

**Janusz Bialik, Jan Zawilak**  
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

## **DRGANIA WŁASNE KONSTRUKCJI DWUBIEGOWEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO**

### **FREE VIBRATION ANALYSIS OF THE TWO-SPEED SYNCHRONOUS MOTOR**

**Abstract:** In this article the free vibration's calculation method, of the electrical motors with very complicated structure, are presented. An example of such machines are a two-speed synchronous motors. Calculation were done using two- and three dimensional FEM models. The aim of this paper is a presentation of the calculation results of the motor type GAe1510/12p which has two different rotational speeds:  $n=500$  rpm ( $2p=12$ ) and  $n=600$  rpm ( $2p=10$ ) and appertaining powers:  $P=600$  kW and  $P=1050$  kW. Results of the presented analysis are the next step in understanding problems existing in such motors, i.e. electromagnetic noise or vibration of electromagnetic origin.

#### **1. Wstęp**

W celu przeprowadzenia analizy drgań pochodzenia elektromagnetycznego konieczna jest informacja o ich wymuszeniach, jak i o konstrukcji badanego układu. Informację o wymuszeniach można uzyskać na drodze modelowania polowo-obwodowego. Modelowanie to pozwala wyznaczyć siły będące źródłem drgań pochodzenia elektromagnetycznego [3, 4]. Informację o konstrukcji badanego obiektu można uzyskać na drodze obliczeń mechanicznych. W przypadku istniejących obiektów można dokonać pomiarów drgań własnych konstrukcji. W wielu jednak przypadkach nie jest to zadanie łatwe, a czasami wręcz niemożliwe (gł. obiekty dużych rozmiarów pracujących w przemyśle). Wówczas do dyspozycji pozostają metody MES, które w sposób relatywnie szybki i łatwy pozwala na analizę badanej struktury. Oba podejścia – pomiary i modelowanie, mają na celu wyznaczenie drgań własnych badanej konstrukcji, co w połączeniu ze znanymi wymuszeniami (siły pochodzenia elektromagnetycznego) daje nam pełny obraz problemów akustyczno-wibracyjnych badanych maszyn. Modelowanie MES ma również tą przewagę nad pomiarami, iż umożliwia dokonywanie modyfikacji konstrukcji obiektu i badanie ich wpływu na układ bez dodatkowych kosztów.

Celem niniejszej pracy jest prezentacja wyników obliczeń analizy modalnej konstrukcji dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe1510/12p [1, 2] o dwóch prędkościach obrotowych:  $n=500$  ( $2p=12$ ) i  $n=600$  obr/min ( $2p=10$ ) oraz mocach znamionowych odpowiednio  $P=600$  kW i  $1050$  kW. Wyniki tej ana-

lizy stanowią kolejny krok w zrozumieniu problemów takich, jak hałas magnetyczny czy drgania mechaniczne pochodzenia elektromagnetycznego w wyżej wymienionych maszynach.

#### **2. Model obliczeniowy**

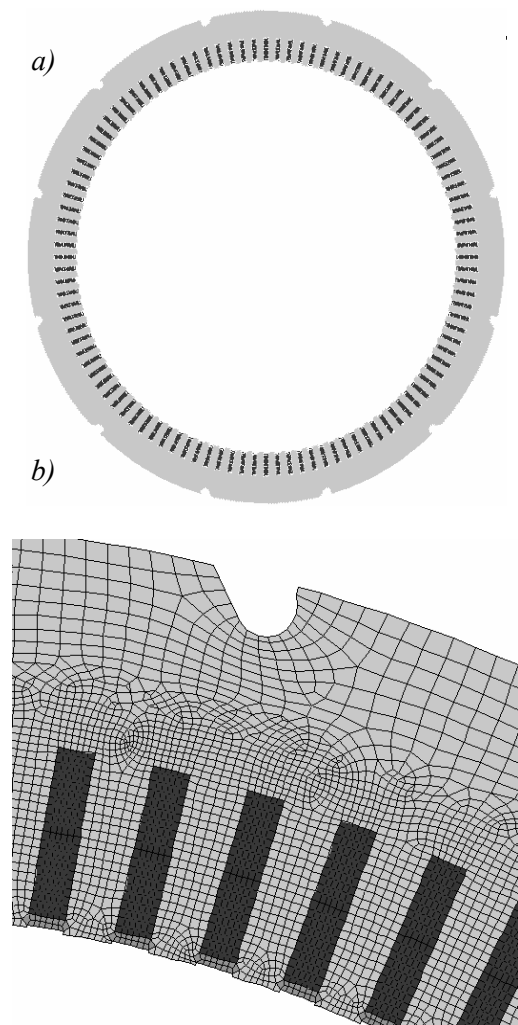
Analizę drgań własnych konstrukcji badanego silnika dwubiegowego typu GAe1510-12p przeprowadzono opracowując modele elementów skończonych w przestrzeni dwu- i trójwymiarowej [6]:

