

*silnik synchroniczny magnetoelektryczny, materiał proszkowy,
symulacje polowe, analiza porównawcza struktur*

Cezary JĘDRYCZKA*, Wiesław ŁYSKAWIŃSKI*,
Jacek MIKOŁAJEWICZ*, Rafał WOJCIECHOWSKI*

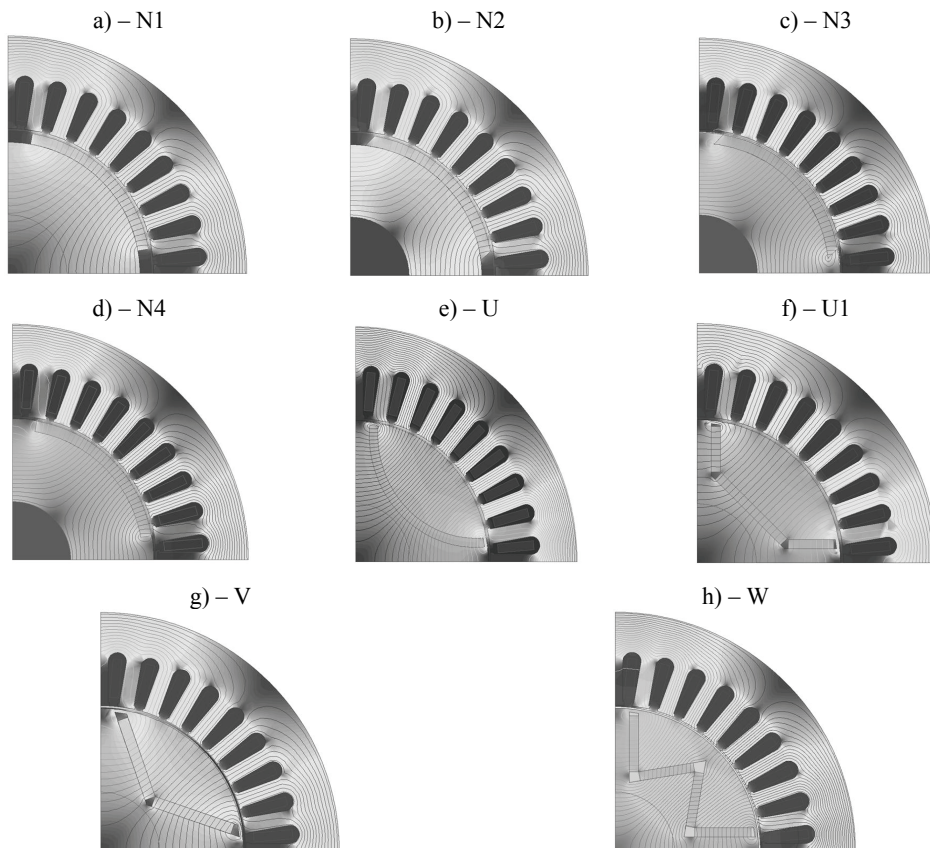
ANALIZA STRUKTUR MAGNETOELEKTRYCZNYCH SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH O ROZRUCHU CZĘSTOTLIWOŚCIOWYM. OBLICZENIA

W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych. Przeanalizowano wpływ rozłożenia i ukształtowania magnesów trwałych w wirniku na rozkład gęstości strumienia magnetycznego w szczeliny powietrznej, przebiegi indukowanych sił elektromotorycznych, momentu zaczepowego i momentu elektromagnetycznego. Porównano otrzymane wyniki dla różnych wariantów konstrukcyjnych silników.

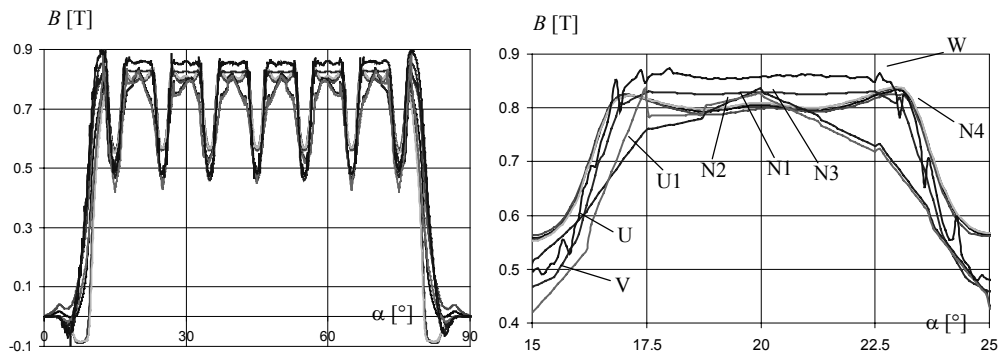
1. WYNIKI OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH

