

Andrzej BOBÓŃ

WYZNACZENIE I BADANIA TRANSMITANCJI WIDMOWYCH HYDROGENERATORA METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Streszczenie. Wyznaczono transmitancje widmowe maszyny synchronicznej (hydrogeneratora) dla różnych wariantów konstrukcyjnych klatki tłumiącej i rdzenia magnetycznego wirnika przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Dla wyznaczonych transmitancji widmowych przeprowadzono aproksymację ich charakterystyk amplitudowych, wyznaczając stałe czasowe różnych typów modeli matematycznych. Zamieszczono porównania i dyskusję osiągniętych wyników.

DETERMINATION AND RESEARCH OF SPECTRAL TRANSFER FUNCTIONS OF A HYDROGENERATOR USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Summary. The spectral transfer functions of the synchronous machine (hydrogenerator) have been determined using the finite element method for different structures of the damper squirrel-cage and the magnetic core of the rotor. For such calculated spectral transfer functions, approximation of their magnitude characteristics has been performed, and time constants have been evaluated for various types of mathematical models. Comparison and discussion of the obtained results have been presented.

1. WPROWADZENIE

Transmitancje widmowe maszyny synchronicznej, wyznaczone na podstawie obliczeń rozkładów pól magnetycznych metodą elementów skończonych, umożliwiają dokładny opis matematyczny właściwości elektromagnetycznych maszyny obserwowanych na zaciskach uzwojeń. Transmitancje te mogą być bezpośrednio wykorzystywane w badaniach maszyny

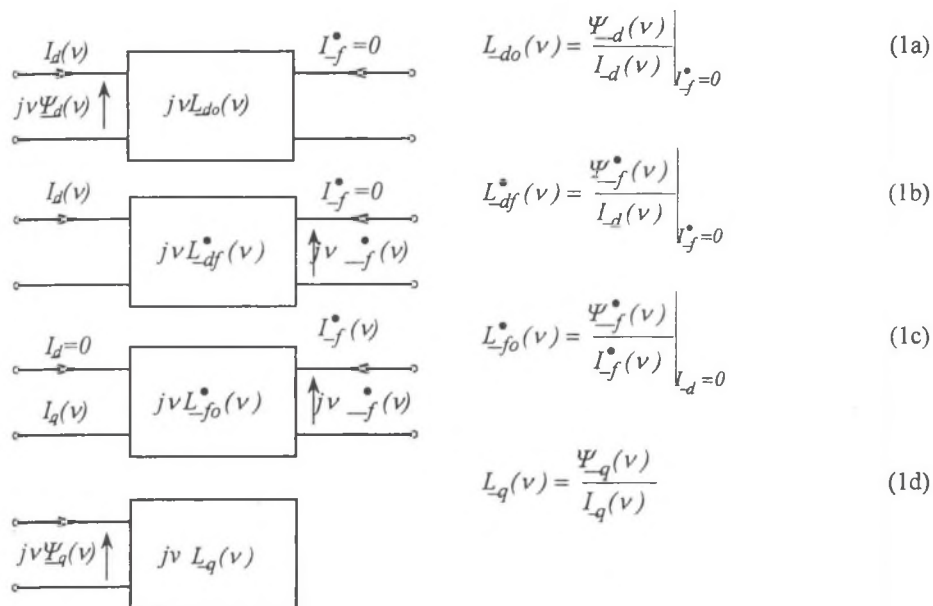
synchronicznej w dziedzinie częstotliwości [2], jak również mogą stanowić podstawę do wyznaczania parametrów elektromagnetycznych modeli obwodowych maszyny [1, 3, 4] wykorzystywanych w badaniach symulacyjnych stanów dynamicznych. W tym drugim zastosowaniu przeprowadza się aproksymację transmitancji widmowych, wyznaczonych metodą elementów skończonych, za pomocą funkcji opisujących te transmitancje w modelach obwodowych. W ten sposób mogą być wyznaczone parametry elektromagnetyczne dla różnych typów modeli matematycznych maszyny synchronicznej, w tym modeli wyższych rzędów przyjmowanych dla generatorów synchronicznych posiadających silne obwody tłumiące w wirniku.

Przy wyznaczaniu parametrów elektromagnetycznych modeli wyższych rzędów na podstawie aproksymacji transmitancji widmowych wymagana jest znajomość zakresów zmienności poszukiwanych parametrów i ich wpływu na charakterystyki częstotliwościowe transmitancji.

W pracy zbadano wpływ prądów indukowanych w przewodzących fragmentach wirnika maszyny synchronicznej o wydatnych biegunach (hydrogeneratora) na charakterystyki częstotliwościowe indukcyjności widmowych i ich parametry (stałe czasowe) dla kilku wariantów wirnika, różniących się miejscem przepływu prądów wirowych i intensywnością ich oddziaływania na pole magnetyczne. Porównanie uzyskanych wyników umożliwia powiązanie charakterystyk częstotliwościowych transmitancji widmowych i ich parametrów z budową obwodów tłumiących w wirniku. Wyniki mogą być wykorzystane w procesie aproksymacji transmitancji widmowych generatorów synchronicznych o różnych konstrukcjach wirnika, szczególnie w przypadku stosowania algorytmów gradientowych, w których zasadnicze znaczenie ma właściwy wybór punktów startowych.

