

*generator turbiny wiatrowej, maszyna ze strumieniem osiowym,  
generator tarczowy, bezzłobkowy stojan, napięcie rotacji*

Adrian MŁOT\*, Mariusz KORKOSZ\*\*,  
Marian ŁUKANISZYN\*

## **ANALIZA BEZZŁOBKOWEGO 3-FAZOWEGO GENERATORA TARCZOWEGO DLA MAŁEJ PRZYDOMOWEJ ELEKTROWNI WIATROWEJ**

W artykule przedstawiono analizę wybranych parametrów całkowych generatora o strumieniu osiowym, którego głównym zastosowaniem będzie praca w małej elektrowni wiatrowej. Celem pracy było osiągnięcie żądanej wartości napięcia rotacji wystarczającej do ładowania baterii akumulatorów. W celu zrealizowania tego zadania, zbudowano trójwymiarowy model połowy 3-fazowego bezzłobkowego generatora bazujący na metodzie elementów skończonych (MES). Na bazie modelu połowobwodowego wyznaczono charakterystyki wyjściowe generatora i jego sprawność.

### **1. WSTĘP**

W wielu wdrażanych bądź stosowanych obecnie aplikacjach maszyny tarczowe są wykonywane w różnych konfiguracjach o różnej geometrii, a także różnym sposobem wykonania poszczególnych elementów maszyny [1–8, 10]. W niniejszym artykule przedstawiono model numeryczny trójfazowego bezzłobkowego generatora małej mocy o stosunku liczby biegunów stojana do wirnika równym 12/8. Zastosowano trapezoidalny kształt cewek i magnesów. Przedstawiony generator może być użyty do zasilania systemu elektrycznego o niewielkim obciążeniu np. urządzenia elektryczne związane z oświetleniem [9]. Turbiny wiatrowe używa się powszechnie do ładowania baterii lub większych akumulatorów bezpośrednio z układu prostownikowego. W związku z przeznaczeniem badanego generatora do bardzo małej elektrowni wiatrowej wymaga się, aby napięcie indukowane w uzwojeniach (napięcie rotacji) było odpowiednio wysokie. Wielkość pożądanego napięcia będzie uzależniona od ilości

---

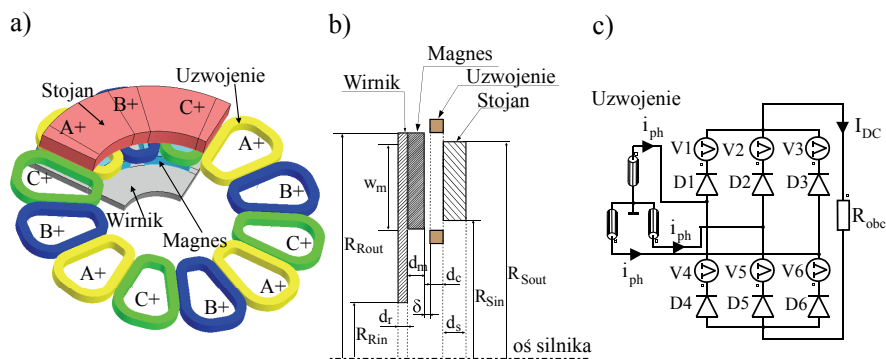
\* Politechnika Opolska, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, a.mlot@po.opole.pl

\*\* Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, mkosz@prz.edu.pl

połączonych w szereg akumulatorów. Zaprojektowany model generatora ma pracować przy zmiennej prędkości, zależnej od zmian prędkości wiatru.

