

Liliana BYCZKOWSKA – LIPIŃSKA¹⁾, Paweł DRZYMAŁA²⁾, Maciej KACPERSKI²⁾

KOMPUTEROWA ANALIZA ROZKŁADU POLA MAGNETYCZNEGO I SIŁ ELEKTRODYNAMICZNYCH SILNIKA SYNCHRONICZNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

Streszczenie. W pracy przedstawiono badania symulacyjne rozkładu pola magnetycznego i sił elektrodynamicznych silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. Zbadano wpływ położenia wirnika na przebiegi sił promieniowych i normalnych.

COMPUTER SIMULATION OF MAGNETIC FIELD AND ELECTRODYNAMIC FORCES DISTRIBUTIONS IN SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

Summary. The paper presents simulations of magnetic field and electrodynamic forces distributions in a synchronous motor. Analysis of the influence of the rotor position on transient response of normal and radial forces is carried out.

Key words: synchronous motor, magnetic field, electrodynamic forces

1. WSTĘP

Analiza stanu dynamicznego w przetwornikach elektromechanicznych składa się z kilku etapów, które wymagają określenia:

- przestrzenno-czasowego rozkładu pola magnetycznego,
- przestrzenno-czasowego rozkładu sił wymuszających drgania elementów konstrukcyjnego silnika.

2. POLE MAGNETYCZNE PRZETWORNIKA ELEKTROMECHANICZNEGO

Modelem matematycznym (podstawowym) do symulacji rozkładu pól elektromagnetycznych w przetwornikach elektromechanicznych są quasi-stacjonarne równania Maxwella (1) [2,5]

$$\operatorname{rot} H = J, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} B = 0, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} D = \rho_v, \quad (4)$$

gdzie: ρ_v - objętościowa gęstość ładunku.

Model symulacyjny (scalony), który stanowi algorytm obliczeniowy związany jest z następującymi uproszczeniami:

- pominięcie prądów przesunięcia w dielektryku,
- brak pętli histerezy.

¹⁾ PhD, DSc, Technical University of Lodz, Institute of Computer sciences ul. Sterilng 16/18, 90-217 Łódź, e-mail: lilip@ics.pl.lodz.pl

²⁾ PhD, DSc, Technical University of Lodz, Institute of Electrical Machines and Transformers, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, e-mail: maciek19@ck-sg.pl.lodz.pl

Równania Maxwella mogą być rozwiązywane z wykorzystaniem wektorów pola magnetycznego H (B) lub pola elektrycznego E .

Dla obszarów nie przewodzących (brak prądów) równanie (1) przyjmuje postać (5)

$$\text{rot } H = 0. \quad (5)$$

W obszarach przewodzących pole elektromagnetyczne może być opisane równaniem postaci, która opisuje magnetyczny potencjał wektorowy (6)

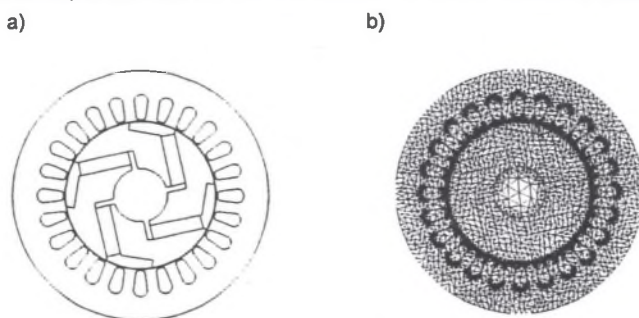
$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } A \right) = \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (6)$$

Do symulacji rozkładu pola magnetycznego można stosować metody polowe z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) lub różnic skończonych (MRS).

W przypadku silnika występuje powtarzalność rozkładu pola magnetycznego wzdłuż długości wirnika. Obliczenia pola magnetycznego i sił elektrodynamicznych można ograniczyć do symulacji w układzie dwuwymiarowym. Ze względu na siły elektrodynamiczne istotne są zmiany indukcji magnetycznej dla różnych położeń wirnika względem stojana.

