

**Tomasz Wolnik, Andrzej Białas**  
BOBRME Komel, Katowice

## WOLNOOBROTOWY, BEZRZENIOWY GENERATOR TARCZOWY O MOCY 2 kW

### LOW-SPEED, CORELESS AXIAL FLUX GENERATOR WITH POWER 2 kW

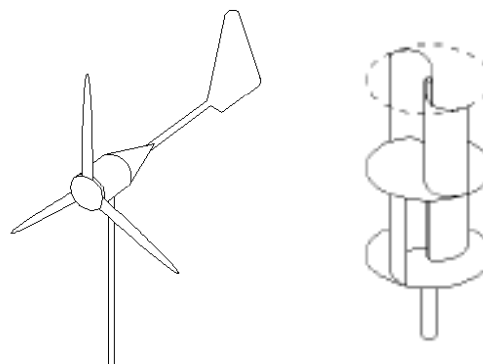
**Abstract:** This article presents a low-speed axial flux permanent magnet generator with power 2 kW. This generator, ( the number of poles  $2p=40$ ) is designed and manufactured as coreless with the special advantage of a complete lack of cogging torque. Due to the large disc machine diameter this kind of generator can be applied especially to wind turbine with the vertical axis of rotation.

### 1. Wprowadzenie

Coraz większym zainteresowaniem odbiorców indywidualnych w Polsce cieszą się małe elektrownie wiatrowe. Zarówno aspekty środowiskowe, ale przede wszystkim ekonomiczne zachęcają do wykorzystywania energii wiatru jako źródła energii elektrycznej. Ilość wytworzonej energii zależy głównie od siły wiejącego wiatru, toteż dla elektrowni z turbinami o poziomej osi obrotu (rys.1a) koniecznym jest usytuowanie w miejscu o silnym jego natężeniu. Dla prawidłowej pracy elektrownie te wymagają również mechanizmu ustawiającego turbinę w kierunku wiejącego wiatru. Inna sytuacja ma miejsce w przypadku elektrowni wiatrowych o pionowych osiach obrotu (rys.1b). Ich konstrukcja pozwala na montaż w zabudowanych przestrzeniach, między innymi na dachach budynków, co powoduje że nie jest koniecznym wydzielanie dodatkowego miejsca do budowy wysokiego masztu. Ponadto szczególną ich zaletą jest fakt, że mogą pracować niezależnie od kierunku wiejącego wiatru i nie wymagają do tego dodatkowych mechanizmów ustawiania pod wiatr [6].

W niniejszym artykule przedstawiono wolnoobrotowy, bezrdzeniowy generator tarczowy o mocy 2 kW. Dobrana liczba biegunów generatora  $2p=40$  pozwala na pracę przy niewielkich prędkościach obrotowych, a tym samym eliminuje konieczność stosowania mechanizmu przekładni. Stosunkowo duża średnica zewnętrzna oraz ograniczona długość osiowa maszyn tarczowych sprawia, że mogą one znaleźć zastosowanie w małych elektrowniach wiatrowych, w szczególności w elektrowniach o pionowej osi obrotu. Bezrdzeniowe uzwojenie całkowicie eliminuje moment zaczepowy, a zatem do rozruchu potrzebna jest wartość momentu

większa jedynie od wartości momentu bezwładności wirnika. W artykule przedstawiono model obliczeniowy oraz wykonany fizycznie model generatora tarczowego. Wyniki obliczeń analitycznych porównano z wynikami obliczeń trójwymiarowych oraz wynikami badań laboratoryjnych.



a) b)

Rys. 1. Przykładowy model elektrowni wiatrowej a) o poziomej osi obrotu, b) o pionowej osi obrotu [6]