## 2. OPIS KONSTRUKCJI BADANEGO GENERATORA

Prezentowany generator nie wymaga zaawansowanej technologii oraz może zostać wykonany w warunkach warsztatowych. Brak przekładni sprawia, że koszty budowy turbiny wiatrowej są znacznie mniejsze. Na rysunku 1a przedstawiono model połowy generatora tarczowego. W celu odwzorowania pełnego obwodu elektrycznego i obwodu magnetycznego rozpatrywanego układu generator-prostownik model połowy połączono z modelem obwodowym (rys. 1c). Tarcza wirnika wykonana jest z litej stali o grubości  $d_r = 3$  mm. Na jej wewnętrznej powierzchni zamocowane są ferrytowe magnesy w kształcie trapezoidalnym wytwarzające strumień w kierunku osiowym. Z uwagi na użycie magnesów ferrytowych o rozpiętości kątovej  $\gamma = 30^\circ$  i o nie dużej wartości indukcji magnetycznej ( $B_r = 0,66$  T) ograniczony został efekt nadmiernego nasycania się rdzenia stojana i wirnika pomimo znacznej grubości magnesów ( $d_m = 5$  mm).



Rys. 1. Model badanego generatora (a), jego przekrój osiowy (b) oraz obwód elektryczny (c)  
Fig. 1. Generator model (a), and cross section (b) of axial flux generator, and electric circuit (c)

Rdzeń stojana o grubości  $d_s = 7$  mm został wykonany ze stali krzemowej (ang. *silicon-iron steel*) jako pakiet zwinięty z taśmy w dysk celem ograniczenia prądów wirowych. Na obwodzie stojana umieszczono 12 cewek, każda o liczbie zwojów równej  $N_t = 124$  i o grubości  $d_c = 4$  mm. Na każde pasmo przypadają po cztery cewki połączone szeregowo. Oszacowana rezystancja każdej fazy wynosi  $11,37 \Omega$ . W modelu przewidziano wykonanie uzwojeń skupionych, które zapewniają krótsze połączenia czołowe w kierunku promieniowym. W maszynach elektrycznych ze strumieniem osiowym takie uzwojenie rozwiązuje problem ograniczonej przestrzeni pomiędzy wałem generatora i promieniem wewnętrznym rdzenia stojana. Problem taki wystę-

puje w przypadku konwencjonalnych maszyn ze strumieniem promieniowym. Ponadto krótkie połączenia czołowe uzwojenia w generatorze tarczowym zmniejszają zewnętrzną średnicę rdzenia stojana oraz ograniczają straty w miedzi, co przyczynia się do poprawy sprawności maszyny. Dzięki zastosowaniu struktury bezzłobkowej nie występują negatywne zjawiska takie jak pulsacje w rozkładzie przestrzennym indukcji magnetycznej w szczelinie oraz nasycanie się zębów.

