

*maszyny z magnesami trwałymi,  
silniki tarczowe z magnesami trwałymi*

Tomasz WOLNIK\*  
Tadeusz GLINKA\*

## **WERYFIKACJA METOD OBLICZENIOWYCH SILNIKÓW TARCZOWYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI**

Specyficzna geometria obwodu elektromagnetycznego maszyn tarczowych sprawia, że dla wybranych zastosowań zainteresowanie tego typu konstrukcjami w ostatnich latach rośnie. W niniejszym artykule przedstawiono przykładowe metody obliczeń obwodów elektromagnetycznych maszyn tarczowych z magnesami trwałymi, których poprawność została zweryfikowana w oparciu o wyniki testów laboratoryjnych. Na podstawie analizy wyników dokonano oceny opracowanego algorytmu obliczeń analitycznych oraz poprawności trójwymiarowego modelu silnika. W podsumowaniu zawarto wnioski i uwagi do tematu.

### **1. WSTĘP**

Szereg różnego rodzaju specyficznych zastosowań zmuszają konstruktorów maszyn z magnesami trwałymi do poszukiwania rozwiązań pozwalających na jak najbardziej efektywne wykorzystanie materiałów czynnych obwodu elektromagnetycznego. Pod uwagę należy więc wziąć rodzinę silników tarczowych, w których wytworzony moment elektromagnetyczny zależy głównie od wymiarów średnicy zewnętrznej i wewnętrznej tarcz [1], ograniczając tym samym wymiar w kierunku osiowym. Takie ukształtowanie obwodu elektromagnetycznego dla zastosowań, w których istotna jest długość osiowa maszyny może okazać się lepszym rozwiązaniem niż zastosowanie klasycznego obwodu cylindrycznego. W niniejszym artykule przedstawiono wybrane sposoby projektowania obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym. Wyniki obliczeń porównano z wynikami badań laboratoryjnych.

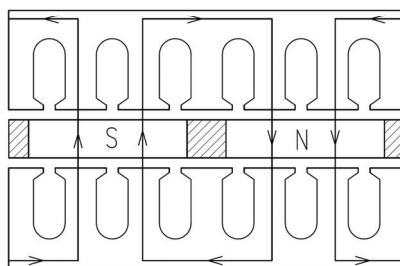
---

\* Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL, al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice, t.wolnik@komel.katowice.pl, info@komel.katowice.pl

## 2. OBLICZENIA OBWODU ELEKTROMAGNETYCZNEGO

Przed przystąpieniem do obliczeń obwodu elektromagnetycznego założono dwuetapowy proces projektowania. W pierwszym etapie opracowano algorytm do obliczeń analitycznych, celem których jest wstępne określenie wymiarów geometrycznych magnetowodu oraz danych nawojowych maszyny. W drugim etapie skupiono się na opracowaniu trójwymiarowego modelu silnika umożliwiające wykonanie obliczeń MES.

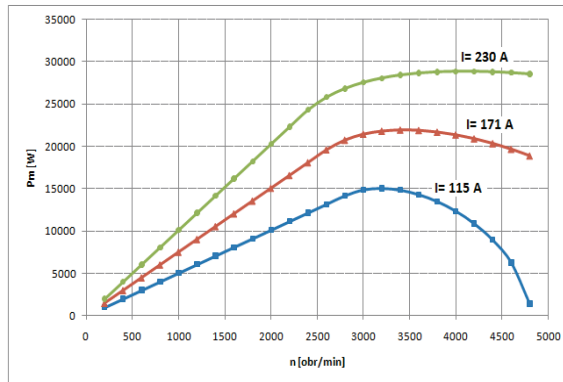
Algorytm obliczeń analitycznych przygotowano w środowisku programowym Mathcad. Przyjęto, że projektowane silniki będą silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi (PMSM). Ze względu na fakt rozpatrywania obwodu elektromagnetycznego maszyny tarczowej w płaszczyźnie dwuwymiarowej założono, że poszczególne obliczenia wykonane będą dla promienia średniego tarcz stojana i wirnika. Poglądowy model obwodu elektromagnetycznego, w oparciu o który obliczany jest strumień maszyny pochodzący od magnesów trwałych przedstawiono na rysunku 1. Po zdefiniowaniu parametrów zasilania silnika ( $U$ ,  $I$ ,  $\beta$ ), wymiarów poszczególnych elementów obwodu, charakterystyk materiałowych oraz danych nawojowych obliczane są poszczególne spadki napięć magnetycznych oraz strumień główny od magnesów trwałych. Na podstawie geometrii magnetowodu obliczany jest też współczynnik rozproszenia strumienia, pomniejszający wartość strumienia głównego. W kolejnym etapie wyliczana jest wartość indukowanej siły elektromotorycznej od magnesów trwałych oraz pozostałe parametry elektryczne i mechaniczne maszyny.