2. INDUKCYJNOŚCI WIDMOWE MASZYNY SYNCHRONICZNEJ

Indukcyjności widmowe maszyny synchronicznej definiowane są dla zastępczych uzwojeń twornika i uzwojenia wzbudzenia modelu Parka w układzie współrzędnych d-q-0. Z punktu widzenia wyróżnionych obwodów twornika i wzbudzenia, uwzględniają one wszystkie pozostałe elektryczne obwody tłumiące wirnika o stałych rozłożonych. Indukcyjności widmowe w osi d definiowane są przy zasilaniu prądem jednego uzwojenia (zastępczego uzwojenia twornika w osi d , lub uzwojenia wzbudzenia) i drugim uzwojeniu otwartym. Na rys. 1 przedstawiono zależności definiujące indukcyjności widmowe w modelu d-q-0 maszyny synchronicznej.



Rys. 1. Zależności definiujące indukcyjności widmowe maszyny synchronicznej. Kropką oznaczono wielkości wirnika sprowadzone na stronę stojana

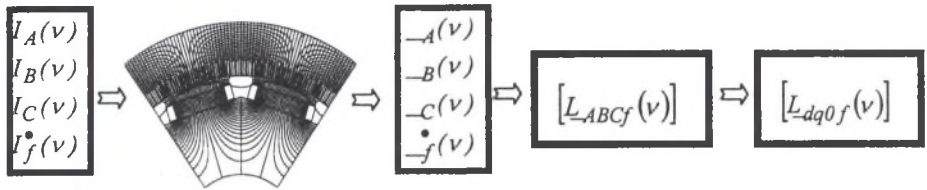
Fig. 1. Relationships defining spectral transfer functions of the synchronous machine. The dot denotes quantities referred to the stator side

Wykorzystując indukcyjności widmowe (1a), ..., (1d) można wyznaczyć pozostałe transmitancje widmowe maszyny synchronicznej $L_d(v)$, $G^*(v)$, $K^*(v)$, $H^*(v)$ [1].

3. WYZNACZANIE INDUKCYJNOŚCI WIDMOWYCH NA PODSTAWIE WYNIKÓW OBLICZEŃ ROZKŁADÓW PÓL MAGNETYCZNYCH

Indukcyjności widmowe maszyny synchronicznej (1a), ..., (1d), można wyznaczyć, obliczając strumienie magnetyczne skojarzone z uzwojeniami modelu d-q-0, wytworzone przez sinusoidalny prąd w odpowiednim uzwojeniu o częstotliwości zmienianej w szerokim zakresie (teoretycznie, $v \in (0, \infty)$). Praktyczny sposób wyznaczania indukcyjności widmowych [1] polega na wykonaniu obliczeń rozkładów pól magnetycznych w maszynie wytworzonych przez odpowiednie prądy w uzwojeniach fazowych twornika i w uzwojeniu

wzbudzenia dla pełnego zakresu częstotliwości, następnie obliczeniu strumieni skojarzonych z uzwojeniami, obliczeniu indukcyjności własnych i wzajemnych uzwojeń i transformowaniu ich do układu współrzędnych d-q-0. Poglądowy schemat kolejnych etapów obliczeń przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat wyznaczania indukcyjności widmowych maszyny synchronicznej
Fig. 2. Scheme of determining spectral transfer functions of the synchronous machine

Na rys.2 oznaczono:

$I_A(v), I_B(v), I_C(v), I_f^*(v)$ – prądy w uzwojeniach fazowych twornika i w uzwojeniu wzbudzenia o określonej względnej częstotliwości v ,

$\underline{\Psi}_A(v), \underline{\Psi}_B(v), \underline{\Psi}_C(v), \underline{\Psi}_f^*(v)$ – strumienie skojarzone z uzwojeniami fazowymi twornika i z uzwojeniem wzbudzenia,

$[L_{ABCf}(v)]$ – macierz indukcyjności własnych i wzajemnych dla określonej względnej częstotliwości v ,

$[L_{dq0f}(v)]$ – macierz indukcyjności w układzie współrzędnych d-q-0 o postaci

$$[L_{dq0f}(v)] = \begin{bmatrix} L_{do}(v) & 0 & 0 & L_{df}^*(v) \\ 0 & L_q(v) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_0(v) & 0 \\ L_{fd}^*(v) & 0 & 0 & L_{fo}^*(v) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Zbiór macierzy $[L_{dq0f}(v)]$ dla pełnego zakresu częstotliwości określa indukcyjności widmowe $L_{do}(v)$, $L_{df}^*(v)$, $L_{fo}^*(v)$, $L_q(v)$ w osiach d i q oraz indukcyjność widmową $L_0(v)$ w osi zerowej maszyny synchronicznej.

Zastosowanie metody elementów skończonych do analizy pola magnetycznego umożliwia wykonanie wszystkich obliczeń na podstawie danych konstrukcyjnych maszyny.

4. MODELE HYDROGENERATORA PRZYJĘTE DO OBLICZEŃ ROZKŁADÓW PÓL MAGNETYCZNYCH

Transmitancje widmowe wyznaczono dla hydrogeneratora ADV-566M o mocy 135 MW. Hydrogenerator ten posiada wydatnobiegunowy wirnik, którego jarzmo i bieguny wykonane są w postaci pakietu blach, oraz klatkę tłumiącą rozmieszczoną w nabiegunnikach, zwartą na obu końcach biegunów i nie połączoną pomiędzy biegunami wirnika. Prądy wirowe indukowane w wirniku wywierają zatem słabe oddziaływanie na pole magnetyczne maszyny.

Do badań porównawczych przyjęto sześć wariantów budowy obwodów tłumiących wirnika wymienionych w tabeli 1.

