

Andrzej BOBÓŃ\*, Jerzy KUDŁA\*\*

## ZASTOSOWANIE METOD POŁOWYCH I OBWODOWYCH DO WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH\*\*\*

**Streszczenie:** Przedstawiono model polowo-obwodowy oraz przybliżony model obwodowy generatora synchronicznego umożliwiające obliczenia wielkości i charakterystyk maszyny w stanie ustalonym na podstawie danych projektowo-konstrukcyjnych przy uwzględnieniu nieliniowych charakterystyk magnesowania rdzeni magnetycznych. Dla modelu polowo-obwodowego obliczenia wykonywane są iteracyjną metodą Newtona-Raphsona. W obliczeniach wykonywanych na podstawie przybliżonego modelu obwodowego korzysta się z wyznaczonych a priori syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych. Przykładowe wyniki obliczeń podano dla turbogeneratora TWW-200-2 o mocy 200 MW.

## APPLICATION OF FIELD-CIRCUIT AND CIRCUIT METHODS TO DETERMINE THE STEADY STATE CHARACTERISTICS OF SYNCHRONOUS GENERATORS

**Summary:** A field-circuit model as well as an approximate circuit model of the synchronous generator are presented. These models enable to compute the steady state characteristics, taking into account the non-linear magnetization curves of the machine magnetic cores. For the field-circuit model the field as well as circuit equations are solved simultaneously using the iterative loop and the Newton-Raphson method. For the approximate circuit model, computations are carried out basing on the synthetic characteristics of flux linkages. Example results of calculations for the 200 MW turbogenerator are given.

**Key words:** synchronous machines, turbogenerators, field-circuit model, static characteristics, magnetic circuit saturation, finite element method

### 1. WSTĘP

Właściwości generatorów synchronicznych pracujących w systemie elektroenergetycznym w ustalonym symetrycznym stanie pracy ocenia się często na podstawie charakterystyk wyznaczonych dla generatora współpracującego z siecią sztywną, zastępującą w przybliżeniu system elektroenergetyczny. Najczęściej właściwości generatora synchronicznego współpracującego z siecią sztywną określa się na podstawie charakterystyk kątowych oraz tak zwanych krzywych V. Przebieg tych charakterystyk zależy od stanu nasycenia rdzeni magnetycznych stojana i wirnika, dlatego też przy ich wyznaczaniu na podstawie równań maszyny konieczne jest uwzględnienie zjawiska nasycenia. Zjawisko nasycenia powoduje, że strumienie magnetyczne sprzężone z obwodami stojana w osiach d i q są nieliniowymi funkcjami obu składowych osiowych prądu stojana oraz prądu wzbudzenia:

$$\Psi_d = \Psi_d(I_d, I_q, I_f^*) , \quad \Psi_q = \Psi_q(I_d, I_q, \bar{I}_f^*) . \quad (1)$$

W konsekwencji przykładowy układ nieliniowych równań algebraicznych wykorzystywany do obliczeń charakterystyk kątowych przyjmuje postać:

\* Dr inż., Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10a, tel. (+48)(+32) 2371447, fax (+48)(+32) 2371447, e-mail: a\_bobon@kmiue.elekt.polsl.gliwice.pl

\*\* Dr inż., Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10a, tel. (+48)(+32) 2371447, fax (+48)(+32) 2371447, e-mail: j\_kudla@kmiue.elekt.polsl.gliwice.pl

\*\*\* Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego nr 8 T10A 05618, finansowanego w latach 2000-2001 przez KBN

$$U \sin(\delta) = R I_d - \omega \Psi_q(I_d, I_q, i_f^*), \quad U \cos(\delta) = R I_q + \omega \Psi_d(I_d, I_q, i_f^*), \quad (2)$$

Rozwiązanie nieliniowego układu równań wymaga znajomości charakterystyk sprzężeń magnetycznych. Wyznaczenie a priori tych charakterystyk dla spodziewanego zakresu zmian wartości prądów stojana i wzbudzenia jest czasochłonne, zaś posługiwanie się tymi charakterystykami aproksymowanymi przez wielowymiarowe funkcje (np. funkcje sklepane) – trudne.

