

Dominik WOJTASZCZYK\*

## PRĄDNICA TARCZOWA Z POPRZECZNYM STRUMIENIEM

W artykule przedstawiono model prądnicy tarczowej o poprzecznym strumieniu pola magnetycznego. Model w postaci tarczowej upraszcza konstrukcję wirnika ze względu na możliwość użycia do jego budowy materiałów nieprzewodzących. Wzbudzenie maszyny stanowią magnesy trwale umieszczone na wirniku w taki sposób, aby wektor strumienia pola magnetycznego był skierowany prostopadłe do wektora prędkości wirnika. Twornik prądnicy stanowi podwójne uzwojenie pierścieniowe umieszczone pomiędzy kolumnami ferromagnetycznego rdzenia tworzącego stojan maszyny. Parametry obwodu elektromagnetycznego odwzorowano metodą elementów skończonych w oprogramowaniu Maxwell3D. Ze względu na charakterystyczny rozptyw strumienia magnetycznego obliczenia wykonano na modelu trójwymiarowym. Ich celem było wyznaczenie promienia zewnętrznego maszyny, dla którego stosunek generowanej mocy do masy maszyny będzie największy.

SŁOWA KLUCZOWE: prądnica tarczowa, parametryzacja promienia zewnętrznego prądnicy

### 1. WSTĘP

W ciągu ostatnich kilku lat, z powodu rosnącego zapotrzebowanie na energię elektryczną, wzrosła liczba dokumentów i publikacji naukowych związanych z poszukiwaniem nowych konstrukcji prądnic elektrycznych stosowanych jako generatory w elektrowniach wiatrowych. Celem większości tych dokumentów jest opracowanie lub usprawnienie konstrukcji ze względu na poprawę wydajności generatorów. Rozwój technologii związanej z wytwarzaniem magnesów stałych, w szczególności magnesów z ziem rzadkich, powoduje, że powstaje coraz więcej opracowań prądnic tarczowych stosowanych w niewielkich elektrowniach przydomowych. Najczęściej stosowanymi do tej pory konstrukcjami, były prądnice bezrdzeniowe lub z rdzeniem typu torus.

W artykule przedstawiono model prądnicy tarczowej o poprzecznym strumieniu pola magnetycznego względem prędkości obrotowej i płynącego prądu. Główną zaletą stosowania tego typu konstrukcji, jest możliwość uzyskania większego współczynnika gęstości mocy, rozumianego jako stosunek generowanej mocy do masy prądnicy oraz momentu na wale maszyny, w porównaniu z dotychczas stosowanymi prądnicami tarczowymi. Klasyczne modele, zarówno

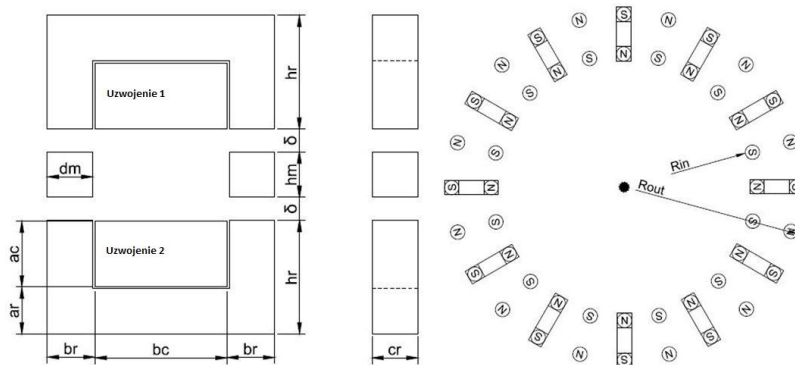
---

\* Politechnika Poznańska.