3. ANALIZA POLA MAGNETYCZNEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO

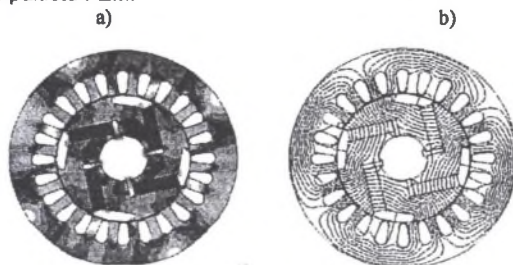
Badania rozkładu pola magnetycznego i sił elektrodynamicznych przeprowadzono dla znamionowego stanu obciążenia silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o następujących danych znamionowych (rys. 1a): $P_N = 0.9 \text{ kW}$, $U_N = 250 \text{ V}$, liczba zębów 24, wznios wału 0.063 m .



Rys. 1. a) Przekrój silnika z magnesami trwałymi, b) siatka dyskretyzacji dla kąta 5°
Fig. 1. a) Cross-section of the rotor with permanent magnets, b) discretization for angle of 5°

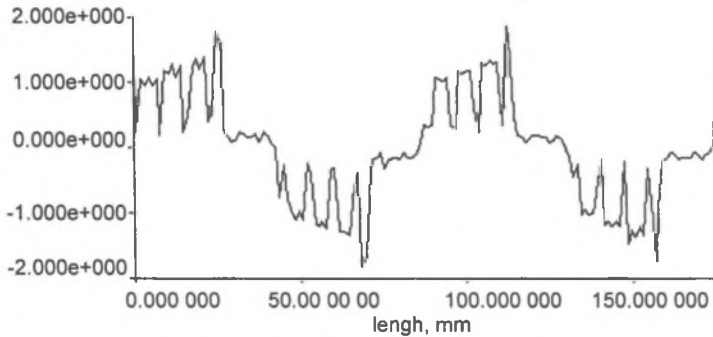
Rysunek 1b przedstawia siatkę dyskretyzacyjną dla położenia wirnika względem stojana równą 5° . Na rysunku 2 podano rozkład pola magnetycznego. Rys.3 przedstawia przebieg składowej promieniowej indukcji wzdłuż obwodu wirnika.

Komputerowe obliczenia rozkładu pola magnetycznego i przebiegu indukcji wykonano dla obciążenia znamionowego silnika (wymuszenie prądowe) metodą MES z wykorzystaniem komercyjnego pakietu FEM.



Rys.2. Rozkład pola magnetycznego silnika synchronicznego dla położenia wirnika 5 stopni:
a) moduł B, b) linie sił pola magnetycznego

Fig.2. Magnetic field distribution for synchronous motor with rotor position at angle of 5° .
a) Induction module, b) magnetic field lines



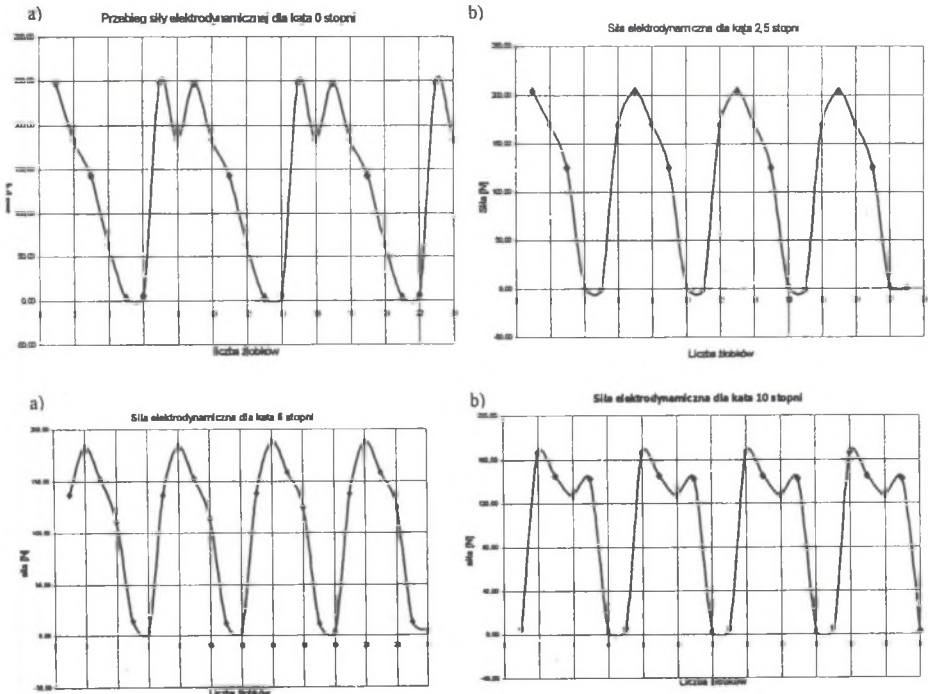
Rys.3. Rozkład indukcji promieniowej dla silnika synchronicznego
Fig.3. Radial induction distribution for synchronous motor

