

Piotr SZYMCZAK<sup>1</sup>

Victor GREBENNIKOV<sup>2</sup>

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny (1)  
Instytut Elektrodynamiki Narodowej Akademii Nauk Ukrainy (2)

## Generatory z magnesami trwałymi do małych elektrowni wiatrowych i mikroelektrowni wodnych

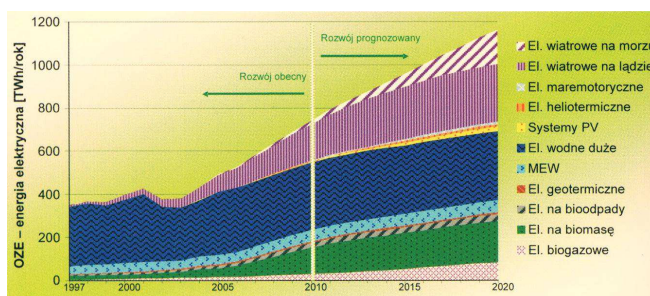
### Abstract.

This paper has analysed different types of generators with permanent magnets and of a low power, dedicated to use in the wind powerplants with vertical axis of rotation and in the water-powermicroplants. Generators' stator have been adopted from asynchronous engines and on the other hand the rotors were constructed in the form of eight-pole magnetic system of a high-energy permanent magnets. The results of the study researches with utilization of the ELCUT 5.6 and COMSOL programmes, and they have been compared with the results of experimental studies connected with the constructed prototype, and their result shave brought the favourable accuracy above all expectations. The conclusions have been mentioned at the end of this paper.

**Keywords:** generator, permanent magnets, air turbine with vertical axis of rotation, water-powermicroplants, field concentrators

### Aktualność tematyki

Jednym z perspektywicznych kierunków rozwoju odnawialnej energetyki jest rozwój energetyki wiatrowej na lądzie i morzu. Prognozy przewidują ponad 2-krotny jej wzrost – rys.1 [1]. Obecnie ważnym kierunkiem działań jest budowa małych elektrowni wiatrowych i mikroelektrowni wodnych przeznaczonych do zasilania gospodarstw oraz domów letniskowych w energię elektryczną. Dla małego podmiejskiego domu wystarcza około 150÷200 W do zaspokojenia podstawowych potrzeb energetycznych (komunikacja, radio, oświetlenie i inne odbiorniki o niskim poborze mocy) i od 1 do 5 kW do zasilania większości urządzeń domowych, włączając w to pralkę, lodówkę, komputery, itp.

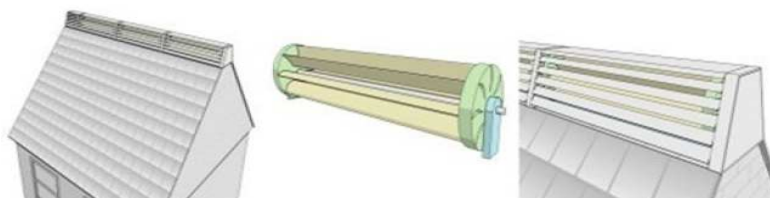


Rys. 1 Stan obecny i prognoza rozwoju energetyki odnawialnej [1]

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

Wykorzystanie energii niedużych cieków wodnych do wytworzenia energii elektrycznej i uzyskania mocy do 5 kW jest również jednym z najbardziej perspektywicznych kierunków rozwijania odnawialnych źródeł energii. Nowoczesne mikroelektrownie wodne do użytku cywilnego są produkowane na świecie, m. in. na Ukrainie, w szczególności w Charkowie w firmie "Turboatom" [2, 3,13].