a) jarzmo stojana silnika dwubiegowego wraz z uzwojeniem twornika zamodelowano w przestrzeni dwuwymiarowej. Wyniki z tej analizy posłużyły do opracowania ekwiwalentnej (w przestrzeni dwuwymiarowej) cylindrycznej struktury będącej substytutem jarzma stojana silnika;

b) opracowana ekwiwalentna struktura następnie została zaadoptowana do modelu trójwymiarowego, który zawiera pozostałe elementy konstrukcyjne obudowy silnika (tj. śruby ściągające, żebra, płaszcz itd.).

Podejście takie jest niezbędne ze względu na skomplikowaną geometrię badanego silnika dwubiegowego dużej mocy. Model jarzma stojana (Rys.1) uwzględnia właściwości mechaniczne żelaza stojana wraz z izotropowymi własnościami uzwojenia twornika oraz izotropowymi własnościami klinów stojana. Wpływ czoł uzwojenia twornika na wyniki analizy uwzględniono w modelu jako masy dodatkowe, których sumaryczna masa odpowiada masie

uzwojenia (miedź wraz z izolacją wysokonapięciową) w tej części modelowanego silnika.



Rys. 1. 2D model silnika synchronicznego (a) rzut ogólny (b) część modelu wraz z siatką MES

Dla uzyskania odpowiedniej dokładności obliczeń model obliczeniowy wymaga dużej liczby węzłów siatki MES (np. dwuwymiarowy model miał ok. 70 000 niewiadomych). Im większa liczba węzłów tym dłuższy czas oczekiwania na wyniki obliczeń. W przypadku trójwymiarowego modelu obliczeń konstrukcji synchronicznego silnika dwubiegowego, liczba niewiadomych przekroczy liczbę jednego miliona. Długi czas obliczeń (wynikający z wielkości modelu) jest często nie do zaakceptowania w procesie projektowania maszyn.

Drugim powodem, dla którego zastosowano modelowanie w dwóch etapach to fakt, iż duża liczba szczegółów w modelu obliczeniowym powoduje wystąpienie bardzo gęstego spektrum częstotliwości drgań własnych badanej kon-

strukcji [6] – co z kolei utrudnia analizę otrzymanych wyników. Właściwości materiałów zastosowanych w analizie pełnego modelu 2D zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości materiałowe elementów pełnego modelu 2D

material	$E_{xy}$	$\nu_{xy}$	$\rho$
	MPa	--	kg/m <sup>3</sup>
jarzmo stojana	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,29	7850
miedz uzwojenia	$1 \cdot 10^{10}$	0,045	9089
izolacja	$1 \cdot 10^9$	0,3	3950
klin	$2,15 \cdot 10^{10}$	0,3	2025

### 3. Analiza drgań własnych

Kryterium jakie przyjęto w opracowaniu ekwiwalentnej struktury jarzma stojana silnika dwubiegowego to założenie powtarzalności spektrum postaci drgań własnych obu struktur (modelu rzeczywistego oraz modelu uproszczonego).

