

WOLNOOBROTOWY GENERATOR Z MAGNESAMI TRWAŁYMI DO ELEKTROWNI WIATROWEJ Z TURBINĄ O PIONOWEJ OSI OBROTU

Grzegorz KOSTRO¹, Filip KUTT², Michał MICHNA³, Mieczysław RONKOWSKI⁴

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki,

1. tel.: 58 347-11-57 e-mail: grzegorz.kostro@pg.gda.pl

2. tel.: 58 347-19-39 e-mail: filip.kutt@pg.gda.pl

3. tel.: 58 347-29-79 e-mail: michal.michna@pg.gda.pl

4. tel.: 58 347-20-87 e-mail: mieczyslaw.ronkowski@pg.gda.pl

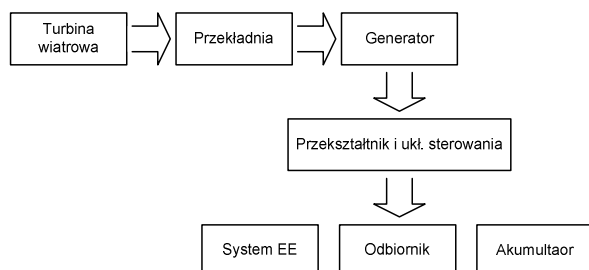
Streszczenie: W artykule przedstawiono założenia projektowe, wybrane wyniki etapu projektowania i badania prototypu wolnoobrotowego generatora z magnesami trwałymi współpracującego z elektrownią wiatrową z innowacyjną turbiną o pionowej osi obrotu. Projekt został wykonany na zlecenie firmy ALU ECO Sp. z o.o. z Gdańska w ramach projektu badawczo-rozwojowego *Pionowa Turbina Wiatrowa*, współfinansowanego przez Polską Agencję Rozwoju Przedsiębiorczości ze środków programu Wsparcie w ramach dużego bonu. Zaprojektowano, wykonano i zbadano prototyp generatora prądu przemiennego o mocy 15 kVA i napięciu znamionowym 400 V przy prędkości 95 obr/min. Generator może znaleźć zastosowanie w energetyce wiatrowej małej mocy, w tym na jednostkach pływających (statkach, jachtach) oraz w stacjonarnych instalacjach prosumenckich.

Słowa kluczowe: mała elektrownia wiatrowa, generator, magnesy trwałe, projektowanie.

1. WSTĘP

Mała elektrownia wiatrowa (MEW) jest jednym z popularniejszych rozwiązań stosowanych jako odnawialne źródła energii. Elektrownia wiatrowa o mocy od kilku do kilkudziesięciu kVA jest w stanie zaspokoić potrzeby gospodarstwa domowego [1]. MEW mogą być również z powodzeniem stosowane jako ekologiczne źródła energii na jednostkach pływających (jachtach, statkach).

Uproszczony schemat przetwarzania energii kinetycznej wiatru w energię elektryczną stosowany w MEW przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat przetwarzania energii w MEW

Głównymi elementami MEW są:

- turbina wiatrowa o poziomej lub pionowej osi obrotu,
- przekładnia mechaniczna - zastosowanie przekładni umożliwia dostosowanie prędkości obrotowej turbiny wiatrowej do prędkości obrotowej generatora,
- generator elektryczny prądu przemiennego lub rzadziej prądu stałego,
- przekształtnik i układ sterowania - w zależności od potrzeb i sposobu wykorzystania elektrowni,
- układy akumulacji energii, np. akumulatory.

W rozważanym projekcie zastosowano innowacyjną konstrukcję turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu [1]. Do głównych zalet tego typu turbin można zaliczyć:

- możliwość pracy przy różnych kierunkach wiatru,
- odporność na podmuchy i silny wiatr,
- cichą pracę,
- możliwość łatwego montażu w tym na istniejących budynkach,
- prosta, lekka i tania konstrukcja.