W konsekwencji wygodniej jest w takim przypadku rozwiązywać jednocześnie równania obwodowe stojana i równania pola magnetycznego wewnątrz maszyny, czyli korzystać z modelu polowo-obwodowego [1], [2], [3], [6]. Alternatywnym podejściem jest skorzystanie z zasady rozdziału wypadkowego pola magnetycznego w maszynie na pole główne oraz pola rozprożeń i przybliżone wyznaczenie sprzężeń magnetycznych obwodów stojana w postaci sumy sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego głównego i pola rozproszenia stojana

$$\Psi_d = \Psi_{osd}(I_d, I_q) + \Psi_{md}(I_d, I_q, i_f^*), \quad \Psi_q = \Psi_{osq}(I_d, I_q) + \Psi_{mq}(I_d, I_q, i_f^*). \quad (3)$$

Dla powyższych składowych można znacznie prościej wyznaczyć odpowiednie charakterystyki sprzężeń magnetycznych. Znając te charakterystyki, można bezpośrednio wykorzystywać równania obwodowe (2) do wyznaczenia stanu ustalonego maszyny synchronicznej [4], [5], [7].

W pracy przedstawiono model polowo-obwodowy oraz przybliżony model obwodowy maszyny synchronicznej uwzględniające wpływ nasycania się rdzeni magnetycznych. W obliczeniach przeprowadzonych na podstawie danych projektowo-konstrukcyjnych maszyny wykorzystano metodę elementów skończonych. Wyniki obliczeń w postaci charakterystyk kątowych oraz krzywych  $V$  podano dla turbogeneratorsa TWW-200-2 o mocy 200 MW.

## 2. OBLICZANIE CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH MASZYNY SYNCHRONICZNEJ PRZY WYKORZYSTANIU MODELU POLOWO-OBWODOWEGO

Model polowo-obwodowy dla stanu ustalonego maszyny synchronicznej tworzą [2], [3]:

- równania obwodów elektrycznych maszyny (2), w których sprzężenia magnetyczne stojana w osi  $d$  i  $q$  są nieliniowymi funkcjami prądów w uzwojeniach,
- równania różniczkowe cząstkowe opisujące rozkład pola magnetostatycznego w maszynie

$$\operatorname{rot} \left( \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (4)$$

gdzie:

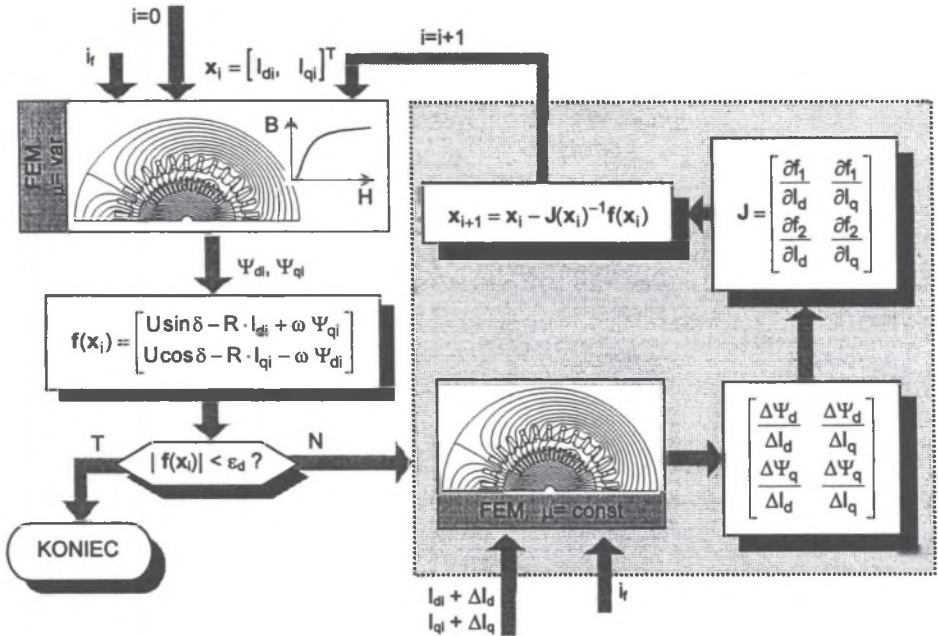
- $\mathbf{A}$  – wektorowy potencjał magnetyczny związany z wektorem indukcji  $\mathbf{B}$  relacją  $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$ ,
- $\mathbf{J}$  – wektor gęstości prądu w obszarach zajętych przez uzwojenia,
- $\mu$  – przenikalność magnetyczna będąca nieliniową funkcją natężenia pola magnetycznego  $H$ .