W artykule [1] dotyczącym modelowania struktur silników magnetoelektrycznych o rozruchu częstotliwościowym podano informacje o czterech modelach polowych opracowanych w środowisku Maxwell [2]. Modele te wykorzystano do przeprowadzenia obliczeń polowych i analizy porównawczej wybranych struktur [1]. Pierwszy model symulacyjny wykorzystano do wyznaczenia rozkładów pola magnetycznego (rys. 1) oraz przebiegów składowej radialnej wektora gęstości strumienia magnetycznego w szczeliny powietrznej (rys. 2) rozpatrywanych struktur silników. W celu uzyskania pełniejszej wiedzy o analizowanych strukturach, obliczono zawartość wyższych harmonicznych dla rozkładów pokazanych na rys. 2. Wyniki zestawiono w tabeli 1. W tabeli podano także wartości skuteczne składowej radialnej gęstości strumienia magnetycznego B_r oraz wartości amplitud pierwszych harmonicznych gęstości strumienia (B_{r1}) w szczeliny powietrznej dla rozpatrywanych struktur silników synchronicznych.

* Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań.



Rys. 1. Rozkłady modu indukcji magnetycznej i linii sił pola w rozpatrywanych strukturach
 Fig. 1. Distributions of the magnetic flux density and the magnetic field lines in the considered structures



Rys. 2. Rozkład składowej promieniowej wektora gęstości strumienia w szczelinie powietrznej
 Fig. 2. Waveforms of the radial component of the flux density vector in air gap

Tabela 1. Zestawienie wyznaczonych wartości B_{r1} , THD , B_{avg} , B_{RMS} dla rozkładów składowej radialnej
 Table 1. List of calculated values B_{r1} , THD , B_{avg} , B_{RMS} of the radial component
 of magnetic flux density in the air-gap

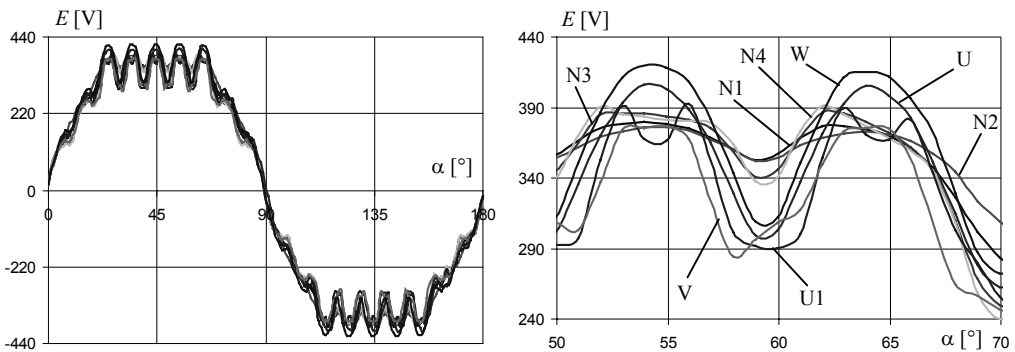
Wariant		N1	N2	N3	N4	U	U1	V	W
B_{r1}	[T]	0,899	0,906	0,891	0,887	0,886	0,841	0,821	0,923
THD	[%]	27,6	28,4	29,5	29,3	33,2	32,2	30,5	33,6
B_{avg}^1	[T]	0,586	0,602	0,567	0,562	0,587	0,56	0,535	0,613
B_{RMS}	[T]	0,659	0,666	0,656	0,654	0,660	0,625	0,606	0,688

Drugi z opracowanych modeli symulacyjnych wykorzystano do wyznaczania przebiegu czasowego sił elektromotorycznych indukowanych w uzwojeniach stojana przy synchronicznej prędkości wirnika. Indukowaną w uzwojeniach siłę elektromotoryczną oblicza się przy założeniu zerowych wartości prądów fazowych oraz przy pracy z wymuszoną prędkością obrotową. Na rysunku 3 porównano przebiegi indukowanych fazowych sił elektromotorycznych (SEM) rozpatrywanych struktur silników przy prędkości synchronicznej 1500 obr/min. Dokładniejszej analizy porównawczej uzyskanych przebiegów SEM dokonano na podstawie zawartości wyższych harmonicznnych (tab. 2).

Tabela 2. Zestawienie wyznaczonych wartości E_1 , THD i E_{RMS} dla przebiegów SEM
 Table 2. List of designated values E_1 , THD i E_{RMS} for Emf waveforms

Wariant		N1	N2	N3	N4	U	U1	V	W
E_1	[V]	421.2	425.5	418.2	417.3	416.5	396.9	387.8	433.6
THD	[%]	12.74	12.3	12.7	12.5	18.2	18.8	17.7	18.1
E_{RMS}	[V]	300.3	304.5	298.1	297.4	299.5	285.6	278.5	311.6

Dla struktur z magnesami naklejanymi (N1-N4) zawartość wyższych harmonicznnych w przebiegach SEM nie przekracza 13% podstawowej harmonicznnej. Pozostałe z rozpatrywanych struktur charakteryzują się wartością THD przebiegów SEM na poziomie 18%.



