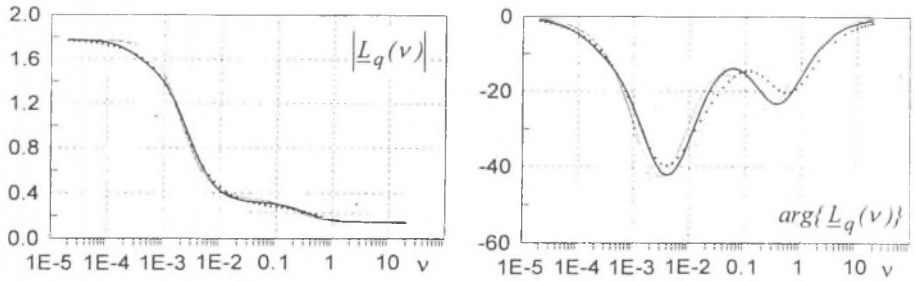
Na rys. 3 i 4 przedstawiono porównanie charakterystyk amplitudowych i fazowych indukcyjności widmowych generatora obliczonych metodą elementów skończonych (MES) i obliczonych na podstawie rozpatrywanych modeli obwodowych.



Rys.3. Charakterystyki amplitudowe i fazowe indukcyjności widmowych w osi *d* turbogeneratora TWW-200-2

Fig.3. Magnitude and phase characteristics of the *d*-axis spectral inductances of the TWW-200-2 turbogenerator

..... MES      ———  $n_d=1$       ———  $n_d=2$   
 ..... FEM      ———  $n_d=1$       ———  $n_d=2$



Rys.4. Charakterystyki amplitudowe i fazowe indukcyjności widmowych w osi  $q$  turbogenerators TWW-200-2.

Fig.4. Magnitude and phase characteristics of the  $q$ -axis spectral inductances of the TWW-200-2 turbogenerator

..... MES  $n_q=1$  —  $n_q=2$  —  $n_q=3$   
 ..... FEM  $n_q=1$  —  $n_q=2$  —  $n_q=3$

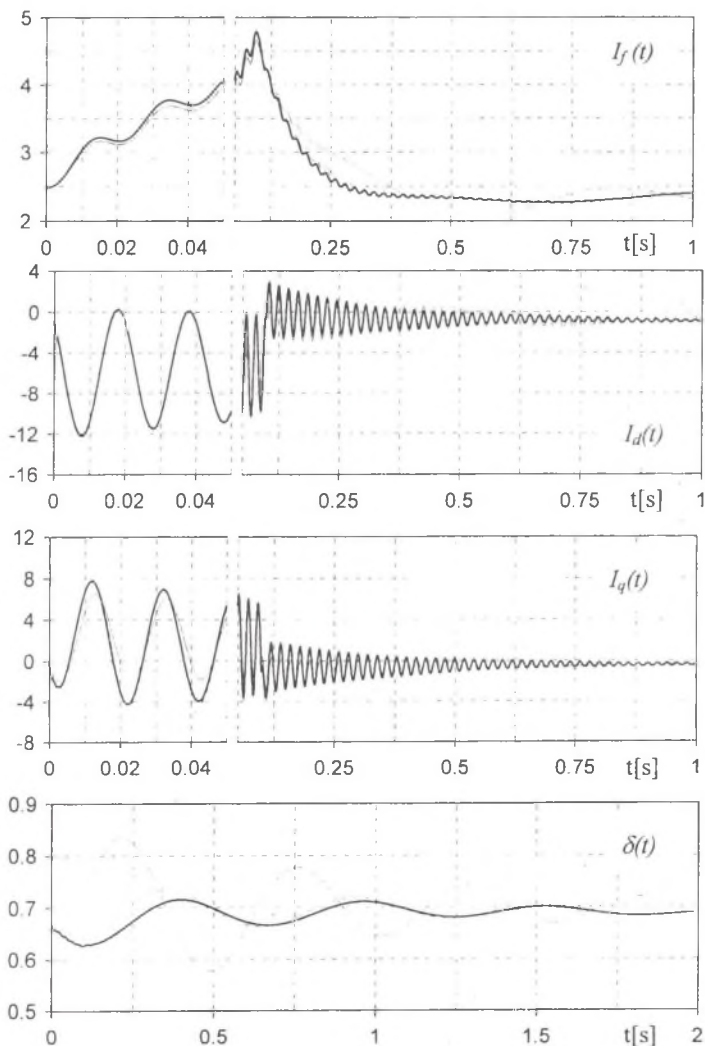
Na rys. 5 zamieszczono przebiegi czasowe prądu w uzwojeniu wzbudzenia, prądów w uzwojeniu twornika w osiach  $d$  i  $q$  oraz kąta obciążenia podczas trójfazowego przemijającego zwarcia na zaciskach twornika ze stanu obciążenia znamionowego badanego turbogenerators. Z przedstawionych wykresów wynika, że przebiegi nieustalone prądów w uzwojeniach maszyny, obliczone na podstawie modeli (2,2) i (3,3), różnią się bardzo niewiele. Nieco większe różnice obserwuje się w przebiegu kąta obciążenia. Zastosowanie modelu (2,1) prowadzi do znacznych różnic w przebiegach prądu twornika w osi  $q$  i prądu wzbudzenia i w konsekwencji do bardzo dużych różnic w przebiegu kąta obciążenia.