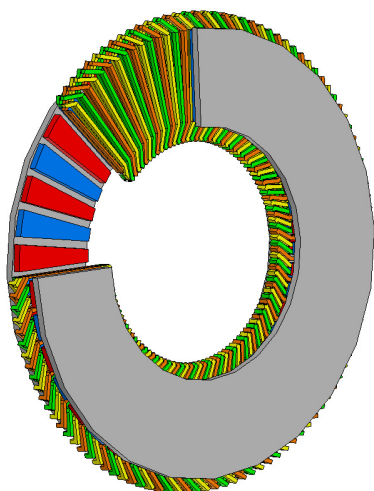
### 2. Model obliczeniowy prądnicy

Przedstawiony w artykule model generatora dla obciążenia rezystancyjnego  $\cos\varphi=1$  oraz prędkości  $n=90$  obr/min posiada następujące dane:

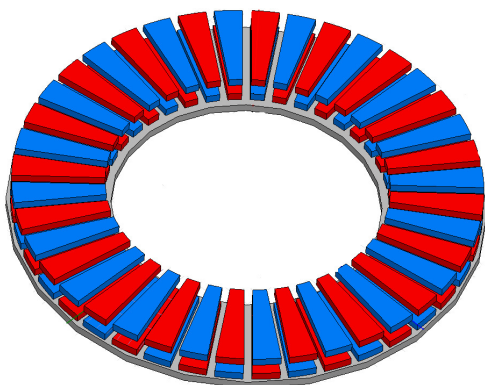
Moc	$P = 2 \text{ kW}$
Napięcie międzyfazowe	$U = 250 \text{ V}$
Prąd fazowy	$I = 4.7 \text{ A}$
Sprawność	$\eta = 85,6 \%$
Częstotliwość	$f = 30 \text{ Hz}$

Model obliczeniowy generatora przedstawiono na rysunku 2. Generator zbudowany jest z dwóch tarcz wirnika, które są elementem ze-

wnętrznym maszyny, a jednocześnie elementem obudowy. Bezrdzeniowe uzwojenie stojana umieszczone jest na wale i stanowi element wewnętrzny prądnicy. Magnesy trwałe montowane są powierzchniowo do stalowych tarcz wirnika. Magnesy umieszczone są w taki sposób, że naprzeciw magnesu o polaryzacji N leży magnes polaryzacji S. Ponadto dla jednej tarczy obok magnesu N umieszczony jest magnes S (rys.3).



Rys. 2. Model obliczeniowy bezrdzeniowej prądnicy tarczowej o mocy 2 kW

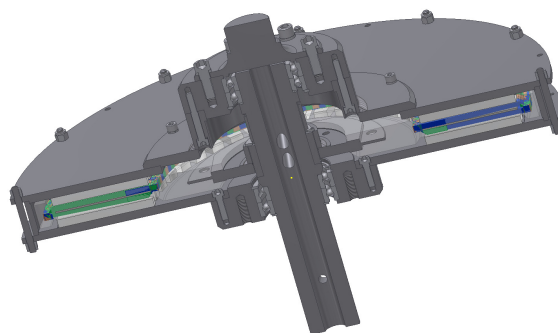


Rys. 3. Model obliczeniowy tarczy wirnika z magnesami trwałymi bezrdzeniowej prądnicy tarczowej o mocy 2 kW

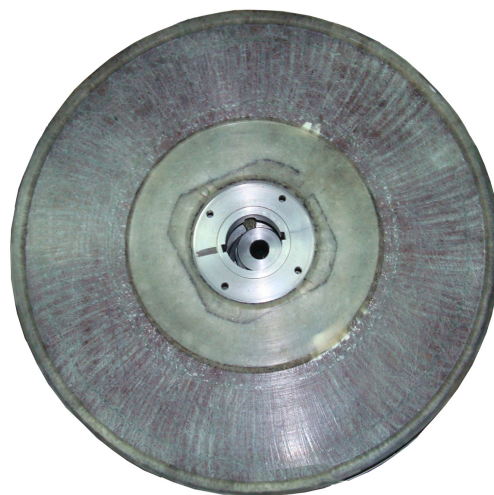
### 3. Model fizyczny i konstrukcja mechaniczna prądnicy

Na rysunku 4 przedstawiono model konstrukcyjny omawianego generatora tarczowego wykonany w programie Inventor. W aspekcie mechanicznym główny problem stanowiło wykonanie bezrdzeniowego uzwojenia stojana (rys 5). Podstawowe trudności związane były z usytuowaniem stojana na wale oraz z wymia-

rami gabarytowymi, a przede wszystkim z zachowaniem odpowiedniej grubości uzwojenia pomiędzy magnesami. Ponadto koniecznym był dobór żywicy o odpowiednich właściwościach mechanicznych i dielektrycznych.