Równania obwodowe i polowe są ze sobą związane i muszą być rozwiązywane jednocześnie. W przypadku gdy do obliczeń rozkładów pól magnetycznych w maszynie wykorzystywany jest niezależny program metody elementów skończonych, wtedy obliczenia modelu polowo-obwodowego przeprowadza się poprzez sekwencyjne rozwiązywanie w pętli iteracyjnej równań polowych i obwodowych.

Algorytm rozwiązywania modelu polowo-obwodowego oraz jego implementacja w programie komputerowym zależy od rodzaju wyznaczanych charakterystyk statycznych maszyny. Przedstawiony niżej algorytm umożliwia obliczanie charakterystyk kątowych momentu elektromagnetycznego. Do rozwiązania równań polowo-obwodowych zastosowano iteracyjną metodę Newtona-Raphsona. Schemat algorytmu obliczania określonego punktu charakterystyki przedstawiono na rys. 1.

W obliczeniach charakterystyk kątowych ustalony punkt pracy (punkt charakterystyki) określony jest przez napięcie stojana  $U$ , prąd wzbudzenia  $i_f$  i kąt obciążenia  $\delta$ . Zgodnie z metodą Newtona-Raphsona, nieliniowy układ równań postaci

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = 0 \quad (6)$$



Rys. 1. Algorytm obliczeń punktu charakterystyki kątowej momentu elektromagnetycznego  
 Fig. 1. Algorithm of calculating a point of a torque-angle characteristic

rozwiązywany jest w pętli iteracyjnej, przy czym kolejne przybliżenia rozwiązania wyznaczane są z zależności

$$x_{i+1} = x_i - J(x_i)^{-1} f(x_i) \tag{7}$$

gdzie:

$x_i$  – wektor prądów twornika w osi d i q w i-tej iteracji

$$x_i = [I_{di}, I_{qi}]^T,$$

$J$  – jacobian

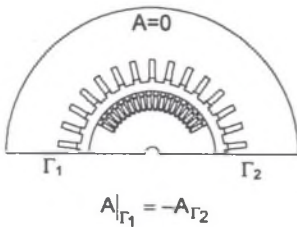
$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial I_d} & \frac{\partial f_1}{\partial I_q} \\ \frac{\partial f_2}{\partial I_d} & \frac{\partial f_2}{\partial I_q} \end{bmatrix}, \tag{8}$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \sin(\delta) - R I_d + \omega \Psi_q \\ U \cos(\delta) - R I_q - \omega \Psi_d \end{bmatrix}. \tag{9}$$

Działanie algorytmu rozpoczyna się od wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego w maszynie dla przyjętych początkowych wartości prądów w uzwojeniach (punkt startowy). Przybliżone wartości tych prądów można uzyskać z równań napięciowo-prądowych maszyny dla przybliżonych wartości strumieni magnetycznych w osi d i q określonych na przykład dla standardowych indukcyjności maszyny

$$\Psi_d = L_{dI_d} + L_{ad} i_r^*, \quad \Psi_q = L_{qI_q}. \tag{10}$$

Równania pola (4) rozwiązywane są metodą elementów skończonych w obszarze przekroju poprzecznego generatora synchronicznego obejmującego jedną podziałkę biegunową, dla warunków brzegowych przedstawionych na rys. 2.