tarczowe, jak i cylindryczne charakteryzują się dużą indukcyjnością, co w konsekwencji powoduje obniżenie współczynnika mocy. Stosowanie prądnic o poprzecznym strumieniu magnetycznym umożliwia uzyskanie dużego współczynnika mocy oraz upraszcza konstrukcję mechaniczną [2]. Ze względu na charakterystyczny rozptyw strumienia magnetycznego, wirnik maszyny wykonano w postaci magnesów stałych umieszczonych na tarczy, która powinna być wykonana z materiału nieferromagnetycznego. Lepszym rozwiązaniem jest jednak stosowanie materiału nieprzewodzącego. W ten sposób wyeliminowano straty mocy powstałe na skutek indukowania się prądów wirowych w tarczy wirnika. Z podobnych materiałów zbudowana jest podstawa stojana, na której umieszczono rdzeń ferromagnetyczny. Omawiany model prądnicy został częściowo sparametryzowany. Celem parametryzacji było wyznaczenie maksymalnego współczynnika określającego stosunek generowanej mocy do masy maszyny, ze względu na jej wymiary geometryczne. Parametry obwodu elektromagnetycznego maszyny odwzorowano metodą elementów skończonych za pomocą oprogramowania Maxwell 3D.

## 2. MODEL PRĄDNICY

Przedstawiona w niniejszym artykule prądnica jest maszyną jednofazową. W celu uzyskania struktury trójfazowej, należy połączyć trzy identyczne moduły jednofazowe przesunięte względem siebie o 120 stopni. Wzbudzenie prądnicy stanowi układ cylindrycznych magnesów neodymowych NdFeB35 o średnicy  $d_m = 15$  mm i wysokości  $h_m = 10$  mm, umieszczonych na wirującej tarczy, tworzących 12 par biegunów, co przy prędkości obrotowej równej 250 obr/min wymusza częstotliwość generowanego napięcia równą 50 Hz.

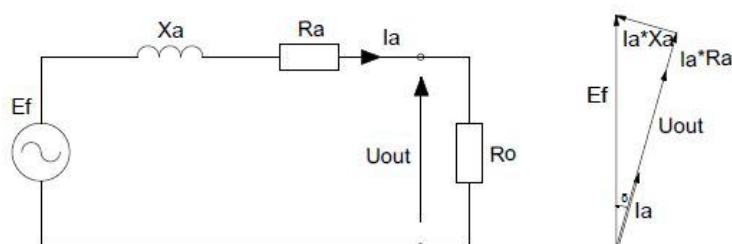


Rys. 1. Wymiary geometryczne modelu prądnicy:  $d_m$  - średnica magnesu,  $h_m$  - wysokość magnesu,  $\delta$  - szczelina powietrzna,  $h_r$  - wysokość rdzenia,  $a_r$  - wysokość jarzma rdzenia,  $b_r$  - szerokość kolumny rdzenia,  $c_r$  - głębokość rdzenia,  $a_c$  - wysokość uzwojenia,  $b_c$  - szerokość uzwojenia,  $R_{in}$  - promień wewnętrzny prądnicy,  $R_{out}$  - promień zewnętrzny prądnicy

Stojan maszyny tworzą 24 rdzenie, wykonane w postaci pakietu blach elektrotechnicznych tworzących kształtkę typu U. Wymiary geometryczne kształtek dobrano w taki sposób, aby przekrój ich ramion tworzył kwadrat, którego długość boku  $b_r$  będzie taka, jak średnica magnesu  $d_m$ . Wysokość kształtki rdzenia  $h_r = 22$  mm. Rdzenie rozmieszczono na okręgu w taki sposób, aby dwie leżące na przeciw siebie kształtki zamykały strumień magnetyczny. Pomędzy kolumnami rdzeni umieszczono podwójne uzwojenie cylindryczne wykonane miedzianym drutem nawojowym o średnicy 1 mm. Kształt uzwojenia dopasowano do wymiarów rdzenia tak, aby cewki wypełniały całą przestrzeń okna kształtki U. Sposób rozmieszczenia poszczególnych elementów prezentowanego modelu prądnicy przedstawiono na rysunku 1.