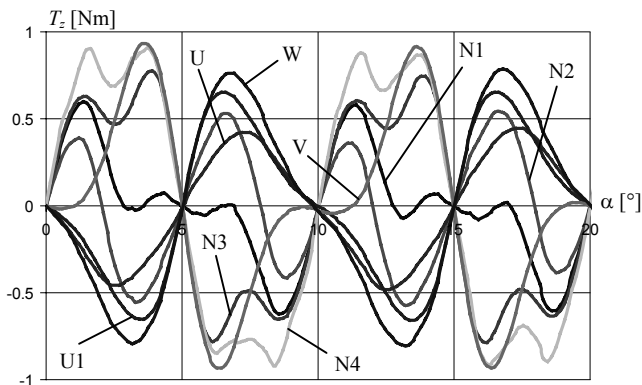
Rys. 3. Przebiegi sił elektromotorycznych indukowanych w wybranej fazie uzwojenia stojana

Fig. 3. Waveforms of electromotive forces induced in the chosen phase of stator winding

¹ Wartość wyznaczona dla podziałki biegunowej.

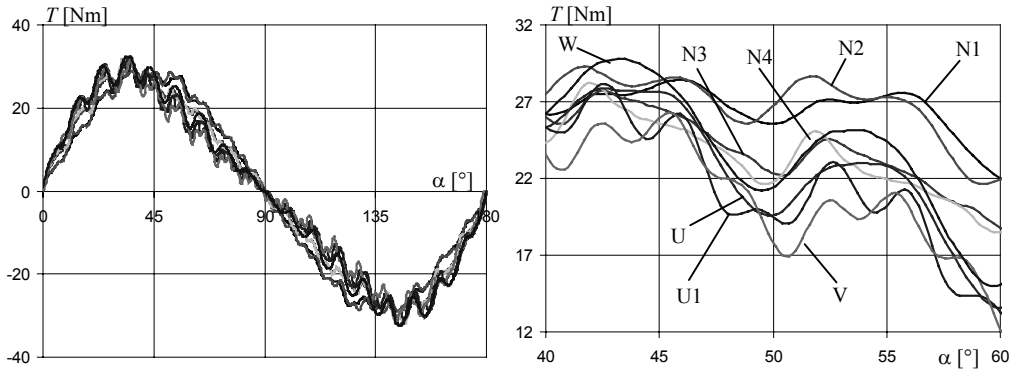
Kolejny opracowany model symulacyjny wykorzystano do wyznaczania przebiegów momentu zaczepowego silnika w funkcji kąta położenia wirnika. W celu ograniczenia wpływu prądów wirowych na uzyskane przebiegi momentu w symulacjach przyjęto małą prędkość obrotową wirnika (0,25 obr/min). Ze względu na okresowy charakter przebiegów momentu zaczepowego dla rozpatrywanych struktur jego analizę można ograniczyć do jednej podziałki żłobkowej. W opracowanym modelu czas symulacji dobrano w taki sposób, by uzyskany przebieg obejmował ponad dwie podziałki żłobkowe. Takie podejście pozwala na sprawdzenie poprawności oraz dokładności opracowanego modelu poprzez porównanie uzyskanych przebiegów dla kolejnych podziałek żłobkowych [3]. Wyznaczone przebiegi momentu zaczepowego przedstawiono na rys. 4. Największą wartość tego momentu ok. 0,9 Nm uzyskuje się dla struktury „V” i „N4”. Dla pozostałych struktur moment zaczepowy był mniejszy.

Ostatni z opracowanych modeli symulacyjnych pozwala wyznaczyć charakterystyki momentowo-kątowe, przy zadanej wartości skutecznej prądu w uzwojeniach. Charakterystyki te uzyskuje się przez obliczanie momentu elektromagnetycznego działającego na wirnik silnika dla kolejnych jego położen kątowych, przy czym w uzwojeniach maszyny modeluje się wybraną chwilę czasową symetrycznego układu trójfazowego dla zadanej wartości skutecznej prądu [4]. Podobnie jak przy wyznaczaniu momentu zaczepowego celowe jest ograniczenie wpływu prądów wirowych. Z tego względu zadana prędkość obrotowa wirnika jest niewielka – 0.5 obr/min.