Niedużej mocy małe elektrownie wiatrowe z pionową osią obrotową (MEzPOO) posiadają szereg zalet: niezależność funkcjonowania od kierunku przepływu wiatru; możliwość umocowania turbiny w jednym lub dwóch miejscach; umieszczenia generatora w obudowie turbiny, co w rezultacie prowadzi do obniżenia wymagań w zakresie wytrzymałości i sztywności konstrukcji. MEzPOO z turbinami wiatrowymi typu Darrieus'a są bardzo kompaktowe, mało hałaśliwe i mogą być rozmieszczone również na dachach budynków. Inne interesujące rozwiązanie zaprezentowano na rys.2 .[16]



Rys. 2 Turbina wiatrowa "RidgeBlade" montowana na szczycie budynku mieszkalnego, jako produkt firmy The Power Collectiva [16]

Cel danej pracy – przeprowadzić studialne badania z wykorzystaniem oprogramowania ELCUT i COMSOL w celu zaprojektowania niezawodnego, trwałego, a przy tym stosunkowo niedrogiego generatora z magnesami trwałymi (MT) do małej elektrowni wiatrowej o pionowej osi obrotu lub mikroelektrowni wodnej.

### **Wybór konstrukcji**

Wybór, zakupu lub budowy, danej elektrowni wiatrowej powinien być poprzedzony kompleksową analizą całego systemu energetycznego, a zwłaszcza warunków wiatrowych, turbiny i generatora. Kryteriami oceny mogą być koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, a także bardziej szczegółowe takie jak: trwałość, niezawodność, sprawność oraz niski poziom szumu i wibracji. [7,8] W pracy analizowano możliwości rozwoju energetyki wiatrowej dla warunków Morza Czarnego i Bałtyckiego oraz Zalewu Szczecińskiego. Z analizowanych danych wynika, że zarówno na Ukrainie jak i w Polsce występują różne warunki do pozyskania energii z wiatru lub cieków wodnych. Badania porównawcze różnorodnych rozwiązań elektrowni wiatrowych z przekładnią i bez niej pozwoliły dokonać wyboru konstrukcji elektrowni wiatrowej: turbina o pionowej osi, bez przekładni napędzającej oraz generator synchroniczny z wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi.

Tab. 1. Zestawienie parametrów i wskaźników elektrowni wiatrowej [7]

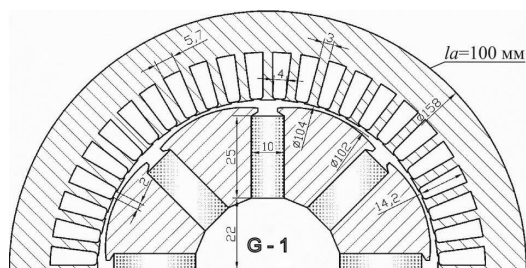
Kryterium	Elektrownia z przekładnią	Elektrownia bez przekładni
1 Niezawodność	A	3-A
2 Trwałość maszyny od 5 do 15 lat	B	(3÷5)-B
3 Koszty eksploatacyjne	C	0,6-C
4 Szum i wibracja	D	0.1-D
5 Sprawność	M	(1,3÷2) M

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

Producenci oferują elektrownie wiatrowe z MEzPOO o różnych przedziałach mocy od 0,5 do 32 kW [14,15]. Perspektywne opracowanie turbiny wiatrowej o pionowej osi z regulacją kąta natarcia łopaty wykonano w Instytucie Hydromechaniki NAN Ukrainy, co pokazano na rys.3.



Rys. 3 Turbina wiatrowa z pionową osią obrotu



Rys. 4 Przekrój modelu bazowego generatora typu G-1

Obecnie obserwuje się coraz powszechniejszą tendencję stosowania do generatorów w elektrowniach wiatrowych wysokoenergetycznych MT, [4÷9] na bazie pierwiastków z ziem rzadkich – NdFeB, które posiadają temperatury pracy do 150°C i indukcji magnetycznej  $B_r=1,2\div1,45$  T [12].