Turbiny o pionowej osi obrotu charakteryzują się stosunkowo małą prędkością obrotową i mniejszą sprawnością w porównaniu z turbinami o poziomej osi obrotu. Zwiększenie całkowitej sprawności układu przetwarzania energii można uzyskać przez wyeliminowanie przekładni mechanicznej. Bezpośrednie sprzęgnięcie wału turbiny z generatorem wymaga zastosowania wolnoobrotowego generatora elektrycznego. W ofercie największych producentów maszyn elektrycznych brak jest wolnoobrotowych generatorów o mocach odpowiednich do zastosowania w MEW. W amatorskich rozwiązaniach stosowane są maszyny elektryczne producentów o nieznanym renomie i wątpliwej jakości lub maszyny elektryczne wykonane własnoręcznie. Bardzo często są to rozwiązania nieoptymalne i obciążone błędami konstrukcyjnymi.

W firmach zajmujących się budową MEW najczęściej brakuje działów badawczo-rozwojowych, jak również środków finansowych na zlecenie wykonania projektu i stosownych badań. Pierwszy problem może zostać rozwiązany poprzez nawiązanie współpracy z uczelniami technicznymi i wykorzystanie infrastruktury badawczej uczelni. Dla uczelni stwarza to możliwości komercjalizacji

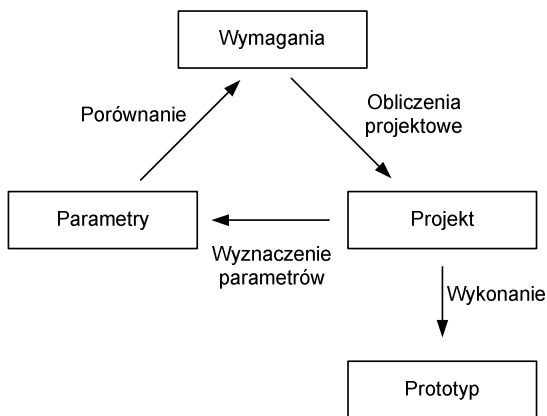
badania naukowych. Problem braku środków finansowych można rozwiązać uzyskując odpowiednie granty badawcze, np. finansowanie z PARP.

Celem projektu badawczo-rozwojowego *Pionowa Turbina Wiatrowa* było opracowanie dokumentacji technicznej i technologicznej do wykonania prototypu wolnoobrotowego generatora z magnesami trwałymi (GMT). W niniejszym artykule przedstawiono założenia projektowe, wybrane wyniki etapu projektowania i badań eksperymentalnych prototypu GMT.

2. PROJEKT PROTOTYPU GENERATORA

2.1. Procedura projektowania maszyn elektrycznych

Proces projektowania maszyn elektrycznych jest celowym i uporządkowanym działaniem zmierzającym do przygotowania zbioru informacji (cyfrowych) niezbędnych do budowy urządzenia [2, 3]. Proces ten obejmuje analizę wymagań, obliczenia projektowe, wyznaczenie kluczowych parametrów, optymalizację, po przygotowanie odpowiedniej dokumentacji technicznej i technologicznej oraz wykonanie prototypu (rys. 2).



Rys. 2. Czynności i etapy procesu projektowania maszyn elektrycznych

Decyzje w procesie projektowania podejmuje się w oparciu o wcześniejsze doświadczenia, wiedzę o dostępnych technologiach oraz właściwościach materiałów użytych do budowy maszyny elektrycznej. Do istotnych etapów projektowania maszyn elektrycznych można zaliczyć:

- ustalenie wymagań i parametrów eksploatacyjnych,
- wybór typu maszyny, topologii wirnika i sposobu zasilania,
- wybór materiałów magnetycznych, elektrycznych i konstrukcyjnych,
- obliczenia wymiarów głównych obwodu magnetycznego z uwzględnieniem punktu pracy magnesu trwałego,
- projekt uzwojenia twornika,
- obliczenia cieplne,
- analiza numeryczna rozkładu pola magnetycznego,
- przygotowanie dokumentacji.

Poszczególne etapy procesu projektowania mogą być wspomagane przez zastosowanie odpowiedniego oprogramowania inżynierskiego CAD (ang. computer aided

design) [2]. Decyzje podjęte we wstępnych etapach projektowania mają istotny wpływ na końcowy koszt produktu oraz na koszty jego użytkowania. Wspomaganie procesu projektowania odpowiednim oprogramowaniem ułatwia weryfikację założeń projektowych we wczesnym etapie prac, wprowadzenie modyfikacji i znacznie przyspiesza wykonanie prac projektowych.