Tabela 1

Warianty budowy obwodów tłumiących wirnika hydrogeneratora

Symbol wariantu	Rodzaj klatki tłumiącej	Przewodzące fragmenty rdzenia magnetycznego wirnika
①	klatka w osi podłużnej	brak
②	klatka w osi podłużnej i poprzecznej	
③	klatka w osi podłużnej	jarzmo
④	klatka w osi podłużnej i poprzecznej	
⑤	klatka w osi podłużnej	jarzmo, pieńki i nabiegunniki biegunów
⑥	klatka w osi podłużnej i poprzecznej	

Rozpatrywane warianty różnią się:

- ♦ budową klatki tłumiącej wirnika rozmieszczonej w nabiegunnikach,
- ♦ miejscem przepływu prądów wirowych w rdzeniu magnetycznym wirnika.

Uwzględniono dwa rodzaje klatki tłumiącej:

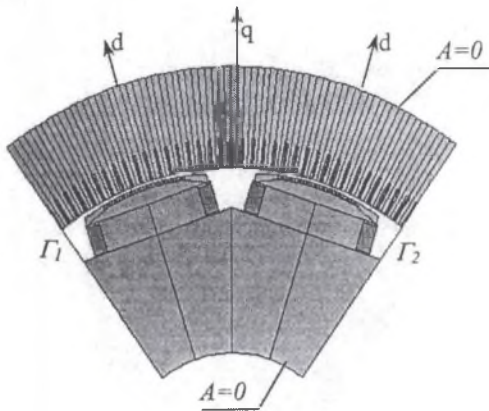
- klatkę w osi podłużnej – zwartą na końcach biegunów i nie połączoną pomiędzy biegunami,
- klatkę w osi podłużnej i poprzecznej – zwartą na końcach biegunów i pomiędzy biegunami.

Rozpatrzono ponadto różne wykonania rdzenia magnetycznego wirnika, przyjmując, że nieprzewodzące fragmenty rdzenia wykonane są w postaci pakietu blach elektrotechnicznych, a przewodzące – w postaci litego żelaza. Spośród rozważanych wariantów, wariant ① dotyczy generatora o najsłabszych, a wariant ⑥ o najsilniejszych obwodach tłumiących w wirniku.

Obliczenia transmitancji widmowych dla przyjętych wariantów budowy wirnika potraktowano jako eksperyment – praktycznie niemożliwy do wykonania na rzeczywistej

maszynie – którego celem było zbadanie wpływu konstrukcji obwodów tłumiących wirnika na transmitancje widmowe i ich parametry.

Obliczenia rozkładów pól magnetycznych przeprowadzono metodą elementów skończonych w przekroju poprzecznym generatora w obrębie jednej pary biegunów. Badany obszar przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Badany obszar hydrogeneratora i przyjęte warunki brzegowe

Fig. 3. The solution region of the hydrogenerator and assumed boundary conditions

Do analizy pola magnetycznego przyjęto następujące założenia:

- ◆ stałą przenikalność magnetyczną żelaza w rdzeniu magnetycznym i stałą konduktywność żelaza w litych fragmentach wirnika,
- ◆ pominięto impedancję pierścieni zwierających pręty klatki tłumiącej. Założono, że prądy w klatce zamykają się w nieskończoności.

Rozkład pola magnetycznego, wyrażonego za pomocą wektorowego potencjału magnetycznego \underline{A} opisany jest następującym równaniem

$$\nabla^2 \underline{A} - k^2 \underline{A} = -\mu \underline{J}_z \quad (3)$$

gdzie:

$$k^2 = j\omega_n \mu \gamma,$$

μ, γ – przenikalność magnetyczna i konduktywność elektryczna,

ω_n – pulsacja znamionowa,

\underline{J}_z – gęstość prądu wymuszanego w uzwojeniach.

Zwarcie prętów klatki tłumiącej na końcach biegunów uwzględnia się w taki sposób, aby spełniony był warunek

$$\sum_{i=1}^{n_k} \int \underline{J}_i ds = 0 \quad (4)$$

gdzie:

\underline{J}_i – gęstość prądu indukowanego w pręcie klatki o przekroju poprzecznym s_i ,

n_k – liczba prętów klatki tłumiącej. W przypadku klatki w osi podłużnej, n_k równa jest liczbie prętów klatki w nabiegunkniku. W przypadku klatki w osi podłużnej i poprzecznej, n_k równa jest liczbie prętów klatki na wszystkich biegunach.

Na rys. 3 zaznaczono przyjęte warunki brzegowe: zerowe warunki Dirichleta na zewnętrznym promieniu stojana i wewnętrznym promieniu jarzma wirnika oraz warunki okresowości na skrajnych krawędziach obszaru Γ_1 i Γ_2 .