Rys. 2. Warunki brzegowe przyjęte w obliczeniach rozkładu pola magnetycznego w generatorze synchronicznym

Fig. 2. Boundary conditions applied to magnetic field computations in a synchronous generator

Na podstawie wyznaczonego rozkładu potencjału magnetycznego  $A$ , obliczane są strumienie magnetyczne sprzężone z uzwojeniami fazowymi twornika ( $k=1,2,3$ )

$$\Psi_k = \frac{2p l_z z_z}{s_p} \sum_{i=1}^{N_z} \left( \int_{s_p} A_{1i(k)} ds - \int_{s_p} A_{2i(k)} ds \right) \quad (11)$$

gdzie:

$p$  – liczba par biegunów,  $l_z$  – długość czynna boków zwojów,  $z_z$  – liczba szeregowo połączonych zwojów w zezwoju,  $s_p$  – powierzchnia przekroju poprzecznego pręta zezwoju,  $N_z$  – liczba zezwojów połączonych szeregowo w uzwojeniu,  $A_1, A_2$  – wektorowy potencjał magnetyczny w miejscach położenia lewego i prawego boku zezwoju.

Następnie obliczane są sprzężenia magnetyczne stojana w osi  $d$  i  $q$

$$\Psi_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \sum_{k=1,2,3} \Psi_k \cos \vartheta_k, \quad \Psi_q = -\sqrt{\frac{2}{3}} \sum_{k=1,2,3} \Psi_k \sin \vartheta_k \quad (12)$$

gdzie:

$\vartheta_k$  – kąt między osią  $k$ -tej fazy uzwojenia twornika a osią  $d$ .

Jak wynika ze wzoru Newtona-Raphsona (7), do wyznaczenia następnego przybliżenia rozwiązania konieczne jest wyznaczenie jakobianu (8). Uwzględniając (9), jakobian określony jest przez zależność

$$\mathbf{J} = - \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_d}{\partial I_d} & \frac{\partial \Psi_d}{\partial I_q} \\ \frac{\partial \Psi_q}{\partial I_d} & \frac{\partial \Psi_q}{\partial I_q} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Pochodne sprzężeń magnetycznych stojana w osi  $d$  i  $q$  względem prądów stojana w osi  $d$  i  $q$  mogą być przybliżone przez odpowiednie ilorazy różnicowe, które mogą być wyznaczone z rozkładu pola magnetycznego obliczonego dla zaburzonej wartości prądu stojana w osi  $d$  i  $q$  (rys. 1). Obliczenia rozkładu pola magnetycznego mogą być przeprowadzone dla liniowego obwodu magnetycznego maszyny o ustalonym („zamrożonym”) rozkładzie przenikalności magnetycznych wyznaczonym z rozkładu pola magnetycznego dla nieliniowego obwodu magnetycznego.

Wyjście z pętli algorytmu następuje po uzyskaniu rozwiązania spełniającego nieliniowe równania (6) zadaną dokładnością.

### 3. WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH SPRZĘŻENI MASZYNY SYNCHRONICZNEJ PRZY WYKORZYSTANIU PRZYBLIŻONEGO MODELU OBWODOWEGO

Wyznaczenie a priori charakterystyk sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego głównego oraz pola rozproszenia stojana wymaga przyjęcia do rozważań modeli obliczeniowych maszyny, w których pola te występują samodzielnie bądź też są dominujące [4], [5].

Uwzględniając, że w normalnych ustalonych warunkach pracy, prądy stojana maszyny nie przekraczają wartości znamionowych, można z dobrą dokładnością przyjąć, że dla pola rozproszenia stojana rdzeń stojana jest nienasycony. W konsekwencji charakterystyki sprzężeń magnetycznych tego pola określone są za pomocą nienasyconej indukcyjności rozproszenia stojana:

$$\Psi_{osd} = L_{os} I_d,$$

$$\Psi_{osq} = L_{os} I_q. \quad (14)$$

Wprowadzając do rozważań pojęcia uzwojeń magnesujących oraz prądu magnesującego, wytwarzających pole magnetyczne główne, wyrażenia na sprzężenia magnetyczne tego pola można zapisać w postaci [5]

$$\Psi_{md}(I_d, I_q, I_f^*) = \Psi_{md}(I_{md}, I_{mq}) = \Psi_{md}(I_m, \gamma_m),$$

$$\Psi_{mq}(I_d, I_q, I_f^*) = \Psi_{mq}(I_{md}, I_{mq}) = \Psi_{mq}(I_m, \gamma_m). \quad (15)$$