Rys. 1. Rozpływ strumienia magnetycznego w silniku tarczowym z magnesami trwałymi z wirnikiem wewnętrznym

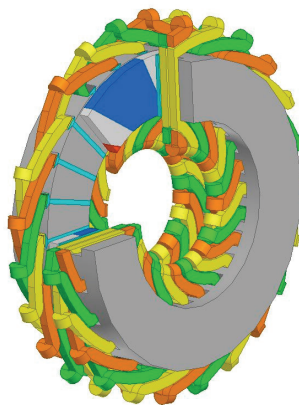
Fig. 1. Propagation of the magnetic flux in permanent magnet disc motor with inner rotor

Na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę mocy mechanicznej silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym dla różnych wartości prądów fazowych. Można zauważyć, że do pewnej prędkości obrotowej moc mechaniczna silnika rośnie liniowo. Moment na wale silnika jest wówczas stały. Po uzyskaniu tzw. prędkości bazowej moment maleje bo realizowane jest tzw. odzwabianie, czyli osłabianie strumienia magnetycznego magnesów trwałych [5]. Dzięki temu silnik może pracować w szerszym zakresie prędkości obrotowych.



Rys. 2. Moc mechaniczna silnika w funkcji prędkości obrotowej dla różnych wartości prądów fazowych  
 Fig. 2. Mechanical power as a function of motor speed for different values of phase currents

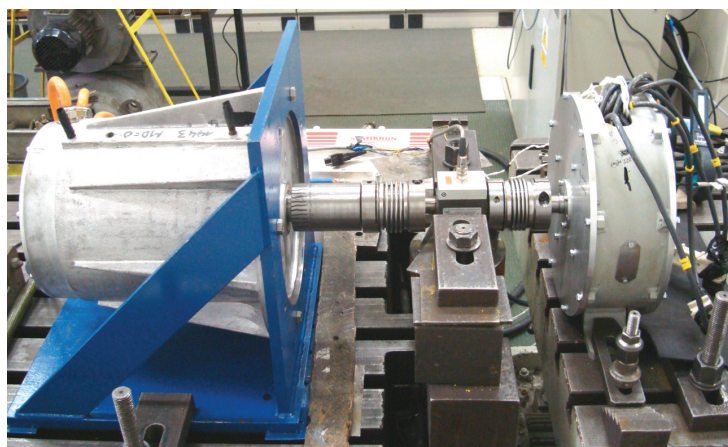
Specyficzna geometria obwodu elektromagnetycznego maszyn tarczowych powoduje, że obliczenia z wykorzystaniem MES powinny być przeprowadzane na modelach trójwymiarowych. Model silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym przedstawiono na rysunku 3. Obliczenia trójwymiarowe umożliwiają wyznaczenie rozkładu indukcji w poszczególnych elementach obwodu, zbadanie wpływu geometrii magnesów trwałych na wartość momentu zaczepowego, wyznaczenie przebiegów czasowych indukowanych napięć oraz wytwarzanego momentu elektromagnetycznego. Niewątpliwą wadą obliczeń na modelu trójwymiarowym jest czas ich trwania oraz zajmowana ilość pamięci na dysku. W celu skrócenia procesu można przeprowadzić obliczenia dla jednej podziałki biegunowej maszyny. Nie zmienia to jednak faktu, że obliczenia trójwymiarowe są czasochłonne, dlatego też ich zakres został ograniczony do kilku punktów pracy silnika.



Rys. 3. Model obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym  
 Fig. 3. Model of electromagnetic circuit of disc motor with inner rotor

### 3. BADANIA LABORATORYJNE

W celu weryfikacji obliczeń elektromagnetycznych, opracowanego algorytmu oraz trójwymiarowego modelu MES, przeprowadzono badania laboratoryjne wykonanego modelu silnika tarczowego. Na rysunku 4 przedstawiono silnik zamontowany na stanowisku badawczym. W trakcie testów zarejestrowano m.in przebiegi indukowanych napięć oraz zmierzono wartość momentu zaczepowego. Badania dla pracy silnikowej przeprowadzono przy sterowaniu maszyny z przemiennika częstotliwości zasilanego ze źródła napięcia stałego. Utrzymując stałą prędkość obrotową silnika, obciążano go coraz większą wartością momentu, rejestrując jednocześnie kolejne punkty pomiarowe [3]. Algorytm sterowania falownika zasilającego nie umożliwiał realizacji odwzbudzenia, dlatego też testy przeprowadzono w ograniczonym zakresie prędkości obrotowej.