4. ANALIZA SIŁ ELEKTRODYNAMICZNYCH SILNIKA SYNCHRONICZNEGO

Siły elektrodynamiczne w przetwornikach elektromechanicznych mogą występować w obszarach uzwojeń (siły Lorentza (7)) oraz wewnątrz ferromagnetycznych elementów magnetowodu (siły magnetostrykcyjne (8)).

$$f_b = J \times B, \quad (7)$$

gdzie: f_b – objętościowa gęstość sił magnetycznych, J – gęstość prądu źródłowego, B – wektor indukcji magnetycznej.



Rys.4. Siły elektrodynamiczne dla kilku wybranych pozycji wirnika
Fig.4. Electrodynamic forces for a few selected rotor positions

$$\varepsilon_B = f(B_m^2), \quad (8)$$

gdzie: ε_B – względne wydłużenie,
 B_m – amplituda indukcji magnetycznej.

Siły Lorentza powstające w wyniku oddziaływania strumienia rozproszenia z prądami płynącymi w uzwojeniach przetwornika elektromechanicznego mają charakter liniowy. Dla silników siły te są uśrednione na objętości żłobka stojana i mają praktycznie kierunek radialny.

Siły elektrodynamiczne mogą być obliczone metodą tensora naprężeń. Dla i-tej siły zapisuje się równanie (7) w postaci sumacyjnej (9) [3].

$$f_{Bi} = \frac{\partial}{\partial x_i} (T_{ij})_B, \quad (9)$$

gdzie: T_{ij} – tensor naprężeń magnetycznych.

W środowisku liniowym i izotropowym magnetycznie tensor naprężeń, dla elementarnej powierzchni o orientacji n , można zapisać w głównych współrzędnych w postaci (10) [3].

$$T_{ij}^n = \frac{1}{2} B \cdot H \text{diag}(1, -1, -1). \quad (10)$$

Na podstawie obliczonego rozkładu pola magnetycznego wyznaczono rozkłady sił elektrodynamicznych, działających na uzwojenie w żłobkach, dla kilku kątów położenia wirnika względem stojana (rys.4).

5. WNIOSKI

W przedstawionych obliczeniach zastosowano algorytm wyznaczania rozkładów sił elektrodynamicznych wzdłuż obwodu wirnika dla szeregu położenia wirnika względem stojana silnika synchronicznego. Metoda obliczania gęstości sił elektrodynamicznych wykorzystuje tensor naprężeń magnetycznych.

W dalszych pracach autorzy przewidują analizę przebiegów czasowych przemieszczeń poszczególnych elementów konstrukcji silnika synchronicznego wywołanych siłami elektrodynamicznymi. Wyznaczenie dominujących składników prędkości drgań mechanicznych, a szczególnie analiza widma częstotliwości sygnałów drgań może stanowić podstawy diagnostyki przetworników elektromechanicznych.

LITERATURA

1. Morel J.: Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego, PTD, 1998, 380s.
2. Szmelter J.: Metody komputerowe w technice, WNT, 1980, 210s
3. Witczak P.: Wyznaczanie drgań mechanicznych silnika indukcyjnego wywołanych siłami magnetycznymi, Zeszyty Naukowe PŁ, 1995, 145s.
4. Ziemia M.: Analiza drgań, PWN, Warszawa 1957, 950s.

Recenzent: Dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 marca 2001 r.

Abstract

The paper presents the magnetic field and electrodynamic forces simulations in a synchronous machine with permanent magnets. The influence of a rotor angle on the values of axial and radial forces is considered.

The 2D model of a machine is created for the purpose of calculations. Equations 1-10 describe the mathematical model of the electromagnetic field and electrodynamic forces in the synchronous machine with permanent magnets. Figs. 1,2,3 present the magnetic field distribution. Figure 4 shows the time distribution of the forces for different rotor angles.