### 3. MOC I SPRAWNOŚĆ PRĄDNICY

Twornik prądnicy tworzy podwójne uzwojenie pierścieniowe połączone szeregowo. Schemat zastępczy obwodu elektrycznego omawianej prądnicy przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat zastępczy obwodu elektrycznego oraz wykres wektorowy prądnicy

Zgodnie z prawem Kirchhoffa dla jednego uzwojenia:

$$\overline{E_f} = jX_a \overline{I_a} + R_a \overline{I_a} + \overline{U_{out}} \quad (1)$$

Z zależności (1) można wyznaczyć napięcie wyjściowe prądnicy. Przyjmując, że obciążenie jest rezystancyjne moc wyjściową prądnicy można obliczyć z następującego wyrażenia:

$$P_{out} = U_{out} I_a \quad (2)$$

Wewnętrzna moc elektromagnetyczna prądnicy jest zatem sumą mocy elektrycznej  $P_{out}$  w obu uzwojeniach, strat mocy w uzwojeniach  $\Delta P_{cu}$  oraz strat mocy w rdzeniu  $\Delta P_{Fe}$ .

$$P_{elm} = 2P_{out} + 2P_{cu} + \Delta P_{Fe} \quad (3)$$

Straty mocy w rdzeniu zostały obliczone metodą Steinmetz'a na podstawie znajomości wartości strumienia magnetycznego w rdzeniu oraz stratności blachy elektrotechnicznej rdzenia dla odpowiedniej częstotliwości, zgodnie z zależnością:

$$\Delta P_{Fe} = k_t m_{Fe} p \left( \frac{B_m}{B_{1T}} \right)^2 \left( \frac{f}{f_{50}} \right)^{1,33} \quad (4)$$

gdzie:  $k_t$  - współczynnik uwzględniający niesinusoidalne przemagnesowanie oraz stosowaną obróbkę technologiczną blach rdzenia [5],  $m_{Fe}$  - masa rdzenia,  $p$  - stratność jednostkowa blachy,  $B_m$  - indukcja magnetyczna,  $B_{1T}$  indukcja odniesienia  $B_{1T} = 1T$ ,  $f$  - częstotliwość,  $f_{50}$  - częstotliwość odniesienia  $f_{50} = 50$  Hz.

Straty mocy w uzwojeniach obliczono na podstawie zależności:

$$\Delta P_{cu} = I_a^2 R_a \quad (5)$$

Sprawność maszyny określana jest jako stosunek wyjściowej  $P_{out}$  do mocy wejściowej  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{2P_{out}}{P_{in}} \quad (6)$$

Moc wejściowa jest sumą mocy elektromagnetycznej i strat mechanicznych, które przyjęto ok. 5% mocy wyjściowej prądnicy.