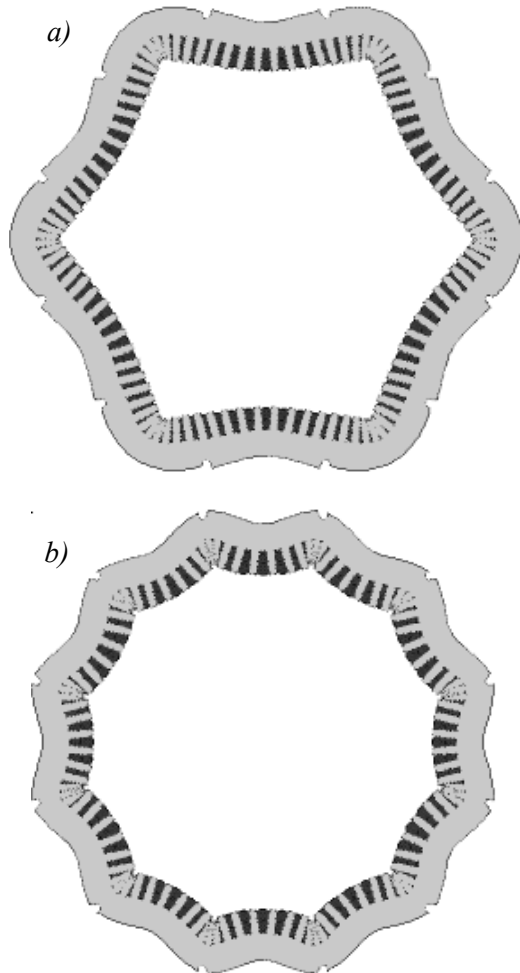
Dzięki zastosowanemu podejściu uzyskano wielokrotne zredukowanie liczby równań zastępczego modelu jarzma.

Na dwóch kolejnych rysunkach (rys.2 oraz rys.3) pokazano porównanie naturalnych form drgań pomiędzy modelem rzeczywistym a modelem uproszczonym jarzma stojana silnika dwubiegowego. Należy zaznaczyć, że zewnętrzne średnice obu modeli są takie same, natomiast pozostałe wymiary wraz z własnościami mechanicznymi materiałów obu modeli są inne. Parametry obu dwuwymiarowych modeli obliczeniowych zestawiono w tabeli 2.

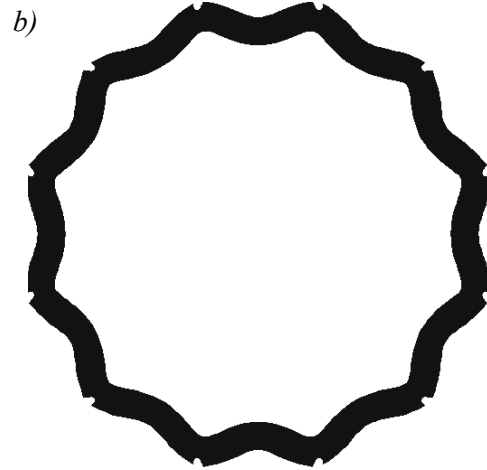
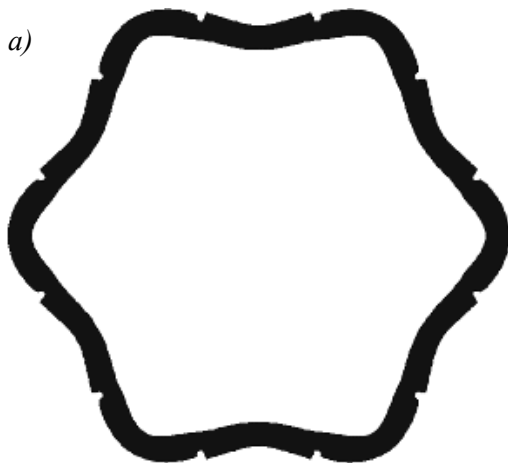
Tabela 2. Parametry obu modeli 2D jarzma stojana silnika synchronicznego

model	pełny	uproszczony
średnica zewnętrzna [mm]	1450	1450
wysokość	150	64,4
moduł Younga	$2,1 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$
wsp. Poissona	0,29	0,29
gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	7850	12125

Porównanie pomiędzy obydwoima modelami (uproszczonym oraz pełnym) zaprezentowano w tabeli 3.