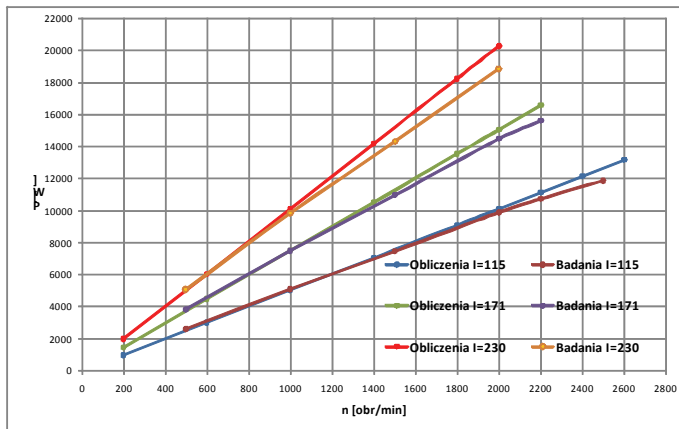
Rys. 4. Silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym na stanowisku badawczym  
Fig. 4. Disc motor with inner rotor on the test bench

### 4. PORÓWNANIE WYNIKÓW

W tabeli 1 zestawiono wyniki badań laboratoryjnych z wynikami obliczeń analitycznych oraz obliczeń z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Na rysunku 5 natomiast przedstawiono graficzne porównanie mocy na wale silnika w funkcji prędkości obrotowej w zakresie prędkości, w jakim fizycznie pracował silnik modelowy.

Tabela 1. Porównanie wyników obliczeń i badań silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym  
 Table 1. Comparison of the results of calculations and tests of disc motor with inner rotor

Parametr	Jednostka	Wyniki obliczeń analitycznych	Wyniki obliczeń MES 3D	Wyniki badań laboratoryjnych
Maksymalny moment zaczepowy	[N·m]	-	1,4	1,6
Prąd	[A]	115	115	115
Prędkość obrotowa	[obr/min]	2000	2000	2000
Napięcie zasilania	[V]	57,4	58,4	79,5
Moc dostarczana do silnika	[W]	10920	11385	11093
Moc na wale silnika	[W]	10114	10537	9885
Moment na wale	[N·m]	48,3	50,3	47,2
Sprawność	%	92,6	92,6	89,1



Rys. 5. Moc na wale w funkcji prędkości obrotowej dla wybranych wartości prądów fazowych – porównanie wyników

Fig. 5. Motor's mechanical power vs. rotational speed for selected phase current values – a comparison of results

## 5. PODSUMOWANIE

Analizując wyniki przedstawione w tabeli 1 oraz na rysunku 5, można stwierdzić, że wyniki badań laboratoryjnych są zbliżone z wynikami obliczeń analitycznych oraz polowych. Należy jednak zauważyć znaczące różnice w wartościach obliczonych i zmierzonych napięć zasilania silnika. Różnice te wynikają z faktu, że obliczenia przeprowadzone były dla podstawowej harmonicznej napięcia zasilania silnika, natomiast obiekt fizyczny zasilany z falownika, zasilany był napięciem zawierającym szereg wyższych harmonicznych, w związku z czym zmierzona wartość skuteczna napięcia zasilania jest wyższa niż wartość obliczeniowa. Podczas badań laboratoryjnych

dokonano pomiaru podstawowej harmonicznego napięcia zasilania. Wartość ta była na podobnym poziomie co wartość obliczona.

Wykonane badania potwierdziły poprawność opracowanego algorytmu oraz modelu trójwymiarowego. Ze względu na zbieżność wyników analitycznych z wynikami badań należy stwierdzić, że nie ma potrzeby obliczania pełnych charakterystyk silnika na modelu trójwymiarowym. Można ograniczyć je do obliczenia kilku punktów pracy i porównać z wynikami z obliczeń analitycznych. Takie podejście znacznie skróci proces projektowania maszyny. Szersze obliczenia MES 3D można za to wykorzystać do obliczeń magnetostaticznych np. obliczenia charakterystyki momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu, rozkładu indukcji magnetycznej w elementach obwodu magnetycznego maszyny czy rozkładu indukcji w szczelinie powietrznej.

#### LITERATURA

- [1] GIERAS J., WANG R., KAMPER M., *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston–London 2004.
- [2] GLINKA T., WOLNIK T., KRÓL E., *Projekt silnika tarczowego z magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, 11/2011, 95–99.
- [3] GLINKA T., WOLNIK T., *Silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym*, Napędy i sterowanie, 12/2011, 18–22.
- [4] PARVIAINEN A., *Design of Axial-Flux Permanent Magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines*, Lappeenranta teknillinen yliopisto, Digipaino 2005.
- [5] ROSSA R., KRÓL E., *Dwustrefowa regulacja prędkości obrotowej w nowoczesnych napędach elektrycznych opartych na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 81/2009, 125–129.

#### VERIFICATION OF COMPUTATIONAL METHODS OF AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET MOTORS

The specific geometry of disc motors electromagnetic circuit causes that the interest in this type of structures in recent years is increasing. This article presents exemplary methods of electromagnetic circuits calculations of axial flux permanent magnet motors, whose correctness has been verified based on the laboratory tests results. On the basis of the outcomes analysis the evaluation of elaborated algorithm of analytical calculations and the accuracy of three-dimensional motor model was made. The summary contains the conclusions and comments on the topic.