#### 4. PARAMETRYZACJA MASZYNY

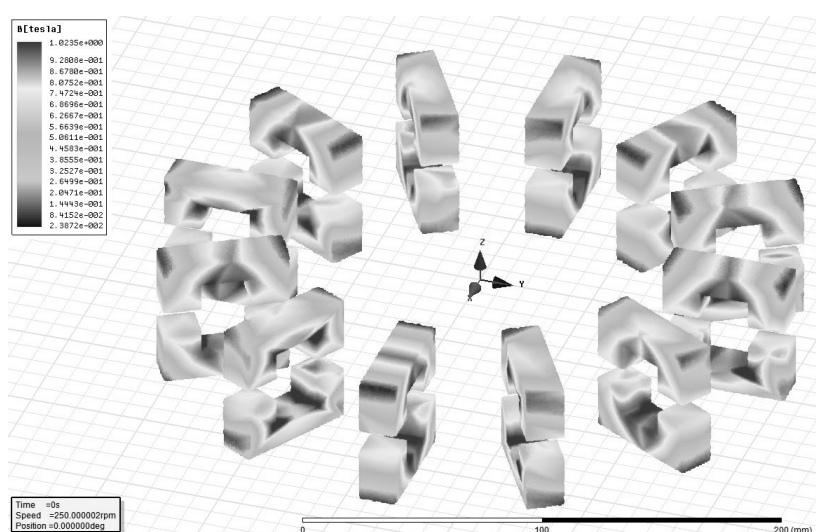
Celem parametryzacji było wyznaczenie największego promienia zewnętrznego maszyny  $R_{out}$ , przy którym moc prądnicy w stosunku do jej masy osiągnie maksymalną wartość. Promień wewnętrzny ma stały wymiar  $R_{in} = 85$  mm. Jego najmniejszą wartość określają wymiary geometryczne węzła łożyskowego. Obliczenia obwodu elektromagnetycznego prądnicy wykonano metodą elementów skończonych zaimplementowaną w oprogramowaniu Maxwell 3D. Promień zewnętrzny maszyny zmieniano z krokiem 5 mm. Zwiększenie promienia  $R_{out}$  przy niezmiennym promieniu zewnętrznym  $R_{in}$  powodowało proporcjonalny wzrost pola przekroju uzwojeń i długości jarzma rdzenia. Wzrost pola powierzchni uzwojeń, przy zachowaniu stałej średnicy drutu nawojowego, skutkuje wzrostem liczby zwojów. To z kolei wpływa na zwiększenie generowanego napięcia, a tym samym i mocy maszyny. Jednocześnie wzrasta także objętość miedzi oraz rosną straty w uzwojeniach. Z tego powodu zdecydowano się na wyznaczenie takiej wartości promienia zewnętrznego maszyny, dla którego wartość współczynnika  $k$ , określającego wartość mocy wytwarzanej z jednostki masy prądnicy będzie najwyższa.

W pierwszej fazie badań symulacyjnych wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej w rdzeniu oraz szczelinie powietrznej dla poszczególnych wartości promienia zewnętrznego maszyny. Na rysunku 3 przedstawiono rozkład indukcji magnetycznej w rdzeniu stojana dla promienia zewnętrznego  $R_{out} = 133$  mm w określonej chwili czasowej.

Na podstawie wyznaczonej indukcji magnetycznej, obliczono straty mocy występujące w rdzeniu ferromagnetycznym prądnicy. W dalszej kolejności wyznaczono poszczególne rezystancje uzwojeń oraz obliczono straty mocy w uzwojeniach. Otrzymane wartości przedstawiono w Tabeli 1.

Następnie wyznaczono współczynnik  $k$ , będący ilorazem mocy wyjściowej prądnicy i jej masy.