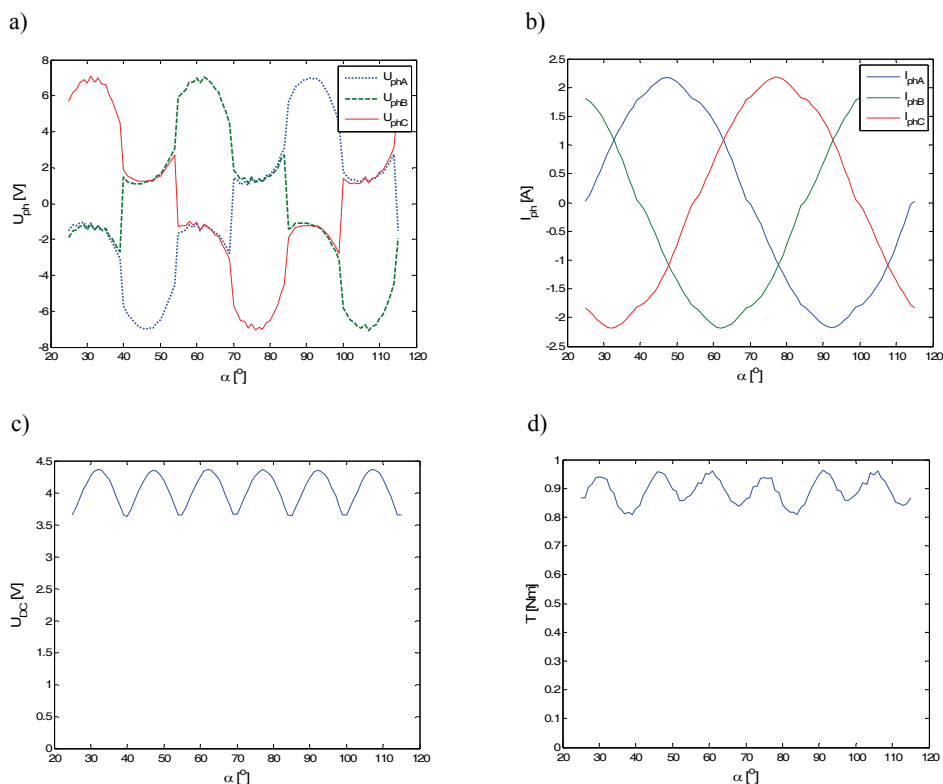
Przekrój osiowy prototypu generatora pokazano na rysunku 1b. Stosunek promienia wewnętrznego do zewnętrznego odpowiednio wynosi dla stojana  $R_{\text{Sin}}/R_{\text{Sout}} = 34 \text{ mm}/58 \text{ mm}$  oraz dla wirnika  $R_{\text{Rin}}/R_{\text{Rout}} = 17,2 \text{ mm}/69,2 \text{ mm}$ . Szczelina powietrzna pomiędzy rdzeniem stojana a wirnikiem tj. do powierzchni magnesu wynosi  $5,5 \text{ mm}$  ( $\delta + d_c$ , gdzie  $\delta = 1,5 \text{ mm}$ ). Szczelina ta zapewnia przestrzeń ulokowania uzwojeń generatora. Od wielkości cewek zależy uzyskanieżądanego napięcia indukowanego w uzwojeniu. Aby zapewnić maksymalne wykorzystanie długości czynnej cewek stojana i tym samym wytworzenie większego strumienia magnetycznego zamykającego się w rdzeniach stojana i wirnika, magnesy oraz cewki umieszczono tak, aby były usytuowane centralnie na powierzchni rdzenia stojana.

W obliczeniach omawianych w pracy nie uwzględniono strat w magnesach oraz w żelazie i miedzi, ze względu na niskie częstotliwości pracy oraz brak uzłobkowanego rdzenia stojana oraz wystarczająco dużą odległość pomiędzy rdzeniem wirnika i stojana. Prądy wirowe generowane w magnesach są wynikiem zawartości wyższych harmonicznych w napięciu indukowanym w uzwojeniu stojana i w przypadku badanego generatora prądy te będą znikome. Natomiast prądy wirowe w rdzeniu stojana zostały znacząco ograniczone dzięki zastosowaniu taśmy zwiniętej w pierścień, tworząc w ten sposób pakietowany bezzłobkowy rdzenia stojana.

Głównym założeniem w badaniach było zaprojektowanie w taki sposób obwodu magnetycznego generatora, aby mógł on pracować z akumulatorami o napięciu  $14 \text{ V}$ . Przyjęto, że docelowo maksymalnie będzie użytych kilka akumulatorów połączonych szeregowo. Dlatego też maksymalne żądane napięcie indukowane w uzwojeniu stojana nie powinno przekraczać np.  $56 \text{ V}$ .

### 3. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

Obliczenia parametrów całkowych pola magnetycznego w modelu polowym generatora wykonano przy użyciu programu do wyznaczania rozkładu pola na podstawie modelu trójwymiarowego bazującego na metodzie elementów skończonych [2]. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe zależności napięć  $u_{ph}$  i prądów fazowych  $i_{ph}$ , a także napięcie wyprostowane  $U_{DC}$  oraz moment elektromagnetyczny  $T$ . Obliczenia wykonano dla prędkości  $n = 1000 \text{ obr/min}$  i rezystancji obciążenia  $R_{obc} = 2 \Omega$ .