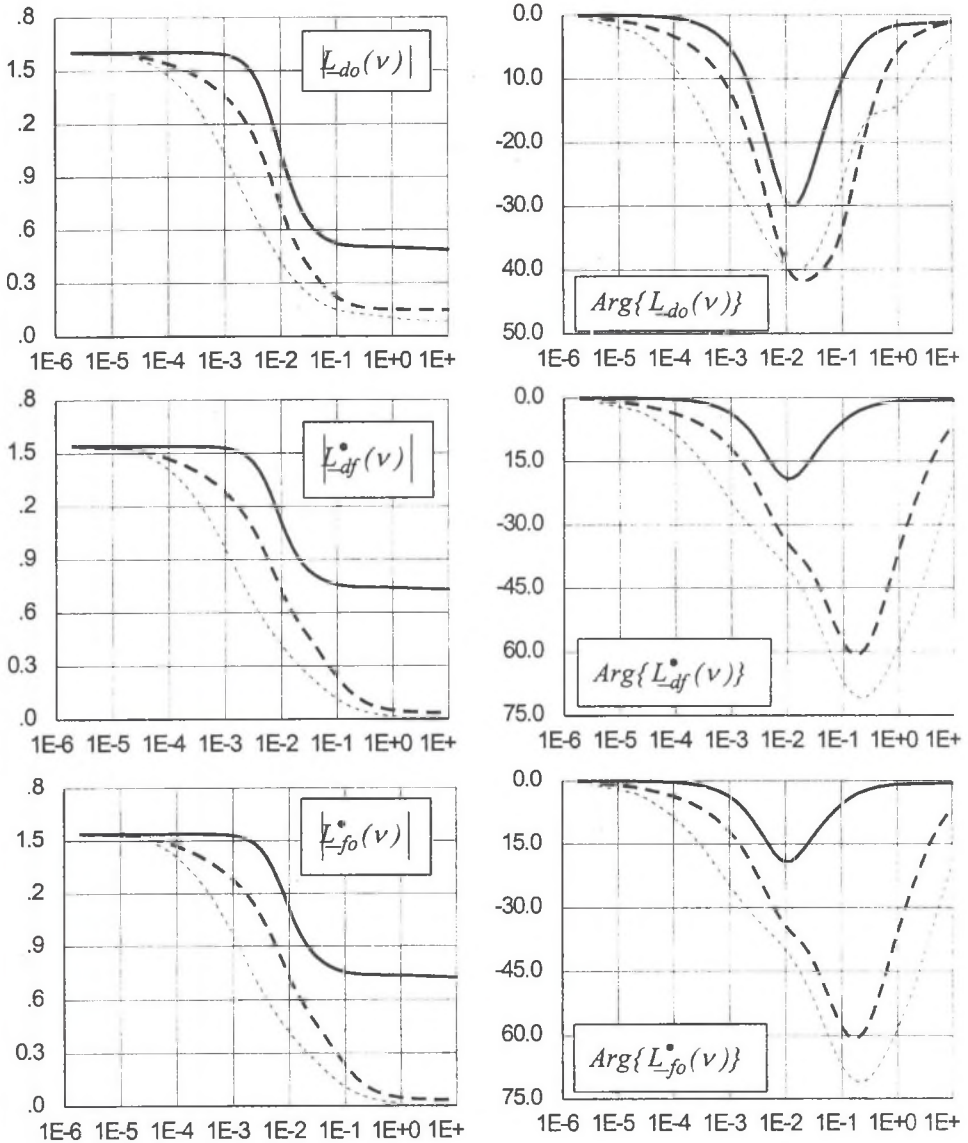
Dla przedstawionych wariantów hydrogeneratora wykonano obliczenia rozkładów pól magnetycznych metodą elementów skończonych przy wykorzystaniu programu OPERA-2D.

5. CHARAKTERYSTYKI CZĘSTOTLIWOŚCIOWE TRANSMITANCJI WIDMOWYCH

Dla rozpatrywanych wariantów budowy obwodów tłumiących hydrogeneratora wyznaczono indukcyjności widmowe $L_{do}(\nu)$, $L_{df}^{\bullet}(\nu)$, $L_{fo}^{\bullet}(\nu)$ w osi d oraz $L_q(\nu)$ w osi q . Na rys. 4 i 5 przedstawiono porównanie charakterystyk częstotliwościowych amplitudowych i fazowych indukcyjności widmowych dla różnych wariantów. Widoczne na wykresach różnice między charakterystykami na ogół rosną ze wzrostem częstotliwości. Porównanie charakterystyk częstotliwościowych prowadzi do następujących wniosków:

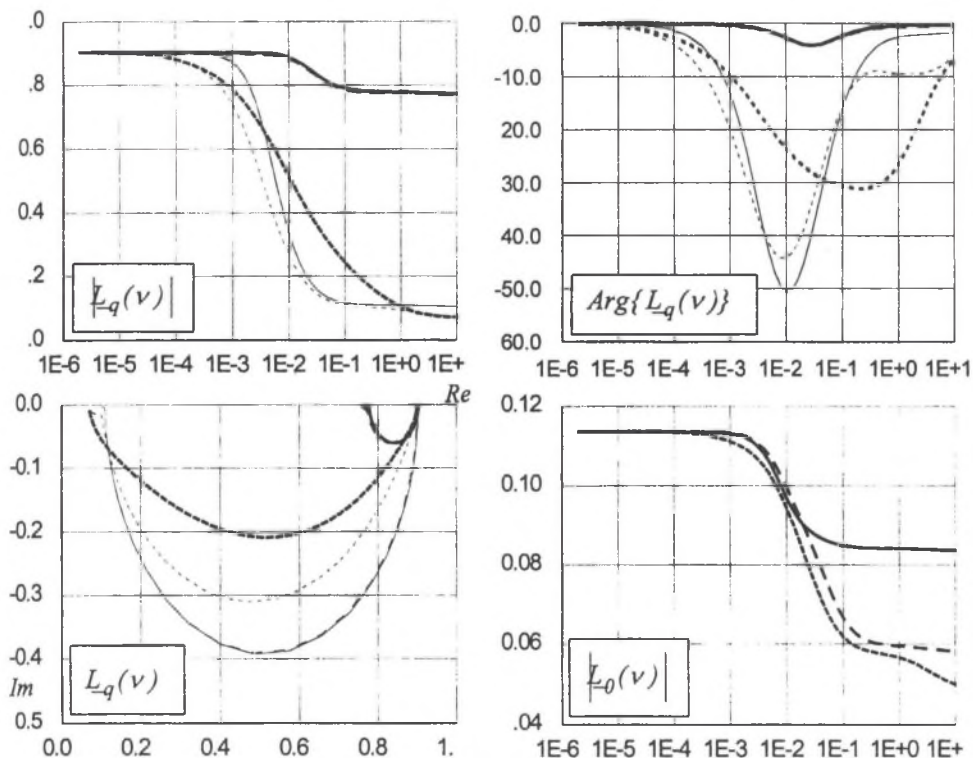
- ♦ połączenie klatki tłumiącej między biegunami nie wpływa na indukcyjności widmowe $L_{do}(\nu)$, $L_{df}^{\bullet}(\nu)$, $L_{fo}^{\bullet}(\nu)$ w osi d , wpływa natomiast znacznie na indukcyjność widmową $L_q(\nu)$ w osi q . W przypadku zastosowania klatki w osi podłużnej i poprzecznej kilkakrotnie maleje indukcyjność wstępna $L_q(\nu \rightarrow \infty)$, w porównaniu do wariantów z klatką w osi podłużnej. Wyjątkiem są warianty wirnika w całości wykonanego z litego żelaza (warianty ⑤ i ⑥), w których oddziaływanie klatki tłumiącej jest ograniczone przez pozostałe obwody tłumiące wirnika,
- ♦ pakietowanie jarzma wirnika bardzo nieznacznie wpływa na indukcyjność widmową w osi q . Znacznie natomiast wpływa na indukcyjność widmową w osi d powodując bardzo duże obniżenie wartości indukcyjności wstępnych.