Na podstawie badań studialnych wybrano dla wirnika rozwiązanie z tzw. komutatorowym układem magnesów i koncentratorami pola (rys.4) Ważną osobliwością takiej konstrukcji jest możliwość otrzymania indukcji w szczelinie, czasami nawet dwu krotnie przewyższającej indukcję magnetyczną w magnesie, co w znaczący sposób pozwala powiększyć moc wyjściową generatora. Rozwiązania te posiadają również pewne niedostatki, m. in. złożoność konstrukcji, występują pulsacje pola magnetycznego i moment zaczepowy, które z kolei kompensowane są innymi zaletami: generatory mają większe krotności prądów zwarcia, a także znacząco zmniejsza się masa jednostkowa generatorów.

### Badania studialne i polowe

W ramach zadań badawczych oprócz głównego celu, analizowano również możliwość zaprojektowania elektrowni wiatrowej o małej mocy dla systemów autonomicznych przeznaczonymi do zasilania stałych znaków nawigacyjnych na torze wodnym Szczecin-Świnoujście. Na podstawie danych Biura Hydrograficznego RP Rejon Szczecin wynika, że minimalne zapotrzebowanie mocy do ładowania akumulatorów na znakach nawigacyjnych powinno wynosić w przedziale:  $P=50\div100$  W,  $I_f=12\div20$  V i  $U_f=2,5\div12$  A. [4]

Na rys.5 pokazano trzy rozwiązania analizowanych generatorów z MT, przy czym ich długość (stojana i wirnika) we wszystkich modelach jest równa  $l_a=100$  mm. W modelu G-1 wykorzystany jest stojan od silnika indukcyjnego produkcji ukraińskiej typu AIR90L8 o średnicy zewnętrznej stojana  $D_c=158$  mm, liczbie żłobków  $Z_1=48$  i wysokości żłobka  $h_z=14,2$  mm. Wirniki we wszystkich rozwiązaniach są takie same, posiadają liczbę par

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

biegunów:  $p=4$ . Wielkość technologiczna szczeliny powietrznej między stojanem, wykonanym z blachowanej stali typu St21100 a wirnikiem wynosi  $\delta=1$  mm.

W literaturze omawia się szereg metod ograniczenia momentów zaczepowych [5], do najczęstszych należą m. in.: skosowanie żłobków stojana bądź magnesów trwałych wirnika; odpowiedni dobór kąta łuku magnesów; wzajemne przesunięcie biegunów magnetycznych na obwodzie wirnika. W celu zmniejszenia pulsacji momentu elektromagnetycznego zastosowano zaokrąglone koncentratory pola magnetycznego na wirniku o promieniu  $r=33$  mm. Na rys. 5 pokazano trzy analizowane modele: model G-1; model G-2, w którym stojan posiada zewnętrzną średnicę równą  $D_c=194$  mm i zawiera połowę mniej żłobków  $Z_2=24$ , wysokość żłobków  $h_z=32,2$  mm i model G-3 stojan, w którym stojan ma największe rozmiary:  $D_c=220$  mm,  $Z_3=24$ ,  $h_z=45$  mm.

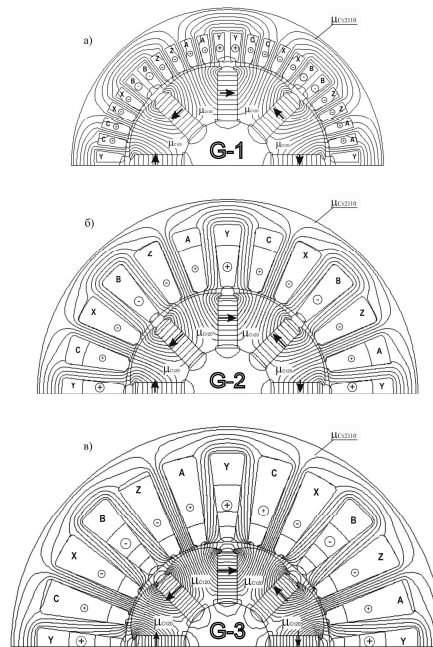
Modelowanie przeprowadzono przy założeniu następujących danych:

- magnetowód stojana - stal ST2211, uwzględniono nieliniowość krzywej magnesowania stali;
- koncentratory ferromagnetyczne, wykonano ze stali konstrukcyjnej ST20 i uwzględniono nieliniowość krzywej magnesowania;
- Parametry MT NdFeB:  $H_c=1000$  kA/m,  $B_r=1,32$  T,  $\mu_{MT}=1,03$ , kierunek namagnesowania MT pokazano strzałkami;
- Wał wirnika wykonany jest z niemagnetycznego materiału o przenikalności magnetycznej -  $\mu_0 = 1$ .
- Założono gęstość prądu  $J_s = 5,0$  A/mm<sup>2</sup>, współczynnik zapęnlęcia żłobka  $k_{QCu} = 0,5$ .

Rezultaty badań symulacyjnych [11] wybranych rozkładów pól magnetycznych w przekroju poprzecznym badanych modeli pokazano na rys. 5.

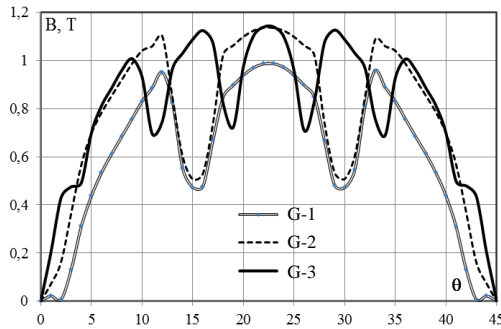
Analizując ww. wyniki modelowania rozkładu pola magnetycznego dla wszystkich modeli generatorów można sformułować następujące wnioski: jarzmo stojana i zęby dla ww. analizowanych modeli nie nasycają się oraz nie obserwuje się istotnych strumieni rozpraszania żłobkowego. Współczynnik koncentracji pola magnetycznego bez uwzględnienia strumienia rozproszenia dla badanych wymiarów geometrycznych wynosi  $k_k=1,66$ .

Zgodnie z twierdzeniem Josepha M. Pestariniego maszynę reprezentuje strukturalnie jej wycinek odpowiadający dwu kolejnym podziałkom biegunowym. Właściwości geometryczne konstrukcyjne i obwodowe uzwojeń łączonych szeregowo lub równolegle są p-krotnym powtórzeniem właściwości takiego elementu dwubiegunowego. Dlatego do dalszej analizy wystarczy sporządzić charakterystyki indukcji i momentu elektromagnetycznego w granicach jednej podziałki biegunowej -  $\tau$ .



Rys. 5 Linie rozkładu pola magnetycznego dla trzech modeli analizowanych generatorów:  
a) model G-1 b) model G-2 c) model G-3

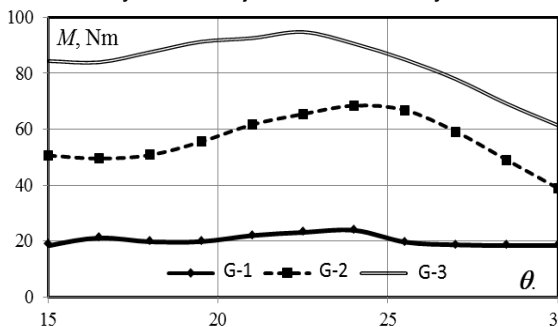
**VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012**



Rys. 6 Rozkład składowej normalnej indukcji magnetycznej  $B_{\delta n}$  dla jednej podziałki biegunowej dla trzech modeli G-1, G-2, G-3.

Na rys. 6 pokazano wykres rozkładu składowej normalnej indukcji magnetycznej  $B_{\delta n}$  pośrodku szczeliny powietrznej ( $R = 51,5 \text{ mm}$ ). Charakterystyki indukcji wyznaczone są dla momentu czasu, kiedy prąd w fazie A jest maksymalny i dodatni, a w fazach B i C prąd dwukrotnie mniejszy i ujemny. Badania symulacyjne przeprowadzono dla zadanych wartości gęstości prądów: w fazie A –  $J_{Cu} = 2,5 \text{ A/mm}^2$ , a w fazach B i C odpowiednio –  $J_{Cu} = 1,25 \text{ A/mm}^2$  (co wynika z  $k_{QCu} = 0,5$ ).