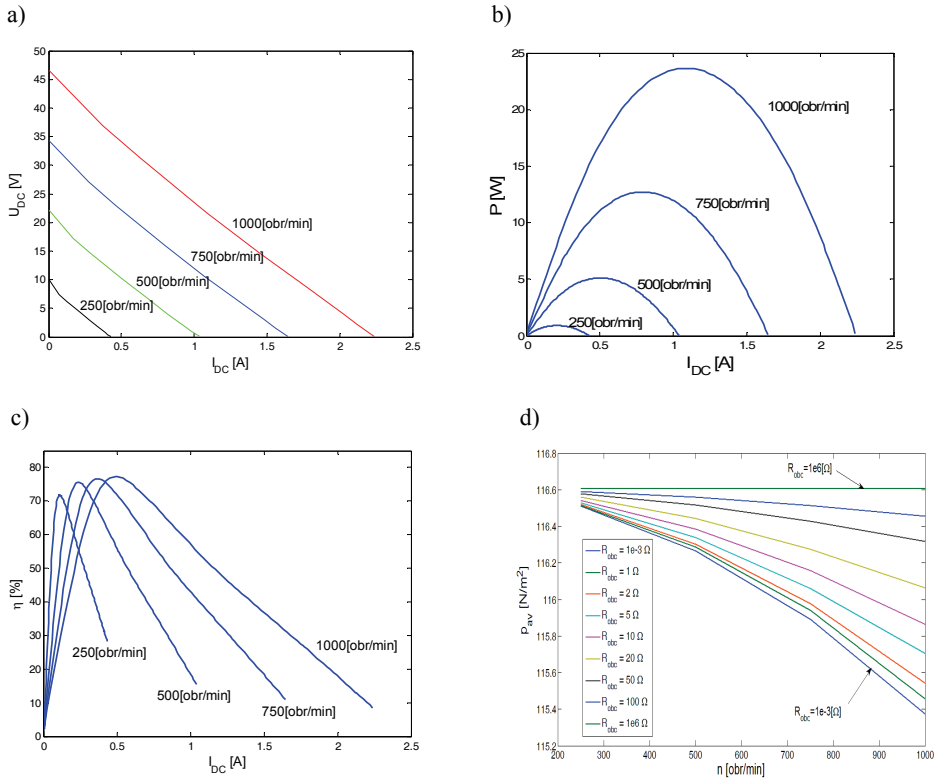


Rys. 2. Zależność napięć fazowych (a), prądów fazowych (b), napięcia wyprostowanego na obciążeniu (c) oraz momentu elektromagnetycznego (d) w funkcji położenia wirnika dla 1000 obr/min i  $R_{obc} = 2 \Omega$

Fig. 2. Output voltage  $u_{ph}$  (a), and current  $i_{ph}$  (b) induced in the winding, rectifier voltage (c) and electromagnetic torque (d) vs. rotor position for 1000 rpm and  $R_{obc} = 2 \Omega$

Projektowany model generatora będzie pracował nie tylko przy zmiennej prędkości, ale również przy zmiennym obciążeniu w zależności od wymagań potencjalnych klientów. W tym celu wykonano obliczenia dla różnych obciążeń poczynając od stanu zwarcia po stan jałowy dla różnych prędkości (250 obr/min, 500 obr/min, 750 obr/min oraz 1000 obr/min). Na podstawie zmienności napięcia wyprostowanego  $U_{DC}$  w funkcji prądu  $I_{DC}$  na obciążeniu rezystancyjnym (rys. 3a) wyznaczono moc wyjściową  $P = U_{DC} \cdot I_{DC}$  generatora dla różnych prędkości obrotowych (rys. 3b). Kolejny rysunek 3c przedstawia sprawność generatora w funkcji prądu  $I_{DC}$ , którą wyznaczono jako stosunek mocy wyjściowej  $P_{out} = 3 \cdot i_{ph} \cdot u_{ph}$  do sumy mocy wejściowej na wale  $P_{in} = T \cdot \omega$  ( $\omega$  – prędkość kątowna) i mocy mechanicznej. Moc mechaniczną określono na podstawie iloczynu prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego. Maksymalna sprawność generatora, jaką otrzymano wynosiła 75% (przy prędkości 1000 obr/min

dla założonej temperatury pracy 20 °C). Do obliczenia gęstości siły magnetycznej  $p$  działającej w kierunku osiowym na wirnik generatora wykorzystano metodę tensora naprężeń Maxwella (rys. 3d).