Na podstawie wyznaczonych z zależności (1a), ..., (1d) indukcyjności widmowych w osi d , obliczono również indukcyjność widmową $L_d(\nu)$ oraz transmitancję widmową $G(\nu)$, uwzględniając tłumiące działanie obwodu uzwojenia wzbudzenia [1].



Rys. 4. Charakterystyki amplitudowe i fazowe indukcyjności widmowych $L_{do}(v)$, $L_{df}(v)$, $L_{fo}(v)$ hydrogeneratora ADV-566M obliczone metodą MES dla wariantów ①...⑥

Fig. 4. Magnitude and phase characteristics of spectral inductances $L_{do}(v)$, $L_{df}(v)$, $L_{fo}(v)$ of ADV-566M hydrogenerator calculated using FEM for ①...⑥ variants



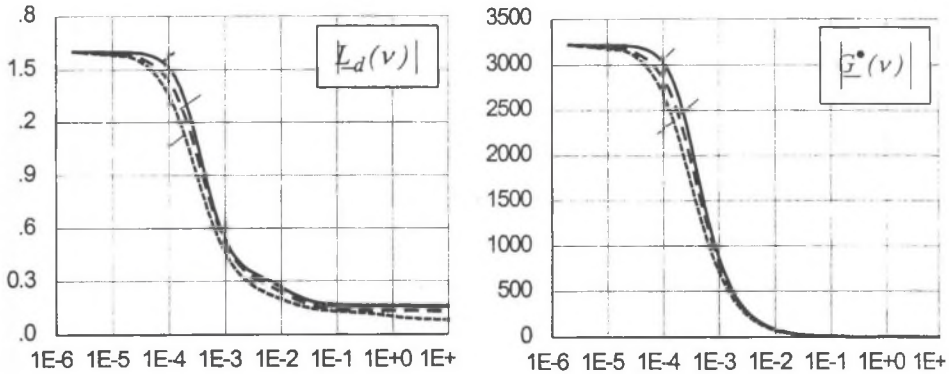
Rys. 5. Charakterystyki częstotliwościowe indukcyjności widmowej $L_{do}(\nu)$ w osi q i $L_q(\nu)$ w osi zerowej hydrogeneratora ADV-566M obliczone metodą MES dla wariantów ①...⑥

Fig. 5. Frequency response characteristics of the spectral q -axis inductance $L_q(\nu)$ and d -axis $L_d(\nu)$ of ADV-566M hydrogenerator calculated using FEM for ①...⑥ variants

Jak wynika z przedstawionych na rys. 6 charakterystyk amplitudowych transmitancji widmowych $L_d(\nu)$ i $G^*(\nu)$, obliczonych dla rozpatrywanych wariantów, działanie tłumiące uzwojenia wzbudzenia majoryzuje działanie tłumiące klatki tłumiącej i litych fragmentów wirnika.

W toku wyznaczania indukcyjności widmowych maszyny synchronicznej w osi d i q wyznaczono również indukcyjność widmową w osi zerowej $L_d(\nu)$, której charakterystyki amplitudowe dla rozpatrywanych wariantów przedstawiono na rys. 5. Widoczny wpływ

prądów wirowych w obwodach tłumiących wirnika na indukcyjność $L_0(\nu)$ spowodowany jest oddziaływaniem wyższych harmoniczných pola magnetycznego.



Rys. 6. Charakterystyki amplitudowe indukcyjności widmowej $L_d(\nu)$ w osi d i transmitancji widmowej $G^*(\nu)$ hydrogeneratora ADV-566M obliczone metodą MES dla wariantów ①...⑥

Fig. 6. Magnitude characteristics of the spectral inductance $L_d(\nu)$ in d -axis and spectral transmittance $G^*(\nu)$ of ADV-566M hydrogenerator calculated using FEM for ①...⑥ variants

6. WYZNACZENIE STAŁYCH CZASOWYCH INDUKCYJNOŚCI WIDMOWYCH DLA OBWODOWYCH MODELI HYDROGENERATORA

Indukcyjności widmowe maszyny synchronicznej wyznaczone metodą elementów skończonych aproksymowano za pomocą funkcji wymiernych opisujących odpowiadające im indukcyjności w modelu obwodowym [1, 3, 4]. W wyniku aproksymacji otrzymuje się stałe czasowe indukcyjności widmowych dla założonych typów obwodowych modeli matematycznych maszyny. Aproksymację przeprowadzono minimalizując błąd średniokwadratowy