W stanie ustalonym składowe osiowe prądu magnesującego oraz moduł i argument jego fazora przestrzennego wynoszą:

$$I_{md} = I_d + I_f^* = I_m \cos(\gamma_m),$$

$$I_{mq} = I_q = I_m \sin(\gamma_m),$$

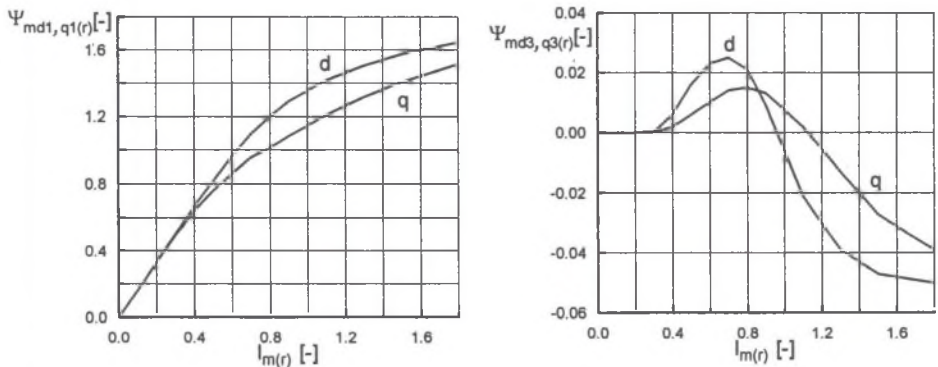
$$I_m = \sqrt{(I_d + I_f^*)^2 + I_q^2},$$

$$\gamma_m = \arctg\left(\frac{I_q}{I_d + I_f^*}\right). \quad (16)$$

Wprowadzenie do rozważań pojęcia uzwojeń magnesujących oraz prądu magnesującego nie tylko redukuje liczbę zmiennych niezależnych determinujących nieliniowe charakterystyki sprzężeń magnetycznych, ale także umożliwia określenie właściwości tych funkcji [5], na podstawie których charakterystyki te można z dobrą dokładnością przedstawić w postaci szeregu

$$\Psi_{md}(I_m, \gamma_m) = \sum_{i=1,3..} \Psi_{mdi}(I_m) \cos(i\gamma_m), \quad \Psi_{mq}(I_m, \gamma_m) = \sum_{i=1,3..} \Psi_{mqi}(I_m) \sin(i\gamma_m). \quad (17)$$

Nieliniowe współczynniki funkcyjne  $\Psi_{mdi}(I_m)$ ,  $\Psi_{mqi}(I_m)$  występujące w tych szeregach – w dalszej części pracy – przyjęto nazywać syntetycznymi charakterystykami sprzężeń magnetycznych. W praktycznych zastosowaniach zwykle jeden bądź dwa wyrazy w szeregu, z wystarczającą dokładnością aproksymują charakterystyki sprzężeń magnetycznych. Syntetyczne charakterystyki dla turbogeneratora TWW-200-2 przedstawiono na rys. 3.



Rys.3. Syntetyczne charakterystyki sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego głównego  
Fig. 3. Synthetic characteristics of flux linkages for the main magnetic field