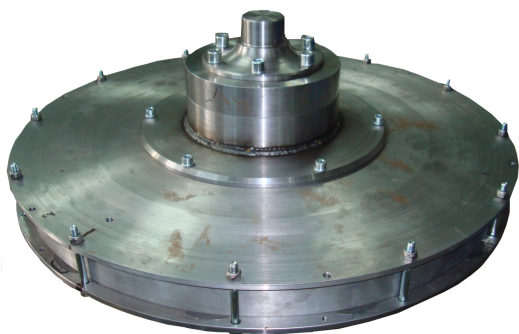
Rys. 4. Model konstrukcyjny generatora tarczowego



Rys. 5. Widok wykonanego bezrdzeniowego uzwojenia

Rysunek 6 przedstawia wykonany model generatora tarczowego o średnicy zewnętrznej równej 655 mm. Na etapie projektu zgodnie z założeniami konstrukcyjnymi model wykonano tak, aby miał on budowę modułową tzn. możliwość dołożenia kolejnej sekcji (tarcza z magnesami - uzwojenie - tarcza z magnesami). Masa całkowita obecnego generatora wynosi 95 kg. Masa ta może być jednak zmniejszona poprzez zmianę materiałów niektórych elementów generatora.

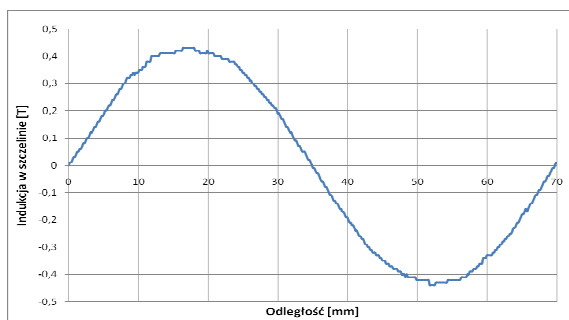
Następna trudność związana była z bezpiecznym montażem generatora, ze względu na występowanie sił wynikających z wzajemnego oddziaływania tarcz z magnesami. W wyniku tego wykonano dodatkowe elementy zapewniające bezpieczne złożenie generatora.



Rys. 6. Model fizyczny generatora tarczowego

#### 4. Obliczenia obwodu elektromagnetycznego

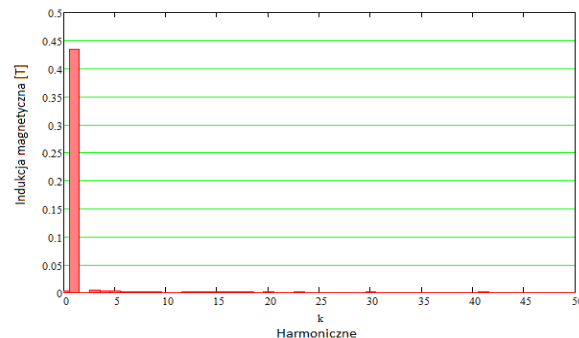
Dla modelu prądnicy przedstawionego w punkcie 2 przeprowadzono obliczenia obwodu elektromagnetycznego. Z uwagi na rozptył strumienia magnetycznego obliczenia maszyn tarczowych powinny być wykonywane na modelu trójwymiarowym. W celu doboru wstępnych gabarytów oraz danych nawojowych maszyny można jednak wykonać wstępne obliczenia analityczne na promieniu średnim, a następnie obliczenia MES 3d. Obliczenia analityczne wykonano przy pomocy algorytmu do obliczeń bezrdzeniowych prądnic tarczowych opracowanego w BOBRME Komel. Zakres obliczeń MES obejmował obliczenia magnetostaticzne oraz obliczenia dla pracy generatorowej maszyny. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 7-16. Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie przedstawiono na rysunku 7. W maszynie bezrdzeniowej ze względu na brak ferromagnetycznego rdzenia stojana można uzyskać praktycznie sinusoidalny rozkład indukcji w szczelinie.