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n \left(\frac{|L_{MES}(\nu_i)| - |L(\nu_i, P)|}{|L_{MES}(\nu_i)|} \right)^2 \quad (5)$$

gdzie:

$|\underline{L}_{MES}(v_i)|$, $|\underline{L}(v_i, P)|$ – amplitudy indukcyjności widmowych obliczonych metodą elementów skończonych (MES) i indukcyjności wyrażonych za pomocą poszukiwanych stałych czasowych (elementów wektora P) o postaci funkcji wymiernych

$$|\underline{L}(v_i, P)| = L \prod_{j=1}^m \frac{1 + jv T_j}{1 + jv T_{0j}}. \quad (6)$$

Minimalizację błędu średniokwadratowego (5) przeprowadzono metodą Levenberga-Marquardta zaimplementowaną w programie Mathematica, w zastosowaniu do amplitudowych charakterystyk indukcyjności widmowych $\underline{L}_{do}(v)$ i $\underline{L}_{df}^{\bullet}(v)$ w osi d oraz $\underline{L}_q(v)$ w osi q [1].

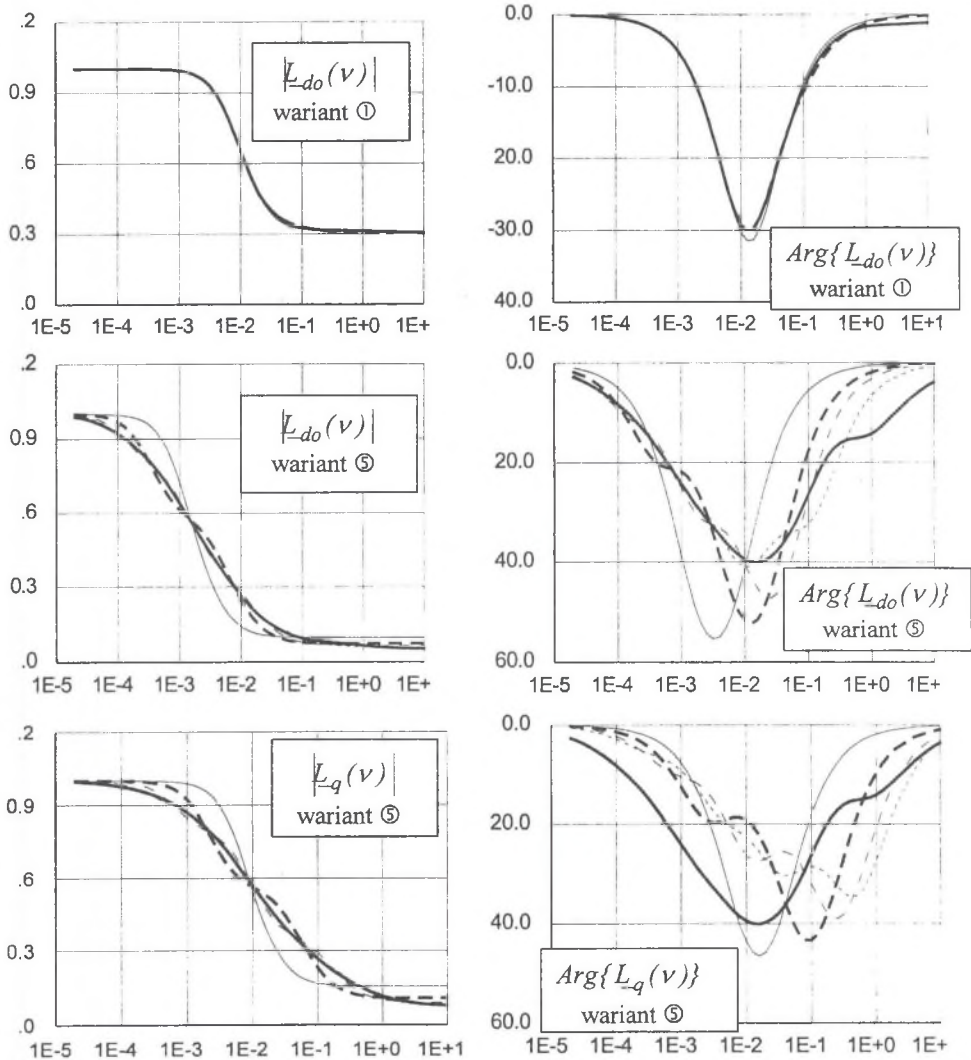
Na rys. 7 przedstawiono porównanie charakterystyk amplitudowych i fazowych indukcyjności widmowych $\underline{L}_{do}(v)$ i $\underline{L}_q(v)$ badanego hydrogeneratora obliczone metodą elementów skończonych, z charakterystykami obliczonymi na podstawie obwodowych modeli różnych typów, dla wariantu wirnika z najsłabszymi obwodami tłumiącymi (wariant ①) i wariantu z silnymi obwodami tłumiącymi (wariant ⑤).

Z porównania charakterystyk (rys. 7) wynikają następujące spostrzeżenia:

- ♦ dla maszyny synchronicznej z wirnikiem posiadającym słabe obwody tłumiące (wariant ①) w zupełności wystarcza przyjęcie jednego zastępczego obwodu tłumiącego w osi d ,
- ♦ dla maszyny synchronicznej z silnymi obwodami tłumiącymi (wariant ⑤), obwodowe modele matematyczne niższych rzędów ($n_d=1, 2$) nie są w stanie zapewnić wystarczającej dokładności odwzorowania transmitancji widmowych wyznaczonych metodą MES. W rozpatrywanym wariancie nawet model zawierający $n_d=4$ zastępcze obwody tłumiące w wirniku nie zapewnia wiernego odwzorowania przebiegu charakterystyk fazowych indukcyjności widmowych w osi d i q . Zastosowanie do aproksymacji indukcyjności widmowych modelu coraz wyższego rzędu systematycznie zmniejsza błąd aproksymacji.