Rys. 3. Napięcie na obciążeniu (a), moc wyjściowa generatora (b), sprawność generatora w funkcji prądu obciążenia (c) oraz gęstość siły magnetycznej działającej w kierunku osiowym dla różnych prędkości i obciążeń (d)

Fig. 3. Rectifier voltage (a), output power (b), generator efficiency (c) vs. current induced in the winding, and axial magnetic force density for different speeds and loads (d)

#### 4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono analizę połową wybranych parametrów całkowitych trójfazowego bezźłobkowego silnika tarczowego z niskoenergetycznymi magnesami trwałymi pracującego jako generator turbiny wiatrowej małej mocy, o stosunku biegunów stojana do wirnika równym 12/8. Celem pracy było sprawdzenie czy wyindukowane napięcie rotacji w uzwojeniu każdej z faz będzie wystarczające do naładowa-

nia żądanej liczby akumulatorów połączonych szeregowo, a także wyznaczenie sprawności generatora.

#### LITERATURA

- [1] ANDRIOLLO M., BERTOLI M., MARTINELLI G., MORINI A., TORELLA A., *Permanent magnet axial flux disc generator for small wind turbines*, Electrical Machines, ICEM, IEEE, September 2008, pp. 1–6.
- [2] Flux 10.3 Documentation, 2009, Cedrat Group.
- [3] GERLANDO A., FOGLIA G., IACCHETTI M., PERINI R., *Axial flux PM machines with concentrated armature windings: Design analysis and test validation of wind energy generators*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 9, September 2011, pp. 3795–3805.
- [4] GIANGRANDE P., CUPERTINO F., PELLEGRINO G., RONCHETTO D., GERADA C., SUMNER M., *Analysis of two-part rotor, axial flux permanent magnet machines*, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE, 17–22 September 2011, pp. 1576–1581.
- [5] GLINKA T., TOMASZKIEWICZ W., *Silniki tarczowe*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 80, 2008, s. 232–237.
- [6] GLINKA T., JAKUBIEC M., *Rozwiązania silników tarczowych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 77, 2007, s. 243–249.
- [7] GLINKA T., KRÓL E., WOLNIK T., *Model polowy bezrdzeniowej maszyny tarczowej*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 86, 2010, s.187–190.
- [8] JAVADI S., MIRSALIM M., *Design and analysis of 42-V coreless axial-flux permanent – magnet generators for automotive applications*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No. 4, April 2010, pp. 1015–1023.
- [9] LOUIE H., *Experiences in the construction of open source low technology off-grid wind turbines*, Power and Energy Society General Meeting, IEEE, July 2011, pp. 1–7.
- [10] MENDRELA E., MOCH J., PADUCH P., *Właściwości elektromechaniczne bezszczotkowego silnika tarczowego prądu stałego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 50, Studia i Materiały ,Nr 22, 2000, s. 189–198.

#### INTEGRAL PARAMETERS ANALYSIS OF A 3-PHASE SLOTLESS AXIAL FLUX WIND POWER GENERATOR

This paper presents calculation results obtained on the basis of three-dimensional model an axial flux permanent magnets wind generator such as electromagnetic torque, induced voltage per phase, output power and generator efficiency. The axial flux (disc shape) ferrite magnets machine is an attractive alternative to radial flux (cylindrical shape) machines in wind turbine applications. The presented axial flux configuration is amenable to the low speed operation of a direct drive wind energy system. The main task of generator design was to achieve a high rectified voltage and efficiency. The main advantage of the presented construction is high efficiency, low weight, reduced system size, and noise.