Rys. 7. Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej

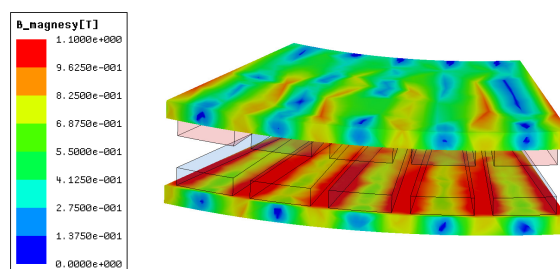
Na rysunku 8 przedstawiono rozkład harmonicznych indukcji w szczelinie. Dominującą w przebiegu jest pierwsza harmoniczna, a obliczony współczynnik THD wyniósł ok. 10%.

Taki rozkład indukcji jest szczególną zaletą bezrdzeniowej prądnicy tarczowej.

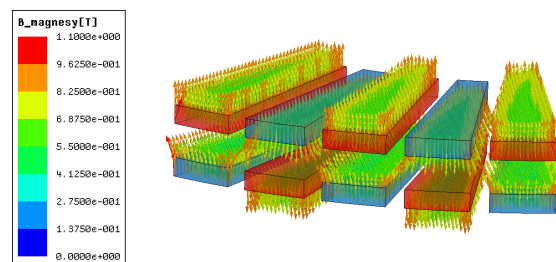


Rys. 8. Wartości poszczególnych harmonicznych indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej

Na rysunkach 9-10 przedstawiono wyniki obliczeń rozkładu indukcji magnetycznej oraz rozkład wektora indukcji w wybranych elementach obwodu elektromagnetycznego prądnicy.

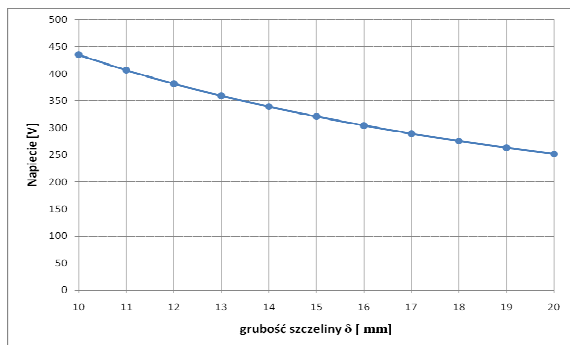


Rys. 9. Rozkład indukcji magnetycznej w tarczach wirnika generatora tarczowego



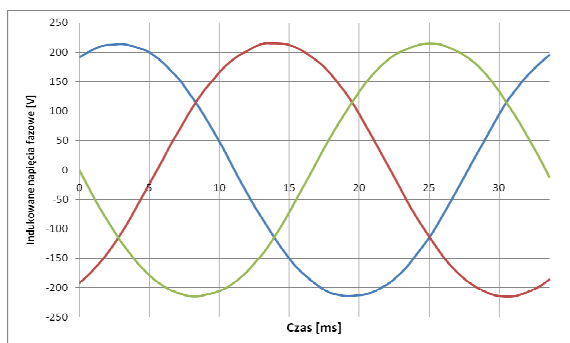
Rys. 10. Rozkład wektorów indukcji magnetycznej magnesów trwałych

Szczelinę powietrzną w tego rodzaju konstrukcjach należy mierzyć od magnesu jednej tarczy do magnesu drugiej tarczy. Jej grubość znacząco wpływa na wartość indukcji w szczelinie a tym samym na wartość indukowanego napięcia. Na rysunku 11 przedstawiono zależność indukowanego napięcia w funkcji grubości szczeliny powietrznej dla dobranej liczby zwojów oraz wymiarów magnesu trwałego prądnicy.