Rys. 2. Przykłady naturalnych modów rzeczywistego mechanicznego 2D modelu silnika synchronicznego a)  $r=6$ , b)  $r=12$



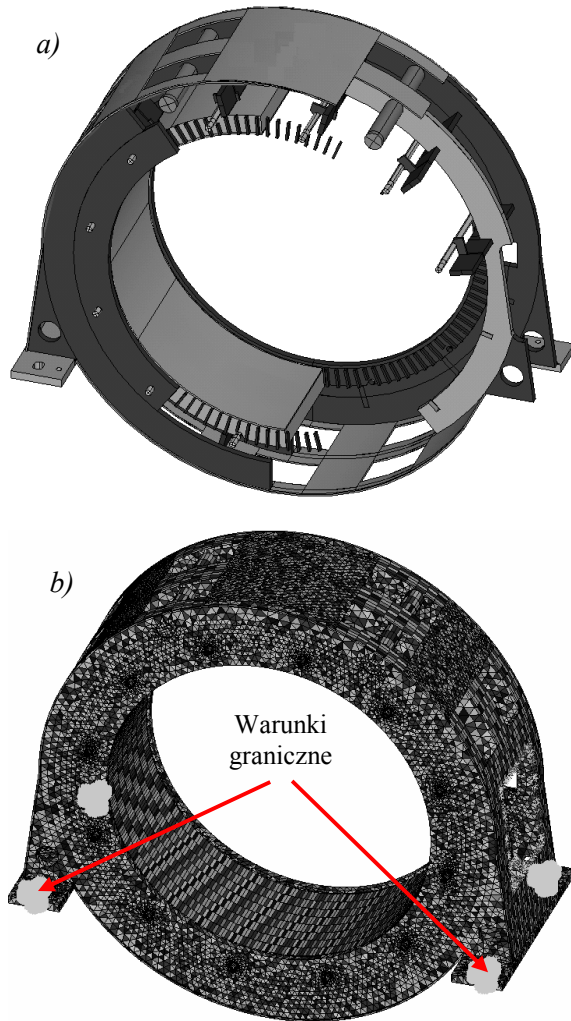
Rys. 3. Przykłady naturalnych modów uproszczonego mechanicznego 2D modelu silnika synchronicznego a)  $r=6$ , b)  $r=12$

Wyniki jednoznacznie pokazują, że w granicy do 2,5 kHz oba modele dają podobne rezultaty. Uproszczony model jarzma stojana silnika dwubiegunowego posiada ok. 1000 równań (pełny model posiadał ich ok. 70 000), co powoduje zmniejszenie liczby równań modelu w przestrzeni trójwymiarowej 70 razy.

Tabela 3. Częstotliwości drgań własnych obu modeli 2D jarzma stojana silnika dwubiegunowego

model	$f$ [Hz]			
	pełny	1488	1529	1644
prosty	1487	1527	1640	1759
pełny	1897	2069	2295	2419
prosty	1909	2062	2257	2347

Pełny trójwymiarowy model MES konstrukcji silnika dwubiegunowego wykonany jest w całości z elementów typu SOLID a całkowita liczba niewiadomych wynosi 1 milion. Na rysunku 4a przedstawiono widok na konstrukcję badanej maszyny (część modelu usunięto w celu zwiększenia czytelności rysunku) a na rys. 4b pokazano siatkę elementów skończonych.



Rys. 4. Widok pełnego trójwymiarowego modelu dwubiegowego silnika synchronicznego (część modelu usunięto w celu zwiększenia czytelności rysunku) (a) oraz siatka elementów skończonych wraz z warunkami granicznymi (b)

W modelu wprowadzono, w punktach podparcia łap silnika do fundamentu maszyny, sztywne warunki zamocowania. Model mechaniczny silnika dwubiegowego nie zawiera wirnika wraz ze stojakami łożyskowymi. Założenie to wynika z przyjęcia w obliczeniach nieodkształcalnego podłoża, co pociąga za sobą brak przekazywania drgań z wirnika poprzez stojaki łożyskowe na korpus silnika.