## 5. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych stanów dynamicznych turbogenerators o mocy 200 MW, przeprowadzonych przy wykorzystaniu obwodowych modeli matematycznych, których parametry elektromagnetyczne zostały wyznaczone metodą elementów skończonych na podstawie danych konstrukcyjnych i projektowych maszyny. W badaniach porównano klasyczne modele typu (2,1) i (2,2) oraz model wyższego rzędu typu (3,3). W badaniach wykonanych w dziedzinie częstotliwości porównano charakterystyki częstotliwościowe indukcyjności widmowych obliczone na podstawie modeli obwodowych z charakterystykami obliczonymi metodą elementów skończonych. Z przedstawionych wykresów wynika, że

- odwzorowanie charakterystyk fazowych przez modele obwodowe obarczone jest większym błędem niż odwzorowanie charakterystyk amplitudowych,





Rys.5. Przebiegi czasowe prądu w uzwojeniu wzbudzenia  $I_f$ , prądu w uzwojeniu twornika  $I_d$  i  $I_q$  oraz kąta obciążenia  $\delta$  podczas trójfazowego przemijającego zwarcia na zaciskach twornika turbogeneratora TWW-200-2 (czas wyłączenia zwarcia  $t_z=0.1$ s; jedn. wzgl.)  
 Model: — (3,3) - - - (2,2) ..... (2,1)

Fig.5. Waveforms of the field current  $I_f$ , the armature currents  $I_d$ ,  $I_q$  and the power angle  $\delta$  during 3-phase transient short-circuit and subsequent clearing at the stator terminals for the TWW-200-2 turbogenerator (clearing time  $t_z=0.1$ s; p.u.)  
 Model: — (3,3) - - - (2,2) ..... (2,1)

- do odwzorowania indukcyjności widmowych w osi poprzecznej  $q$  należy przyjmować przynajmniej dwa zastępcze obwody tłumiące w tej osi,
- dobrą aproksymację indukcyjności widmowych w osi podłużnej  $d$  zapewnia model zawierający jeden lub dwa zastępcze obwody tłumiące w tej osi.

Badania przeprowadzone w dziedzinie czasu potwierdziły wnioski z badań w dziedzinie częstotliwości. Z porównania przebiegów czasowych prądów w uzwojeniach maszyny i kąta obciążenia generatora w czasie trójfazowego zwarcia na zaciskach twornika wynika, że model (2,2) zapewnia podobną dokładność odwzorowania zjawisk przejściowych w maszynie co model (3,3). Do badań symulacyjnych stanów dynamicznych badanego turbogeneratorsa wystarcza przyjmowanie modelu typu (2,2).