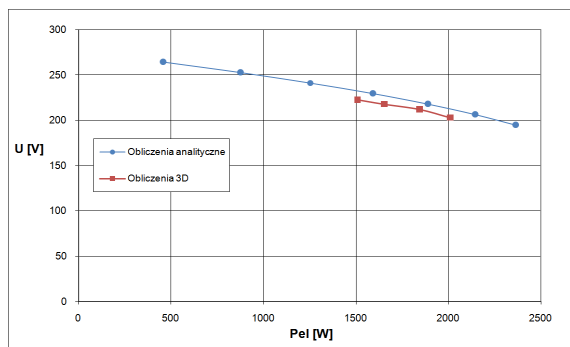
Rys. 11. Zależność indukowanego napięcia w funkcji grubości szczeliny powietrznej

Kolejnym etapem obliczeń były obliczenia dla pracy generatorowej. Na rysunku 12 przedstawiono obliczone przebiegi indukowanych napięć fazowych biegu jałowego dla prędkości obrotowej  $n=90$  obr/min.

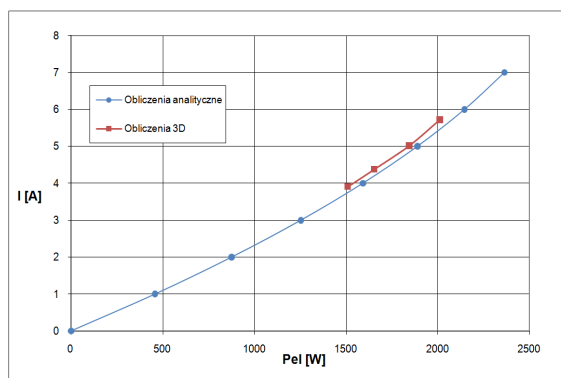


Rys. 12. Przebiegi napięć fazowych biegu jałowego dla prędkości obrotowej 90 obr/min

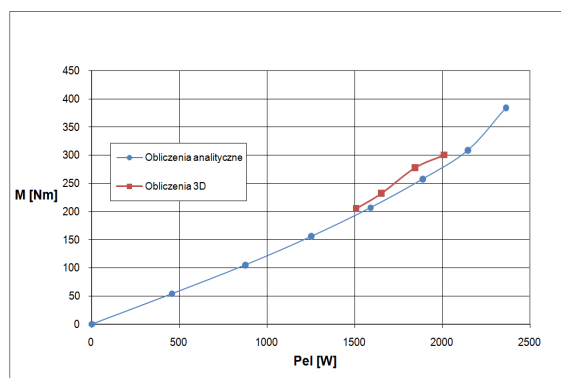
Na rysunkach 13-16 przedstawiono porównanie wyników obliczeń analitycznych z wynikami obliczeń MES 3d. Można stwierdzić, że otrzymane wyniki są zbliżone. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu temperatury uzwojenia stojana równej  $115^{\circ}\text{C}$ . Zmienność napięcia dla założonej temperatury uzwojenia i mocy 2 kW wynosi ok. 21%.



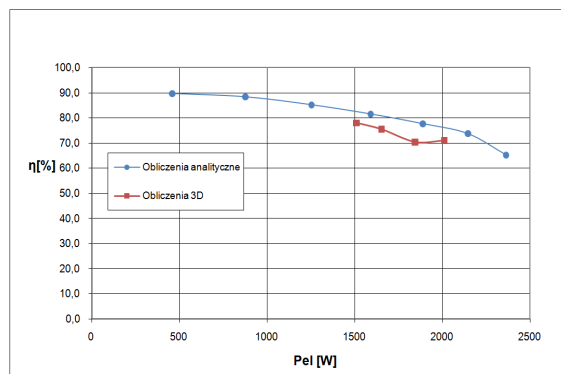
Rys. 13. Zależność napięcia na zaciskach prądnicy w funkcji wydawanej mocy elektrycznej dla prędkości obrotowej 90 obr/min



Rys. 14. Zależność prądu fazowego prądnicy w funkcji wydawanej mocy elektrycznej dla prędkości obrotowej 90 obr/min