Uwzględniając relacje (14), (17), równania maszyny synchronicznej stosowane do obliczeń charakterystyk kątowych przyjmują postać

$$\begin{bmatrix} U \sin(\delta) \\ U \cos(\delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega L_{\sigma s} \\ \omega L_{\sigma s} & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega \sum_{i=1,3} \Psi_{mqi}(I_m) \sin(i\gamma_m) \\ \omega \sum_{i=1,3} \Psi_{mdi}(I_m) \cos(i\gamma_m) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Przy rozwiązywaniu powyższego układu równań dla zadanych wartości kąta obciążenia, prądu wzbudzenia oraz napięcia wygodnie jest raczej poszukiwać modułu prądu magnesującego i jego argumentu aniżeli prądów stojana w osi d i q. W konsekwencji nieliniowy układ równań przyjmuje postać:

$$f(x) = \begin{bmatrix} U \sin(\delta) - R(I_m \cos(\gamma_m) - i_f^*) + \omega L_{os} I_m \sin(\gamma_m) + \omega \sum_{i=1,3} \Psi_{mqi}(I_m) \sin(i\gamma_m) \\ U \cos(\delta) - \omega L_{os} (I_m \cos(\gamma_m) - i_f^*) - R I_m \sin(\gamma_m) - \omega \sum_{i=1,3} \Psi_{mdi}(I_m) \cos(i\gamma_m) \end{bmatrix} = 0 \quad (19)$$

gdzie:

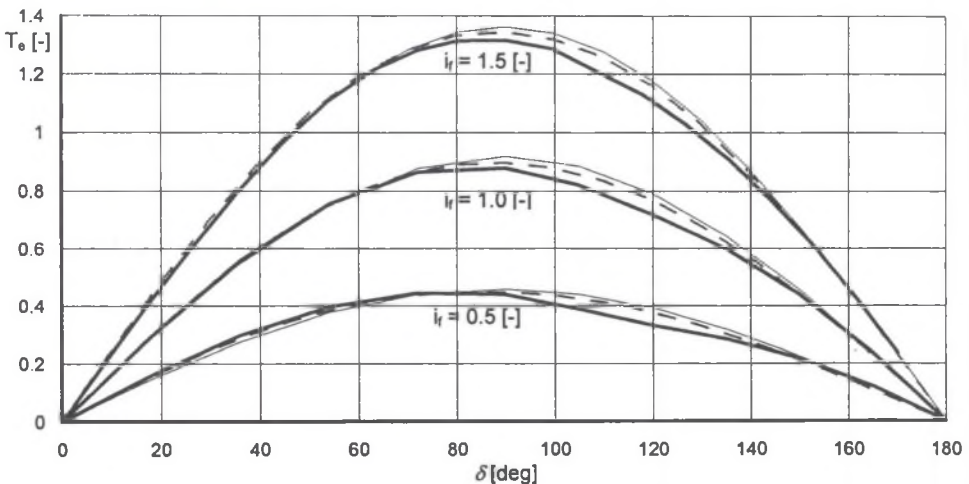
$$x = [I_m \ \gamma_m]^T.$$

Układ równań (19) można rozwiązać stosując metodę Newtona-Raphsona lub też inne metody zaimplementowane w programach komputerowych służących do obliczeń naukowo-technicznych, takich jak Matlab i Mathcad. W programach tych rozwiązanie nieliniowego układu równań algebraicznych sprowadzone jest do zagadnienia minimalizacji błędu średniokwadratowego rozwiązywanego za pomocą metody Gaussa-Newtona, Levenberga-Marquardta i innych.

#### 4. WYNIKI OBLICZEŃ CHARAKTERYSTYK STANU USTALONEGO GENERATORA SYNCHRONICZNEGO

Obliczenia charakterystyk statycznych przeprowadzono dla turbogeneratorsa TWW-200-2 ( $S_n=235.3$  MV-A,  $P_n=200$  MW,  $U_n=15.75$  kV,  $I_n=8625$  A,  $\cos\phi_n=0.85$ ).

Na rys. 4, 5 przedstawiono wybrane charakterystyki: kątowemu momentu elektromagnetycznego, oraz krzywe V obliczone przy wykorzystaniu modelu połowo-obwodowego i przybliżonego modelu obwodowego badanego turbogeneratorsa. Przedstawione na wykresach charakterystyki porównano z charakterystykami wyznaczonymi dla nienasyconego obwodu magnetycznego maszyny.