Analizując wykresy składowej normalnej indukcji magnetycznej, należy zauważyć, że występują pulsacje żłobkowe. Maksymalna indukcja w szczelinie powietrznej dla modelu G-1 wynosi  $B_{mG-1} = 1,14 \text{ T}$ , dla modelu G-2 -  $B_{mG-2} = 1,14 \text{ T}$ , a dla modelu G-3 -  $B_{mG-3} = 0,97 \text{ T}$ . Na charakterystyce G-1 obserwuje się pięć punktów maksymalnych, a dla modeli G-2 i G-3 odpowiednio trzy punkty maksymalne, co związane jest z różnymi wartościami parametru  $q$  (liczbą żłobków na biegun i fazę). Zależność elektromagnetycznego momentu hamującego, działającego przy obciążeniu na wirnik w zależności od kąta  $\theta$ , co pokazano na rys.7. Należy zauważyć fakt, że w badanym zakresie średnie momenty elektromagnetyczne wyniosły odpowiednio dla poszczególnych modeli:  $M_{srG-1} = 21 \text{ Nm}$ ,  $M_{srG-2} = 56 \text{ Nm}$ ,  $M_{srG-3} = 84 \text{ Nm}$ . Masa magnesów dla badanych modeli jest taka sama i wynosi  $m_{MT} = 1,5 \text{ kg}$ .



Rys.7 Zależność momentu elektromagnetycznego dla różnych wartości kąta  $\theta$  dla modeli: G-1, G-2, G-3.

Porównując charakterystyki G-1 i G-2, należy zauważyć, że 2,2-krotne powiększenie głębokości żłobka w modelu G-2 pozwoliło zwiększyć wartość średniego momentu aż 2,7 razy. Ten rezultat pokazuje jak przy jednakowych rozmiarach wirnika, poprzez zmianę konfiguracji systemu magnetycznego stojana można zwiększyć moment elektromagnetyczny.

Jeżeli natomiast porównamy charakterystyki momentów dla modeli G-2 i G-3, to również możemy stwierdzić zwiększenie

średniego momentu elektromagnetycznego 1,5 razy przy zwiększeniu 1,38-krotnym głębokości żłobka.

Wpływ na te rezultaty ma przede wszystkim zwiększony parametr  $A$  (okład prądowy), ponieważ magnesy trwałe zapewniają pole magnetyczne na stosunkowo dużym poziomie około  $B_{\delta} = 1 \text{ T}$ .

W tab. 2 zestawiono główne dane badanych generatorów. Przypomnijmy, że wirniki oraz masa magnesów dla wszystkich modeli jest taka sama. Masa części aktywnej nie

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

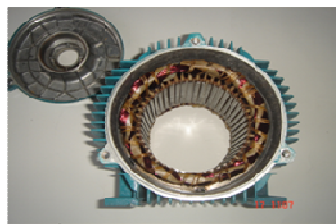
uwzględnia mas wału, łożysk i obudowy. Obliczeniową wartość mocy przytoczono dla przypadku zastosowania badanych generatorów w elektrowniach wiatrowych z pionową osią obrotu, przy prędkości 120 obr/min oraz dla mikro elektrowniach wodnych przy prędkościach 1000 obr /min.

Tab. 2 Główne dane projektowanych generatorów

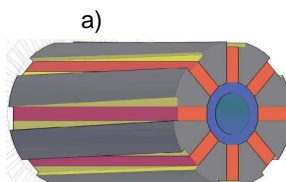
Typ generatora	Masy MT, [kg]	Masy części aktywnej, [kg]	moment elektromagnetyczny średni, [Nm]	Moc elektrowni wiatrowej przy n=120 obr/min, [kW]	Moc mikroelektrowni wodnej przy n=1000 obr/min, [kW]
G-1	1,5	17,7	21	0,25	2,1
G-2	1,5	24,4	56	0,67	5,6
G-3	1,5	32,9	83	1,0	8,3

### Badanie eksperymentalne

Celem badań doświadczalnych była weryfikacja obliczeń teoretycznych. W Instytucie elektrodynamiki NAN Ukrainy zbudowano prototyp generatora według modelu G-1 (rys. 8 i rys. 9). Za podstawę był przyjęty stojan silnika indukcyjnego (uzwojenia stojana nie były przewijane).