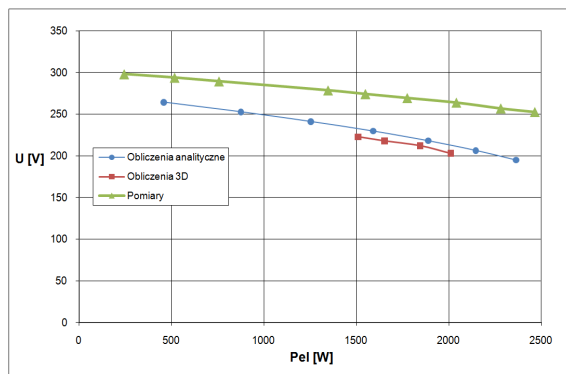
Rys. 15. Zależność momentu na wale prądnicy w funkcji wydawanej mocy elektrycznej dla prędkości obrotowej 90 obr/min



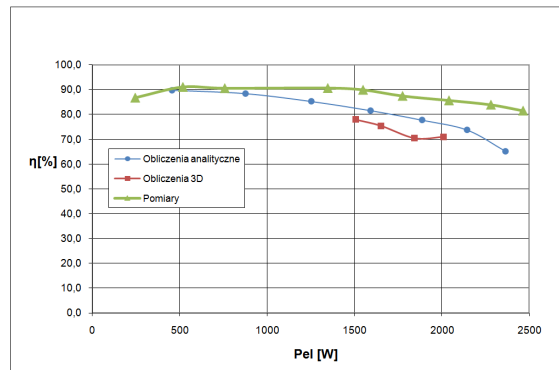
Rys. 16. Sprawność prądnicy w funkcji wydawanej mocy elektrycznej dla prędkości obrotowej 90 obr/min

## 5. Porównanie wyników obliczeń z wynikami badań laboratoryjnych

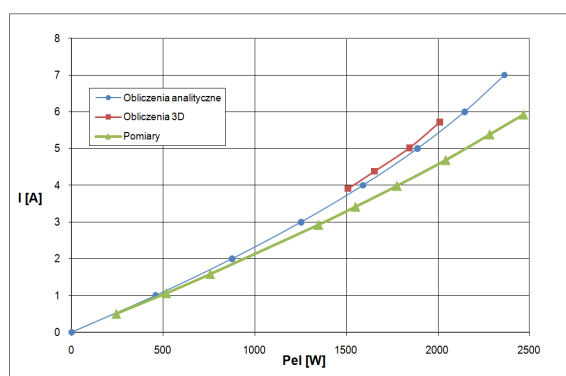
W celu zweryfikowania wyników obliczeń przeprowadzono badania laboratoryjne dla wykonanego modelu generatora tarczowego. Porównanie wyników badań z wynikami obliczeń przedstawiono na rysunkach 17-20.



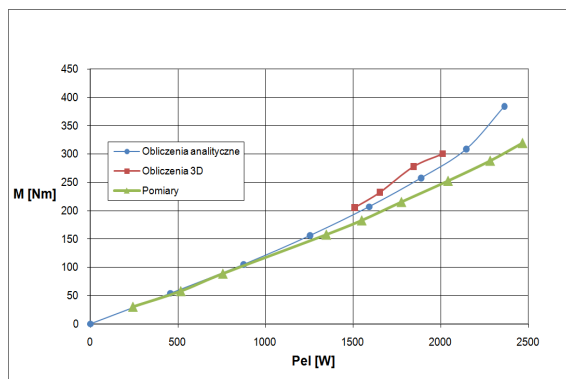
Rys. 17. Zależność napięcia na zaciskach prądnicy w funkcji wydawanej mocy elektrycznej dla prędkości obrotowej 90 obr/min



Rys. 20. Sprawność prądnicy w funkcji wydawanej mocy elektrycznej dla prędkości obrotowej 90 obr/min



Rys. 18. Zależność prądu fazowego prądnicy w funkcji wydawanej mocy elektrycznej dla prędkości obrotowej 90 obr/min



Rys. 19. Zależność momentu na wale prądnicy w funkcji wydawanej mocy elektrycznej dla prędkości obrotowej 90 obr/min

Znaczący wpływ na różnice wyników obliczeń z wynikami badań miała temperatura uzwojenia. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu temperatury uzwojenia  $115^{\circ}\text{C}$ . Po wykonaniu próby nagrzewania dla obciążenia generatora mocą 2kW, temperatura uzwojenia stojana wynosiła  $73^{\circ}\text{C}$ , natomiast maksymalny przyrost temperatury  $64,5^{\circ}\text{C}$ .