## LITERATURA

1. Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Polowo-obwodowy model matematyczny generatora synchronicznego w dziedzinie częstotliwości. *Prace Naukowe "Elektryka"* z.111, Oficyna Wydawnicza Pol. Warsz., Warszawa 1999, s. 61-70.
2. Boboń A., Kudła J., Ondrusek C.: Wykorzystanie algorytmu genetycznego do estymacji parametrów elektromagnetycznych obwodowych modeli matematycznych generatorów synchronicznych, *Prace Naukowe "Elektryka"* z.111, Oficyna Wydawnicza Pol. Warsz., z. 111, Warszawa 1999, s. 71-80.
3. Boboń A., Kudła J., Ondrusek C.: Electromagnetic Parameters Estimation of Synchronous Machine Mathematical Models using Genetic Algorithm. *International Workshop on Electrical Machines*, 8-9 Sept. 1999, Prague., pp. 95-104.
4. Boboń A., Kudła J., Ondrusek C.: Zastosowanie algorytmu genetycznego i metody Levenberga-Marquardta do aproksymacji indukcyjności widmowych maszyny synchronicznej. *Zeszyty Naukowe Pol. Śl. ser. Elektryka*, z. 168, Gliwice 1999, s.113-124.
5. Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Transmitancje widmowe turbogeneratorsa o mocy 200 MW wyznaczone metodą elementów skończonych. *Zeszyty Naukowe Pol. Śl. ser. Elektryka*, z. 168, Gliwice 1999, ss.83-96.
6. Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Parametry elektromagnetyczne maszyny synchronicznej. Wykorzystanie metody elementów skończonych. *Monografia*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
7. Boboń A., Kudła J., Ondrusek C.: Approximation of Synchronous Machine Spectral Transfer Functions when using the Genetic Algorithm and Levenberg-Marquardt Method, *International Workshop on Electrical Machines*, 7-8 Sep. 1998, Prague, pp. 111-119.
8. Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Determination of Spectral Transfer Functions of a Synchronous Machine by the Finite Element Method. *International Workshop on Electrical Machines*, 7-8 Sept. 1998, Prague pp. 102-110.
9. Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Mathematical Models of Synchronous Generators used in Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems. *International Workshop on Electrical Machines*, 10-11 Sept. 1997, Prague pp.7-16.

10. Żywiec A., Kudła J., Boboń A.: Ocena przydatności modeli matematycznych generatorów synchronicznych w badaniach stabilności lokalnej systemu elektroenergetycznego. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. ser. Elektryka, z. 159, s. 103-114, Gliwice 1997.
11. Boboń A.: Kudła J., Żywiec A.: Validation of the High-Order Mathematical Models of Turbogenerators in Investigations of Dynamic Performances of Power Systems. International Workshop on Electrical Machines, 11-12 Sep 1996, Prague, pp.110-119.
12. Sharma D.K., Baker D.H., Dougherty J.W., Kankam M., Minnich S.H., Schulz R.P.: Generator Simulation-Model Constants by Finite Elements: Comparison with Test Results. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol.104, No.7, 1985, pp.1812-1821

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Roman Nadolski

Wpłynęło do Redakcji dnia 5 maja 2000 r.

## Abstract

Simulations of dynamic states of a 200 MW turbogenerator basing on circuit models are presented in the paper. Electromagnetic parameters of these models are determined from the approximation of spectral inductances which were calculated by the finite element method. Equations of the general circuit model of the synchronous machine containing  $n_d$  equivalent damper circuits in  $d$ -axis and  $n_q$  equivalent damper circuits in  $q$ -axis are given. Classical mathematical models of the (2,1) and (2,2) types, as well as the high-order model of the (3,3) type are compared in the simulations. In the frequency-domain investigations, comparison of the spectral inductance frequency characteristics calculated by the finite element method with the corresponding characteristics calculated from the circuit models is made. In the time-domain investigations the waveforms of winding currents and the load angle during a 3-phase fault at the armature terminals are compared. From the presented plots it follows that:

- approximation of phase characteristics by circuit models is loaded by greater error than approximation of amplitude characteristics,
- in order to obtain the satisfactory approximation of  $q$ -axis spectral inductances at least two equivalent damper circuits in the  $q$  axis should be assumed,

- good approximation of  $d$ -axis spectral inductances assures the model consisting of one or two equivalent damper circuits in the  $d$  axis.

For transient state simulations of the examined turbogenerator, the model of (2,2) type is sufficient.