Rys. 8 Widok i stojan silnika asynchronicznego produkcji ukraińskiej typu AIR90L8



Rys.9 Wirnik zbudowanego prototypu G-1 a) schemat poglądowy b) koncentraty z koszem

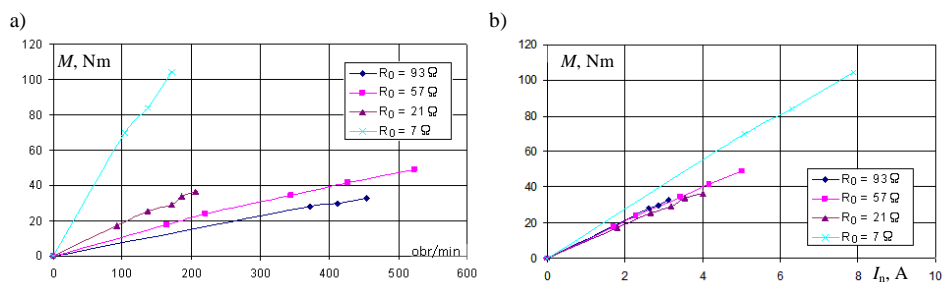
Uzwojenia stojana badanego generatora połączone są w "gwiazdę" i podłączone do trójfazowego dwukierunkowego prostownika mostkowego. Zależności między wielkościami generatora, a wyjściowymi prostownika są następujące:  $U_n = 2,34 U_{fg}$ ,  $I_n = 1,22 I_{fg}$ . Obciążenie miało charakter czynny i było realizowane przy pomocy regulowanej rezystancji.

Na rys. 10 a) przedstawiono zależności momentu elektromagnetycznego na wale generatora od prędkości obrotowej wirnika dla różnych wartości obciążenia. Analizując pierwszy wykres, należy podkreślić, że moment na wale przy niskich wartościach oporności ( $R_o = 7\Omega$ ) jest bardzo znaczący i osiąga wartość 104,4 Nm.

Natomiast na rys. 10 b) przytoczono zależność momentu od prądu obciążenia. Należy odnotować fakt, że przy znamionowym prądzie silnika ( $I_n = 2,2A$ , połączenie w

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

"gwiazdę"), moment hamujący na wale G-1 mieści się w granicach  $M_h = 19-25$  Nm, a wartość obliczeniowa momentu dla ww. prądu wyniosła:  $M_{obl} = 21$  Nm.



Rys. 10. Zależności momentu elektromagnetycznego prototypu generatora G-1 dla różnych wartości obciążenia od prędkości obrotowej (a) i prądu (b).

Na podstawie badań eksperymentalnych można sformułować ogólny wniosek: moment elektromagnetyczny na wale generatora praktycznie liniowo zależy od prądu obciążenia dla wszystkich wartości obciążenia.