Przedstawiona konstrukcja jest bardzo podatna na drgania – śruby ściągające jarzmo stojana, żebra itp. powodują powstanie bardzo gęstego widma drgań prezentowanej struktury. Z punktu widzenia drgań ważne są tylko te harmoniczne, które znajdują się w pobliżu częstotliwości sił wymuszających (np. sił elektromagnetycznych) [5]. W tabeli 4 przedstawiono wyniki analizy modalnej opracowanego modelu

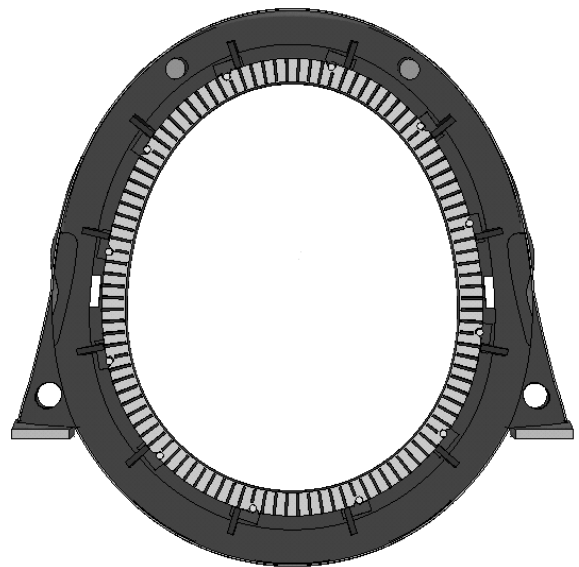
trójwymiarowego. Tylko pierwsze 46 modów zamieszczono w tej tabeli.

Tabela 4. Wyniki analizy modalnej

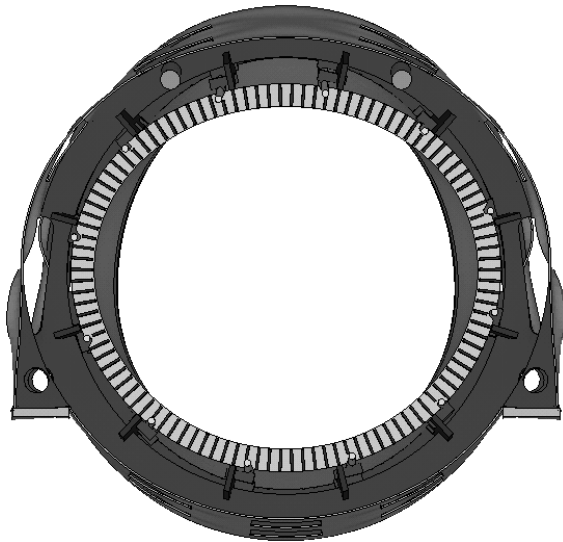
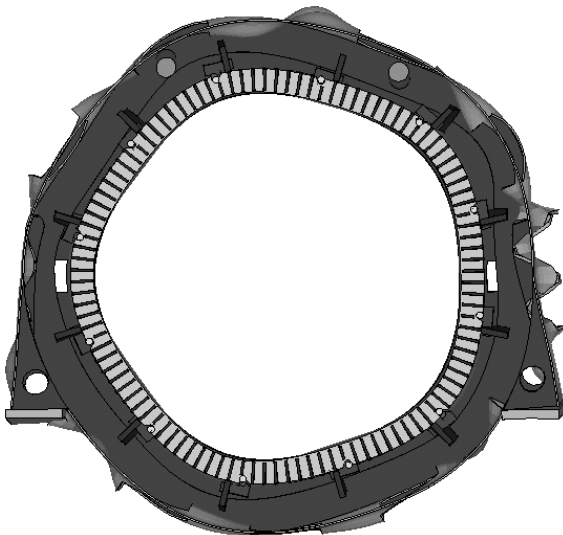
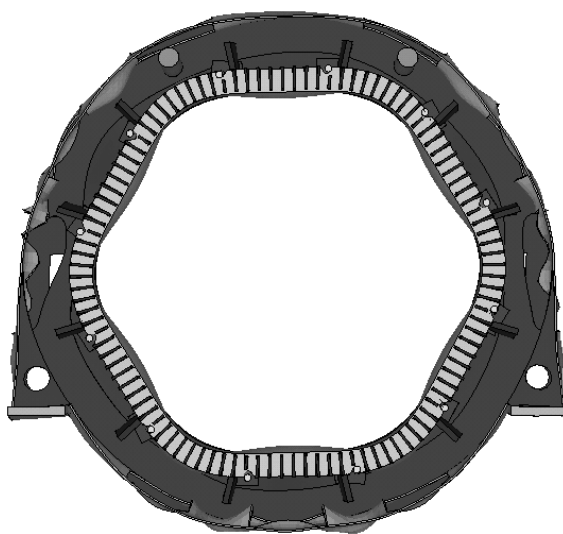
$L_p$	$f$ Hz	$L_p$	$f$ Hz
1	62,4	11	411,9
2	95,6	12	462,9
3	129,4	13	568,4
4	147,8	14	613,7
5	152,8	15	677,9
6	205,9	16	684,8
7	215,4	17	693,7
8	264,8	20	705,9
9	302,4	21	760,7
10	358,2	26	791,2