Na rys. 8 przedstawiono wykresy błędów średniokwadratowych osiągniętych w procesie aproksymacji amplitudowych charakterystyk indukcyjności widmowych $\underline{L}_{do}(v)$, $\underline{L}_{df}^{\bullet}(v)$ i $\underline{L}_q(v)$ dla wariantu ⑤ wirnika, w zależności od liczby uwzględnianych zastępczych obwodów tłumiących w wirniku.

Na rys. 9 przedstawiono, w postaci trójwymiarowego wykresu słupkowego, wszystkie wyznaczone stałe czasowe indukcyjności widmowej $\underline{L}_{do}(v)$ dla wariantu ⑤ przy przyjęciu

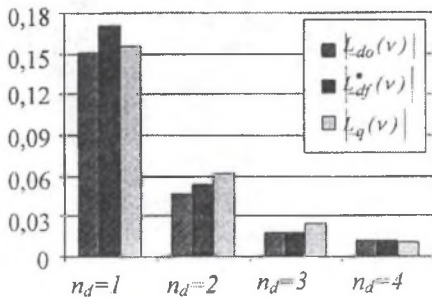


Rys. 7. Porównanie charakterystyk amplitudowych i fazowych indukcyjności widmowej w osi d $L_{do}(v)$ i w osi q $L_{dq}(v)$ hydrogeneratora ADV-566M obliczonych metodą MES z charakterystykami obliczonymi na podstawie obwodowych modeli dla: a) wariant ①: $n_d=1, 2$, b) wariant ⑤: $n_d=1, 2, 3, 4$; $n_q=1, 2, 3, 4$

Fig. 7. Comparison of magnitude and phase characteristics of the spectral inductance $L_{do}(v)$ in d -axis and $L_{dq}(v)$ in q -axis for ADV-566M hydrogenerator calculated by FEM, with characteristics calculated basing on circuital models for: a) variant ①: $n_d=1, 2$, b) variant ⑤: $n_d=1, 2, 3, 4$; $n_q=1, 2, 3, 4$

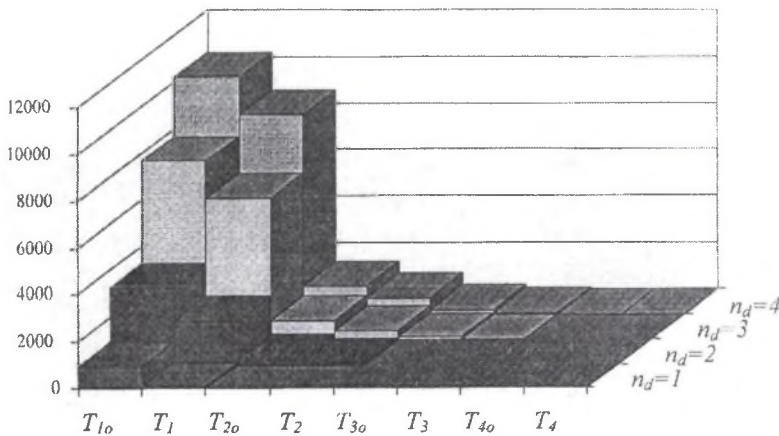
——— MES, FEM ——— $n_d=1, n_q=1$; - - - - $n_d=2, n_q=2$;
 - - - - $n_d=3, n_q=3$; ····· $n_d=4, n_q=4$

od jednego do czterech zastępczych obwodów tłumiących w wirniku ($n_d=1, \dots, 4$). Stałe czasowe na tym wykresie uszeregowane są od największej do najmniejszej, co odpowiada przeplataniu się miejsc zerowych licznika i mianownika funkcji opisujących indukcyjności widmowe maszyny synchronicznej (stałe czasowe T_1, \dots, T_4 występują w liczniku, a stałe czasowe T_{10}, \dots, T_{40} – w mianowniku indukcyjności widmowej). Ponadto, ze wzrostem liczby zastępczych obwodów tłumiących w wirniku wzrastają stałe czasowe w indukcyjnościach widmowych.



Rys. 8. Wykresy błędów średniokwadratowych aproksymacji indukcyjności widmowych w zależności od liczby uwzględnianych zastępczych obwodów tłumiących

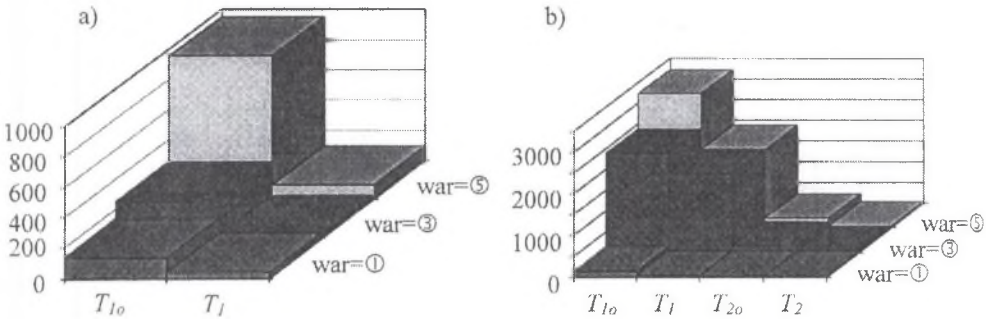
Fig. 8. Bar chart of mean square errors for spectral inductance approximation versus the number of equivalent damper circuits in the rotor