### Wnioski

1. Wykorzystując programy profesjonalne COMSOL i ELCUT oraz strukturę obwodu magnetycznego z układem komutatorowym magnesów dokonano obliczeń pola magnetycznego w szczeliny generatora i określono ich wartości średnie oraz dokonano oceny pulsacji pola magnetycznego, uzyskane rezultaty były wykorzystane przy projektowaniu wirnika generatora i doborze magnesów trwałych.
2. Przeprowadzono badania eksperymentalne prototypu generatora G-1 i stwierdzono, że przy prędkości 120 obr./min generator dla elektrowni wiatrowej pozwala uzyskać moc 0,25 kW, a dla mikroelektrowni wodnej przy prędkości obrotowej 1000 obr./min wynosi 2,1 kW. Zaprojektowany generator G-2 przy zwiększonej średnicy stojana ma moc wyjściową odpowiednio: 0,67 kW i 5,6 kW, natomiast generator G-3, pozwala uzyskać moce odpowiednio - 1,0 kW i 8,3 kW.
3. Wartości obliczeniowe momentu elektromagnetycznego porównane z prototypem zbudowanego generatora dla modelu G-1 wystarczająco dokładnie pokrywają się z wynikami badań eksperymentalnych. Analizując te wyniki, należy podkreślić, że zbudowany generator charakteryzuje się dużą przeciążalnością, co znacząco rozszerza zakres jego zastosowania.
4. Przy parametrach prędkości wiatru dla Zalewu Szczecińskiego i Morza Bałtyckiego wynoszącej średnio  $3 \div 4$  m/s można zapewnić pełne zapotrzebowanie mocy dla stałych znaków nawigacyjnych, gdzie do ładowania akumulatorów niezbędne jest źródło o parametrach:  $U=12 \div 20$  V i  $I=2,5 \div 12$  A.

### P.S.

Praca została wykonana w ramach współpracy Instytutu Elektrodynamiki Narodowej Akademii Nauk Ukrainy z Wydziałem Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

### Literatura

## **VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012**

1. Pasek J.; Technologie rozproszonych źródeł energii; Zeszyt miesięcznika INPE nr. 38; Bełchatów 2011
2. Яковлев А. И. Концепция создания чистого усадебного дома, обеспеченного возобновляемыми источниками энергии, Гидроэнергетика Украины, 2008, Nr.4, s. 42-47.
3. Гринченко В. Т., Каян В. П., Кочин В. А. Исследование и оптимизация рабочих характеристик ветроротора с вертикальной осью вращения с механизмом управления лопастями, Доповіді НАН України, 2008, Nr. 12, s. 62-68.
4. J.F. Gieras; Advancements in Electric Machines; Springer; 2008
5. J.F. Gieras; Permanent magnet motor technology; CRC Press; 2010
6. J. Pyrhönen, T. Jokinen, V Hrabovcová; Design of rotating electrical machines; John Wiley & Sons, Ltd; 2007
7. P. Szymczak, S. Turowski, K. Gorczyca, W. Jasieniecki; Siłownie wiatrowe małej mocy do zasilania stałych znaków nawigacyjnych; Wyd. uczelniane Politechniki Szczecińskiej; Szczecin 1994, s. 289-294
8. M.Neneka, M. Czerepaniak, J. Czuczman, P. Szymczak; Generatory elektryczne dla bezprzekładniowych siłowni wiatrowych pracujących w reżimie autonomicznym; Wyd. uczelniane Politechniki Szczecińskiej; Szczecin 1994 s.245-250
9. P. Szymczak; Innovative designs of permanent magnet synchronous machines; Elektrichestvo n.9; 2009; s. 37-44
10. Bernatt J.; Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi; BOBRME „KOMEL”; Katowice 2010
11. Гребеников В. В., Приймак М. В. Моделирование магнитных полей в электромеханических преобразователях энергии с постоянными магнитами. // Вісник кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського, 2009, Nr. 3 (56), Ч 2., s. 70-73.
12. <http://www.vacuumschmelze.com>
13. <http://www.turboatom.com.ua>
14. <http://otrada.uaprom.net/>
15. <http://www.dpverano.com.ua/>
16. <http://www.ridgeblade.com>

**Autorzy:** dr inż. Piotr Szymczak; Wydział Elektryczny Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail: [piotr.szymczak@zut.edu.pl](mailto:piotr.szymczak@zut.edu.pl)  
dr inż. Victor Grebennikov Instytut Elektrodynamiki Narodowej Akademii Nauk Ukrainy, email: [elm11@yandex.ua](mailto:elm11@yandex.ua)