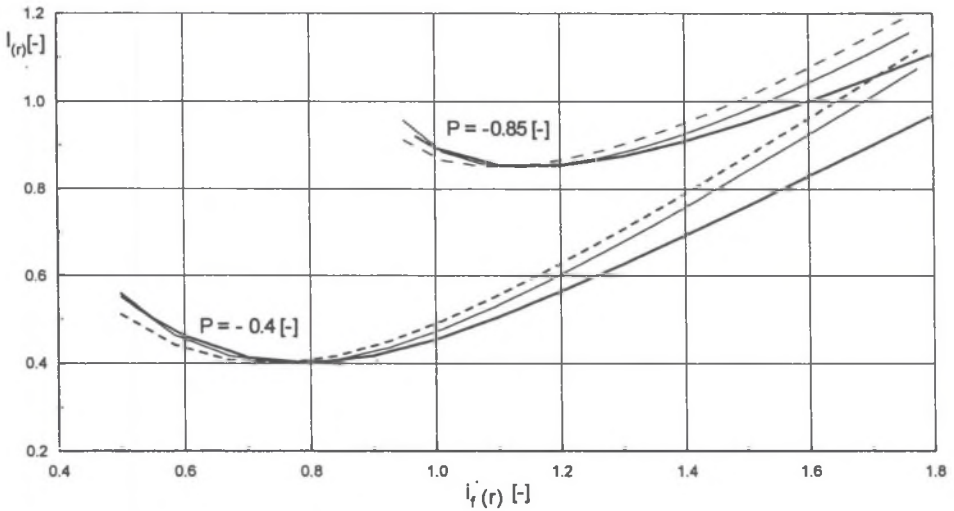


Rys. 4. Charakterystyki kątowe momentu elektromagnetycznego turbogeneratorsa TWW-200-2 dla napięcia twornika  $U=1$  [jedn. wzgl.]

————— model połowo-obwodowy      - - - - - model obwodowy      ——— nienasycony obwód magnetyczny

Fig. 4. Torque-angle characteristics of the TWW-200-2 turbogenerator for the armature voltage  $U=1$  [p.u.]

————— field-circuit model      - - - - - circuit model      ——— unsaturated magnetic circuit

Rys. 5. Krzywe V turbogenerators TWW-200-2 dla napięcia twornika  $U=1$  [jedn. wzgl.]

———— model polowo-obwodowy      ———— model obwodowy      - - - - nienasycony obwód magnetyczny

Fig. 5. V-curves of the TWW-200-2 turbogenerator for the armature voltage  $U=1$  [p.u.]

———— field-circuit model      ———— circuit model      - - - - unsaturated magnetic circuit

## 5. WNIOSKI

Przedstawione w pracy modele maszyny synchronicznej: polowo-obwodowy i przybliżony obwodowy, umożliwiają uwzględnienie wpływu zjawiska nasycenia się rdzeni magnetycznych na wielkości i charakterystyki maszyny w symetrycznych stanach ustalonych.

Na podstawie zamieszczonych charakterystyk można zauważyć, że dla rozpatrywanego generatora zasilanego z sieci sztywnej o napięciu znamionowym różnice pomiędzy charakterystykami obliczonymi przy wykorzystaniu modelu polowo-obwodowego, przybliżonego modelu obwodowego oraz modelu, w którym pomija się zjawisko nasycenia, są nieznaczne. Dotyczy to w szczególności charakterystyk kątowych momentu elektromagnetycznego generatora, gdzie różnice zauważalne między modelami pojawiają się w zakresie jego pracy niestabilnej. Większe różnice między charakterystykami można zaobserwować dla krzywych V, dla których maksymalny błąd pomiędzy charakterystykami uzyskanymi dla modelu polowo-obwodowego a charakterystykami uzyskanymi dla modelu obwodowego nie uwzględniającego zjawiska nasycenia osiąga wartość około 15%. Zastosowanie przybliżonego obwodowego modelu matematycznego maszyny uwzględniającego zjawiska nasycenia, do wyznaczania charakterystyk stanu ustalonego pozwala zredukować maksymalny błąd do około 10%, przy czym w zakresie stanu niedowzbudzenia generatora różnice pomiędzy modelem polowo-obwodowym i przybliżonym obwodowym są niewielkie. Stosowanie modelu polowo-obwodowego wymaga dużych nakładów obliczeniowych i zwykle model ten służy do weryfikacji i oceny wiarygodności prostszych przybliżonych modeli obwodowych. Modele polowo-obwodowe mogą być wykorzystane w obliczeniach maszyn synchronicznych przy znajomości ich danych projektowo-konstrukcyjnych. Znacznie szerszy jest zakres wykorzystania przybliżonych modeli obwodowych, w których syntetyczne charakterystyki dla pola głównego można nie tylko obliczyć z danych konstrukcyjnych, ale także estymować na podstawie pomiarów wykonanych na obiekcie rzeczywistym.