Rys. 9. Stałe czasowe (jedn. wzgl.) indukcyjności widmowej $L_{do}(v)$ dla modeli obwodowych $n_d=1, \dots, 4$ wyznaczone dla wirnika z silnymi obwodami tłumiącymi (wariant ⑤)

Fig. 9. Time constants (p.u.) of the spectral inductance $L_{do}(v)$ for circuitual models $n_d=1, \dots, 4$ evaluated for strong damper circuits in the rotor (variant ⑤)

Na rys. 10a, b przedstawiono porównanie stałych czasowych indukcyjności widmowej $L_{do}(\nu)$ uzyskane dla trzech wariantów budowy rdzenia magnetycznego wirnika maszyny – osobno dla modelu $n_d=1$ i osobno dla modelu $n_d=2$.



Rys. 10. Stałe czasowe (jedn. wzgl.) indukcyjności widmowej $L_{do}(\nu)$ wyznaczone dla hydrogeneratora z klatką tłumiącą w osi d i dla trzech wariantów budowy rdzenia wirnika (warianty ①, ③, ⑤) oraz dla modelu obwodowego: a) $n_d=1$, b) $n_d=2$

Fig. 10. Time constants (p.u.) of the spectral inductance $L_{do}(\nu)$ evaluated for the hydrogenerator with the d -axis damper squirrel-cage and three structures of the rotor core (variants ①, ③, ⑤), and for the circuital model: a) $n_d=1$, b) $n_d=2$

Dla maszyny synchronicznej posiadającej silniejsze obwody tłumiące w wirniku otrzymuje się większe stałe czasowe indukcyjności widmowych.

7. UWAGI KOŃCOWE

Wyznaczone przy wykorzystaniu metody elementów skończonych transmitancje widmowe hydrogeneratora dla różnych wariantów konstrukcyjnych klatki tłumiącej i rdzenia magnetycznego wirnika umożliwiły zbadanie wpływu oddziaływania prądów wirowych w obwodach tłumiących wirnika na charakterystyki częstotliwościowe transmitancji widmowych. Dla tak wyznaczonych transmitancji widmowych przeprowadzono aproksymację ich charakterystyk amplitudowych, wyznaczając stałe czasowe transmitancji różnych typów modeli obwodowych generatora. Porównanie wyznaczonych stałych czasowych umożliwia zaobserwowanie wpływu konstrukcji obwodów tłumiących wirnika dla modeli obwodowych maszyny różnych typów.

Wyniki przeprowadzonych badań porównawczych mogą być wykorzystane podczas wyznaczania parametrów elektromagnetycznych generatorów synchronicznych o różnych konstrukcjach obwodów tłumiących w wirniku.

LITERATURA

1. Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Parametry elektromagnetyczne maszyny synchronicznej. Wykorzystanie metody elementów skończonych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1998.
2. Paszek W., Boboń A., Kudła J.: Influence of the solid rotor on the electromagnetic damping properties of the evolution and modern aspects of synchronous machines. Zürich Aug. 1991.
3. Boboń A.: Synteza schematów zastępczych modeli matematycznych wyższych rzędów generatora synchronicznego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ser. Elektryka, z.149, Gliwice 1996, s. 83-98.
4. 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, Prague, 7-8 Sept. 1998, pp. 111-119.

Recenzent: Dr hab. inż. Ernest Mendrela
prof. Politechniki Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 marca 1999 r.

Abstract

The spectral transfer functions of the salient pole synchronous machine (hydrogenerator) have been determined using the finite element method (FEM) for six structures of the damper squirrel-cage and the magnetic core of the rotor. The damper squirrel-cage in the direct axis (short-circuited at the ends of poles and not connected between poles) have been considered, as well as one in the direct and quadrature axes (short-circuited

at the ends around the whole rotor). Of the considered structures, the variant ① concerns the generator with the weakest damper circuits, whereas the variant ⑥ concerns the strongest ones.

Comparison of frequency response characteristics of transfer functions is presented in Figs. 4, 5 and 6 for the considered rotor structures. From this comparison, the following conclusions can be drawn:

- ◆ damper squirrel-cage connection between poles does not influence the spectral inductances $\underline{L}_{do}(\nu)$, $\underline{L}_{df}(\nu)$, $\underline{L}_{fo}(\nu)$ in d axis, but influences strongly the q -axis spectral inductance $\underline{L}_q(\nu)$
- ◆ lamination of the rotor yoke influences very slightly the q -axis spectral inductance, however it influences considerably the d axis spectral inductance
- ◆ the damping effects of the damper squirrel-cage and solid parts of the rotor are constrained by reaction of the field winding.

Approximation of the magnitude characteristics of the evaluated spectral transfer functions has been performed and basing on it the time constants of the mathematical models have been found taking into account various number of the equivalent damper circuits in the rotor.

Fig. 7 shows comparison of the frequency response characteristics of the spectral inductances $\underline{L}_{do}(\nu)$ and $\underline{L}_q(\nu)$ calculated by the finite element method, with those calculated from the circuitual models of different types for the rotor consisting of the weakest damper circuits (variant ①) and the rotor consisting of strong damper circuits (variant ⑤).

Figs. 9 and 10 show comparison of the time constants of the spectral inductance $\underline{L}_{do}(\nu)$ calculated for various rotor structures and various types of mathematical models.

The investigation results can be used to determine electromagnetic parameters of synchronous generators with various structures of damper circuits in the rotor.