Rys. 4. Przebieg momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu mechanicznego
Fig. 4. Waveforms of cogging torque as a function of rotor angular position

Wyznaczone przebiegi momentu użytecznego w funkcji kąta obrotu wirnika dla skutecznej wartości prądu fazowego $i_{ph} = 5$ A przedstawiono na rys. 5. W tabeli 3 zestawiono wyznaczone dla rozpatrywanych struktur wartości podstawowej harmonicznej momentu (T_1) oraz obliczony współczynnik zawartości wyższych harmonicznych (THD).



Rys. 5. Przebiegi momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika
 Fig. 5. Waveforms of electromagnetic torque as a function of rotor angular position

Tabela 3. Zestawienie wyznaczonych wartości T_1 , THD dla przebiegów $T = f(\alpha)$
 Table 3. List of calculated values T_1 , THD for waveforms $T = f(\alpha)$

Wariant		N1	N2	N3	N4	U	U1	V	W
T_1	[Nm]	27.9	28.2	27.3	27.2	26.7	25.5	25.1	27.9
THD	[%]	6.7	7.2	17.6	19.2	29.3	29.2	30.2	25.6

2. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone w artykule badania miały na celu porównanie parametrów funkcjonalnych silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi dla spotykanych struktur ich wirników. W silnikach z naklejanymi powierzchniowo magnesami gęstość strumienia magnetycznego wewnątrz pakietu wirnika jest niewielka. Z tego względu w strukturach tych istnieje możliwość stosowania wałów maszyny wykonanych z materiałów niemagnetycznych. Ponadto w maszynach pracujących z dużą dynamiką, w których dąży się do minimalizacji momentu bezwładności wirnika, często celowo zwiększa się średnicę wewnętrzną pakietu wirnika, a pomiędzy wałem i pakietem stosuje się elementy mocujące wykonane z tworzyw sztucznych. W klasycznej technologii pakietowania rdzenia z blach, wymaga to dodatkowego procesu związanego z wykonaniem blach wirnika i powoduje powstanie określonego odpadu. Zastosowanie w konstrukcji takich maszyn technologii proszkowych umożliwia zredukowanie ilości odpadów praktycznie do zera.

Największą wartość indukcji w szczelinie powietrznej oraz indukowaną siłę elektromotoryczną uzyskano dla struktury typu „W” z magnesami wsuwanymi do pakietu wirnika. W konstrukcji tej zastosowano większą liczbę magnesów i lepiej wykorzy-

stano obwód magnetyczny maszyny. Wykonanie blach tego typu wirników w technologii wykrawania przy produkcji seryjnej nie stanowi problemu. Ponadto w odróżnieniu od magnesów powierzchniowych upraszcza się proces ich mocowania. Wadą rozwiązań z magnesami wsuwanymi do pakietu wirnika jest zwiększenie zawartości wyższych harmonicznych, zwłaszcza w przebiegu charakterystyki $T = f(\alpha)$. Ze względu na relatywnie mniejszą reluktancję szczeliny powietrznej (w odniesieniu do struktur z magnesami powierzchniowymi) zwiększa się wpływ oddziaływania twornika. Struktury z magnesami umieszczonymi na powierzchni wirnika (N1 do N4) charakteryzują się mniejszym stopniem odkształcenia przebiegów sił elektromotorycznych.

Prace badawcze współfinansowane przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w projekcie nr POIG.01.01.02-00-113/09 pt. „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa”.

LITERATURA

- [1] JĘDRYCZKA C., ŁYSKAWIŃSKI W., MIKOŁAJEWICZ J., WOJCIECHOWSKI R., *Analiza struktur magnetoelektrycznych silników synchronicznych o rozruchu częstotliwościowym. Modelowanie*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 66, 2012.
- [2] Projekt POIG.01.01.02-00-113/09 pt. *Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa*, raport z prac realizowanych w ramach zadania 2D: *Dobór parametrów stojana i wirnika pod względem minimalizacji momentu zaczepowego*, Prace zrealizowane pod kierownictwem prof. W. Szeląga.
- [3] Projekt POIG.01.01.02-00-113/09 pt. *Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa*, raport z prac zrealizowanych w ramach zadania 7F: *Analiza przydatności komercyjnego oprogramowania firmy Ansys do obliczeń silników magnetoelektrycznych, w tym silników z niejednosłójnymi obszarami przewodzącymi*, Prace zrealizowane pod kierownictwem prof. W. Szeląga.
- [4] DEMENKO A., STACHOWIAK D., *Electromagnetic torque calculation using magnetic network methods*, *Compel*, 2008, Vol. 27, No. 1, pp. 17–26.

ANALYSIS OF VARIABLE SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS STRUCTURES. COMPUTATION

The results of a comparative analysis of chosen variable speed permanent magnet synchronous motors structures are presented. The comparisons of magnetic field distribution, air-gap flux density, electromotive forces, cogging torques and effective torque vs. rotor angular position have presented and analyzed.