## LITERATURA

1. Ashtiani C.N., Lowther D.A.: The Use of Finite Elements in the Simulation of the Steady State Operation of a Synchronous Generator with a Known Terminal Loading condition. IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-19, No.6, Nov. 1983, pp.2381-2383.
2. Boboń A.: Determination of Steady-State Parameters and Characteristics of a Synchronous Machine using Finite Element Method. International Workshop on Electrical Machines, 13-14 Sep 2000, Prague., pp.119-126.
3. Boboń A.: Metoda polowo-obwodowa wyznaczania parametrów i charakterystyk maszyny synchronicznej w ustalonym stanie obciążenia. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka" z.171, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000, ss.201-214.
4. Kudła J.: Model matematyczny oraz właściwości generatora synchronicznego w stanach ustalonych symetrycznych przy uwzględnieniu zjawiska nasycenia dla pola magnetycznego głównego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „Elektryka”, z. 159, Gliwice 1997, s.125-134.
5. Kudła J.: Model matematyczny generatora synchronicznego uwzględniający zjawisko nasycenia dla pola magnetycznego głównego i pola rozproszenia stojana. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej „Elektryka”, z. 111, Warszawa 1999, s.81-90.
6. Minnich S.H., Schulz R.P., Baker D.H., Sharma D.K., Farmer R.G., Fish J.H.: Saturation Functions for Synchronous Generators from Finite Elements. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. EC-2, No 4, Dec 1987, pp.680-692.
7. Sobczyk T.J.: Newton-Raphson algorithm for steady-state analysis of salient-pole synchronous machines accounting for saturation of a main magnetic circuit. ICEM'2000, Helsinki, 28-30 Aug 2000, pp. 1134-1138.

Recenzent: Dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski  
 Profesor Politechniki Gdańskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 30 kwietnia 2001 r.

## Abstract

The paper presents a field-circuit model and an approximate circuit model which enable to calculate the synchronous machine quantities and characteristics for the steady-state conditions while taking into account the nonlinear magnetization curves of magnetic cores.

The machine field-circuit model consists of circuit equations (2) and partial differential equations describing the magnetic field distribution in the machine (4). These equations are related to each other and have to be solved simultaneously by the iterative method. Fig. 1 shows the algorithm of calculating the synchronous generator torque-angle characteristics.

The machine approximate circuit model takes into account the saturation effect for the main field only. The magnetic linkages, as functions of the magnetizing current space phasor, were expressed in terms of series (17). The nonlinear function coefficients  $\Psi_{md}(I_m)$  and  $\Psi_{mq}(I_m)$  in this series, so-called the synthetic characteristics of flux linkages, are shown in Fig.3 for the TWW-200-2 turbogenerator. These characteristics were calculated on the base of the machine magnetic field spatial distributions using the finite element method.

Figs. 4 and 5 show the torque-angle characteristics and V-curves calculated while using the field-circuit model as well as the approximate circuit model. The curves presented in these figures were compared with the corresponding curves determined for the machine with non-saturated magnetic circuit. Comparing Figs. 4 and 5 one can determine the validation of these models. The maximum error between the characteristics obtained for the field-circuit model and the unsaturated model, which is about 15%, can be reduced to about 10% when using the approximate circuit model.