$$k = \frac{P_{\text{out}}}{m} \quad (7)$$

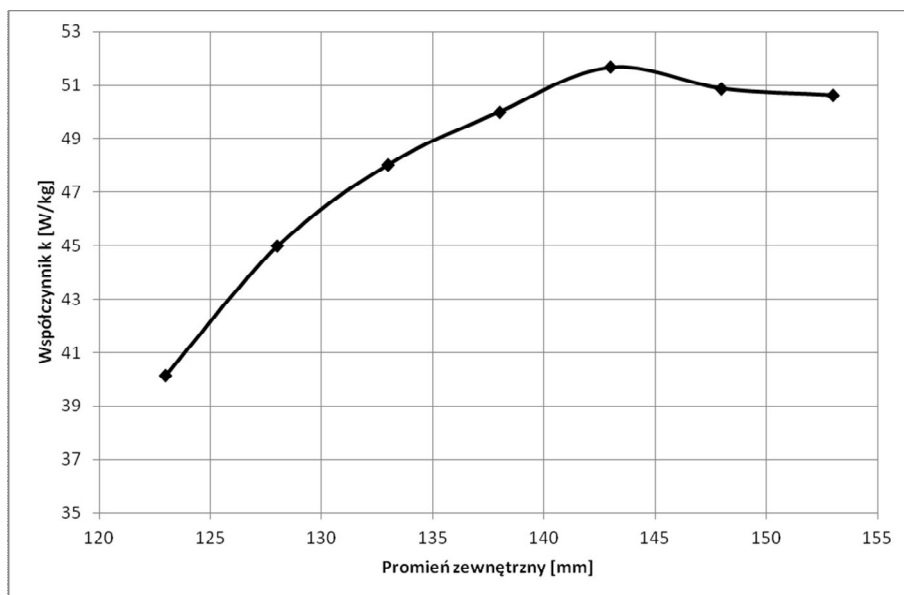


Rys. 3. Rozkład indukcji w rdzeniu stojana

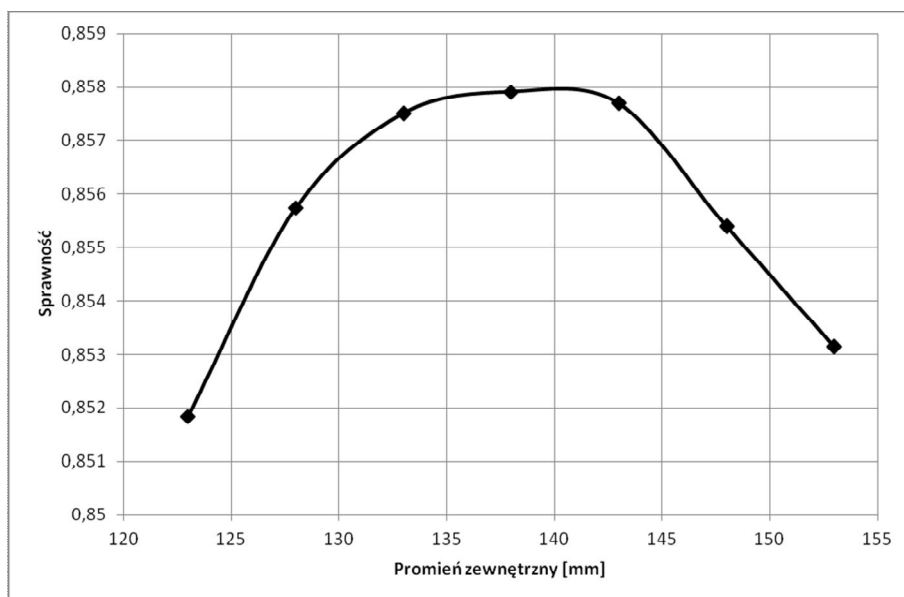
Na podstawie wyznaczonego iloczynu momentu napędowego i prędkości kątowej oraz mocy  $P_{\text{out}}$  obliczono sprawność prezentowanej prądnicy. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Na rysunku 6 przedstawiono przebieg indukowanej w uzwojeniach siły elektromotorycznej.