## 6. Podsumowanie i wnioski końcowe

W artykule omówiono bezrdzeniową prądnicę tarczową o mocy 2 kW przy prędkości obrotowej wirnika 90 obr/min. Ten rodzaj prądnicy jest dedykowany głównie dla małych elektrowni wiatrowych o pionowej osi obrotu. Ze względu na niską prędkość obrotową generator do pracy w elektrowni wiatrowej nie wymaga współpracy z przekładnią mechaniczną, co przyczynia się do poprawy sprawności całego układu. Podstawowymi zaletami przedstawionej prądnicy są całkowity brak momentu zaczepowego, praktycznie sinusoidalny przebieg indukowanych napięć oraz stosunkowo wysoka sprawność.

Należy mieć na uwadze, że moc generatora jest ściśle powiązana z prędkością obrotową wirnika. Przedstawione w artykule wyniki dotyczą prędkości obrotowej wirnika 90 obr/min. W tabeli 1 podano generowaną moc elektryczną oraz napięcie na zaciskach prądnicy dla różnych prędkości obrotowych wirnika.

Tabela 1. Moc bezrdzeniowego generatora tarczowego w zależności od prędkości obrotowej wirnika

n [obr/min]	f [Hz]	$U_{LL}$ [V]	P [kW]
90	30	250	2
120	40	350	2,8
150	50	445	3,6

Kolejnym aspektem o jakim należy pamiętać jest to, że w przypadku współpracy generatora z turbiną wiatrową, prądnica pracuje jedynie podczas wiejącego wiatru, który dodatkowo poprawia warunki chłodzenia maszyny. Prądnica została wykonana w klasie izolacji F, a wyznaczony z próby nagrzewania maksymalny przy-

rost temperatury wynosił  $64,5^{\circ}\text{C}$ . Można więc założyć, że prądnica dla prędkości obrotowej 90 obr/min z powodzeniem mogłaby być obciążona mocą ok 2.5 kW.

## 7. Literatura

- [1]. Gieras J., Wang R, Kamper M.: *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, 2004.
- [2]. Gieras J., Wing M.,: *Permanent Magnet Motor Technology. Design and applications*. Marcel Dekker 2002.
- [3]. Glinka T., Król E., Wolnik T.: *Model Polowy bezrdzeniowej maszyny tarczowej*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr.86 – 2010.
- [4]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [5]. Kobayashi H., Doi Y, Miyata K., Minowa T: *Design of the axial-flux permanent magnet coreless generator for the multi-megawatts wind turbine*. Magnetic Materials R&D Center, Shin-Etsu Chemical Co.
- [6]. Polak A., Barański M.: *Porównanie turbin wiatrowych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr.74 – 2006.
- [7] [www.greenstream.info.pl/repozytorium/energetyka-wiatrowa/mikro-i-male-elektrownie-wiatrowe-w-gospodarstwie](http://www.greenstream.info.pl/repozytorium/energetyka-wiatrowa/mikro-i-male-elektrownie-wiatrowe-w-gospodarstwie).
- [8]. [www.uwm.edu.pl/kolektory/silownie/pionowe](http://www.uwm.edu.pl/kolektory/silownie/pionowe).

## Autorzy

Mgr inż. Tomasz Wolnik  
E-mail [t.wolnik@komel.katowice.pl](mailto:t.wolnik@komel.katowice.pl)  
Mgr inż. Andrzej Białas  
E-mail: [a.bialas@komel.katowice.pl](mailto:a.bialas@komel.katowice.pl)  
Branżowy Ośrodek Badawczo Rozwojowy  
Maszyn Elektrycznych „KOMEL”  
40-203 Katowice,  
Al. Roździeńskiego 188.