$L_p$	$f$ Hz
29	841,0
33	871,1
34	902,9
38	913,7
39	918,9
40	927,4
41	932,9
42	935,0
45	956,1
46	969,1

Przykładowe rezultaty analizy modalnej pełnego modelu trójwymiarowego pokazano na rysunkach 5–8. Dla celów prezentacji wyników usunięto część modelu (płyty czołowe).



Rys. 5. Wynik analizy modalnej ( $f=206$  Hz)

Rys. 6. Wynik analizy modalnej ( $f=265$  Hz)Rys. 7. Wynik analizy modalnej ( $f=1000$  Hz)Rys. 8. Wynik analizy modalnej ( $f=1350$  Hz)

#### 4. Podsumowanie

Z przeprowadzonej analizy wynika, że:

- w przedziale do 1 kHz drgania własne wywołane są gł. przez korpus maszyny (żebra, podłużne śruby konstrukcji, itp.),
- konstrukcja dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe1510-12p jest bardzo wrażliwa na drgania – poniżej 1 kHz można znaleźć ok. 50 modów własnych.

#### 5. Literatura

- [1]. ANTAL L., ZAWILAK J., *Kompensacja mocy biernej silnikiem synchronicznym, dwubiegowym o ułamkowym stosunku prędkości*, Prace Nauk. IMiNE. PWr. nr 48, Studia i Materiały nr 20 – Mat. konf. XXXVI Symp. Maszyn Elektr., Szklarska Poręba, 2000, s. 122-130.
- [2]. ANTAL L., ZAWILAK J., *Wyniki badań dwubiegowego silnika synchronicznego*, Zesz. Probl. BOBRME Komel, nr 68, Katowice, 2004, s. 107-112.
- [3]. BIALIK J., ZAWILAK J., ANTAL L., *Polowo-obwodowy model dwubiegowego silnika synchronicznego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 56, Studia i Materiały, Nr 24, Wrocław, 2004, s. 43-54.
- [4]. BIALIK J., ZAWILAK J., *Drgania oraz siły pochodzenia elektromagnetycznego w dwubiegowych silnikach synchronicznych dużej mocy*, Proceedings of XLI International Symposium on Electrical Machines SME 2005, Jarnołtówek, 2005, s. 55-64.
- [5]. WAKELEY K., *Noise problem on large rotating machines*, GEC Journal of Science & Technology, vol. 41, No 4, 1974, pp. 125-134
- [6]. WITCZAK P., KACPERSKI M., *Vibration modeling of a large power induction motor*, Scientific Papers of Technical University of Lodz, no. 965, 2005

#### Adres Autorów

Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn,  
Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław  
e-mail: janusz.bialik@pwr.wroc.pl  
jan.zawilak@pwr.wroc.pl