Tabela 1. Straty mocy prądnicy

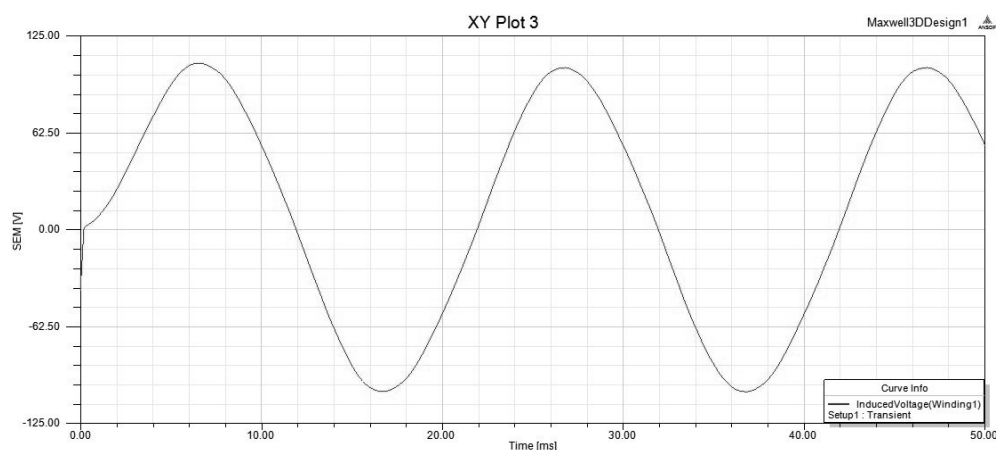
$R_{\text{out}}$ [mm]	$B_m$ [T]	$\Delta P_{\text{Fe}}$ [W]	$\Delta P_{\text{cu}}$ [W]
123	0,723	6,568	7,665
128	0,718	6,975	9,736
133	0,702	7,144	11,902
138	0,683	7,214	14,162
143	0,669	7,354	16,516
148	0,632	6,949	18,965
153	0,608	6,788	21,509



Rys. 4. Zmienność współczynnika k



Rys. 5. Sprawność prądnicy



Rys. 6. Przebieg SEM indukowanej w uzwojeniach

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule omówiono konstrukcję prądnicy tarczowej o poprzecznym strumieniu pola magnetycznego. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych związanych z wyznaczeniem takiej wartości promienia zewnętrznego, dla którego współczynnik generowanej mocy do masy maszyny jest największy.

Współczynnik ten osiąga maksimum dla promienia  $R_{out} = 143$  mm. Sprawność natomiast jest najwyższa dla  $R_{out} = 138$  mm. Zwiększenie sprawności można osiągnąć poprzez zwiększenie pola przekroju drutu nawojowego uzwojeń. Przebieg SEM jest bardzo zbliżony do sinusoidalnego. Ze względu na innowacyjność konstrukcji należy kontynuować badania przedstawionej maszyny.

## LITERATURA

- [1] Dobzhanskyi O., Study on Permanent Magnet Transverse Flux Machine, Ph.D. Thesis, Louisiana State University, May 2012.
- [2] Glinka T., Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [3] Glinka T., Król E., Białas A., Wolnik T., Silniki tarczowe z magnesami trwałymi, Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne nr 87/2010.
- [4] Hosseini S., Moghani J.S., Ershad N.F., Jensen B.B., Design, Prototyping, and Analysis of a Novel Modular Permanent-Magnet Transverse Flux Disk Generator, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 4, april 2011.
- [5] Makowski K., Straty, sprawność i współczynnik mocy jednofazowego silnika indukcyjnego z pomocniczym uzwojeniem zwartym i nierównomierną szczeliną, Rozprawy Elektrotechniczne, z. 3, 709-718, 1984.

- [6] Paplicki P., Optymalizacja maszyny tarczowej z magnesami trwałymi z wykorzystaniem metod polowych, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 66, Studia i materiały nr 32, 2012.
- [7] Svechkarenko D., On Design and Analysis of a Novel Transverse Flux Generator for Direct-driven Wind Application, Ph.D. Thesis, Stockholm, Sweden 2010.

### **DISC GENERATOR WITH CROSS STREAM**

The article presents a model of generator disc with transverse magnetic field flow. Model in the form of a disc simplifies the construction of the rotor due to the possibility for use for the construction of non-conductive materials. Excitation machines constitute permanent magnets on the rotor in such a way that the magnetic flux vector is directed perpendicular to the velocity vector of the rotor. The armature winding of the generator is a double-ring placed between the columns of the ferromagnetic core forming the stator of the machine. Circuit parameters mapped electromagnetic finite element software Maxwell3D. Due to the characteristic of the magnetic flux calculation spreading was performed on a three-dimensional model. Their aim was to determine the radius of the external machine for which the ratio of power generated to the mass of the machine will be the greatest.