2.2. Założenia projektowe

Główne założenia projektowe dotyczące generatora wynikają z faktu bezpośredniego sprzęgnięcia z turbiną wiatrową. Przyjęto, że GMT będzie miał budowę cylindryczną, a trójfazowe uzwojenie twornika umieszczone zostanie w żłobkach ferromagnetycznego rdzenia stojana. Wzbudzenie GMT będzie stanowić wirnik z magnesami neodymowymi klejonymi do powierzchni wirnika. Generator będzie chłodzony w sposób naturalny, oddając ciepło z powierzchni rdzenia stojana, a następnie z powierzchni obudowy, ruch powietrza wewnątrz maszyny wymuszony będzie łopatkami umieszczonymi na wirniku.

Podstawowe parametry projektowanej maszyny są następujące: moc znamionowa $S_n = 15$ kVA, napięcie znamionowe $U_n = 400$ V, częstotliwość znamionowa $f_n = 50$ Hz, znamionowa prędkość obrotowa $n_n = 95$ obr/min.

2.3. Obliczenia projektowe

Jako podstawę obliczeń projektowych maszyn elektrycznych przyjęto równanie konstrukcyjne [4, 5]. Równanie konstrukcyjne opisuje zależność pomiędzy mocą wewnętrzną maszyny (S_i) a jej wymiarami, cechami konstrukcyjnymi, parametrami wyzyskania materiałów oraz prędkością obrotową.

$$S_i = \frac{\pi}{2} K_I K_P K_E \frac{f_s}{p} (A_s B_m) (D_s^2 l_s) \quad (1)$$

gdzie: f_s – częstotliwość napięcia uzwojenia stojana, p – liczba par biegunów; wymiary główne maszyny to D_s – średnica wewnętrzna stojana, l_s – długość pakietu stojana, cechy konstrukcyjne maszyny opisane są za pomocą współczynników: K_I – współczynnik kształtu prądu, K_P – współczynnik kształtu mocy, K_E – współczynnik kształtu napięcia; parametry wyzyskania maszyny to A_s – gęstość liniowa prądu, B_m – wartość maksymalna indukcji magnetycznej.

Związek pomiędzy prędkością kątową ω , prędkością obrotową n , częstotliwością f_s i liczbą par biegunów p w maszynach prądu przemiennego wyraża zależność:

$$\frac{f_s}{p} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{n}{60} \quad (2)$$

Wartości współczynników konstrukcyjnych zależą od typu maszyny elektrycznej, sposobu zasilania (AC, DC), kształtu rozkładu indukcji w szczelinie roboczej [3, 4]. Wartości parametrów wyzyskania maszyny zależą między innymi od rodzaju materiałów czynnych zastosowanych do budowy maszyny oraz od sposobu jej chłodzenia [2-5].

Istotnym wnioskiem wynikającym z zależności (1) jest fakt, że moc maszyny elektrycznej jest wprost proporcjonalna do jej prędkości obrotowej oraz do objętości. Zastosowanie generatora wolnoobrotowego wymaga zastosowania maszyny elektrycznej o dużej objętości, a więc również maszyny stosunkowo dużej masy. Duża liczba par biegunów wymaga, aby średnica stojana była odpowiednio

duża, tak by uzyskać żłobki i zęby o odpowiedniej szerokości. Wpływ na proporcje maszyny uzyskuje się przez dobranie wartości współczynnika smukłości, który wyraża iloraz długości pakietu do średnicy wewnętrznej stojana:

$$\lambda = \frac{l_s \cdot 2p}{D_s \pi}, \quad (3)$$

Przyjęte wartości parametrów znamionowych, współczynników konstrukcyjnych oraz parametrów materiałowych pozwalają na obliczenie wymiarów głównych maszyny elektrycznej w tym średnicę wewnętrzną stojana:

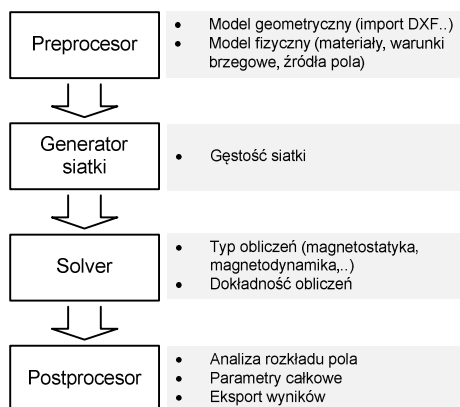
$$D_s = \left(\frac{4}{\pi^2} \frac{pS_i}{\lambda K_f K_p K_E \frac{f_s}{p} (A_s B_m)} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

Do wykonania obliczeń projektowych GMT opracowano program komputerowy zawierający zestaw zależności analitycznych i wspomagający pracę projektanta (inżyniera). W wyniku działania programu otrzymuje się zestaw wymiarów geometrycznych, parametrów materiałowych oraz projekt uzwojenia, które pozwalają na opracowanie modelu geometrycznego, przygotowanie dokumentacji technicznej i technologicznej.

2.4. Prototyp/model numeryczny generatora

Weryfikację poprawności przeprowadzonych obliczeń projektowych wykonano z wykorzystaniem darmowego programu FEMM [6]. Program ten oferuje podstawowe możliwości obliczeniowe z zakresu analizy statycznych i harmonicznych rozkładu pól magnetycznych (w ośrodkach o liniowych i nieliniowych charakterystykach), pól elektrycznych i termicznych stanów ustalonych. W zakresie projektowania maszyn elektrycznych program ten może zostać wykorzystany do obliczenia rozkładu indukcji magnetycznej, indukcyjności uzwojeń, momentu zaczepowego i elektromagnetycznego.

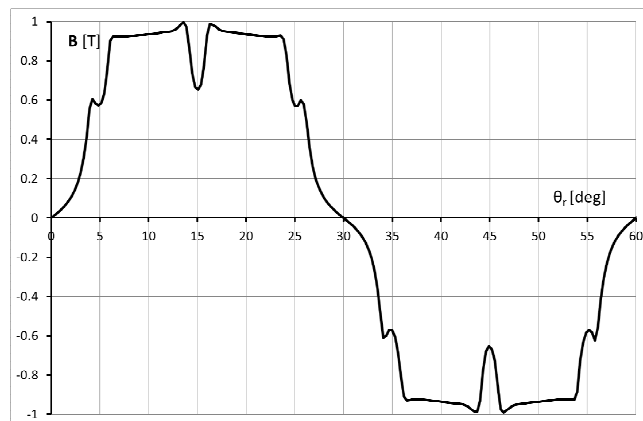
Program FEMM posiada budowę modułową (rys. 3); wyposażony jest w preprocesor (opracowanie modelu numerycznego) i postprocesor (analiza wyników), generator siatki oraz moduły obliczeniowe (solvery). Program posiada możliwość interpretowania skryptów napisanych w języku LUA, dzięki czemu możliwe jest definiowanie modeli parametrycznych oraz sterowanie procesem obliczeń [7].



Rys. 3. Modułowa struktura programu FEMM

Podstawą do definicji modelu geometrycznego i fizycznego w programie FEMM były wyniki analitycznych obliczeń projektowych. Analizie poddano rozkład indukcji magnetycznej w badanej maszynie, sprawdzając czy maksymalne wartości indukcji nie przekraczają wartości założonych.

Przy zastosowaniu uzwojenia o liczbie żłobków na biegun i fazę $q = 1$ otrzymano rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie roboczej, który charakteryzował się stosunkowo dużą zawartością wyższych harmonicznych (rys. 4). W celu eliminacji wyższych harmonicznych w rozkładzie indukcji magnetycznej oraz w przebiegu napięcia indukowanego konieczne jest zastosowanie skosu żłobków stojana.



Rys. 4. Rozkład składowej normalnej wektora indukcji magnetycznej w szczelinie roboczej GMT

Przebieg napięcia indukowanego w uzwojeniach stojana obliczono w oparciu o zmianę strumienia sprzężonego z daną fazą według zależności:

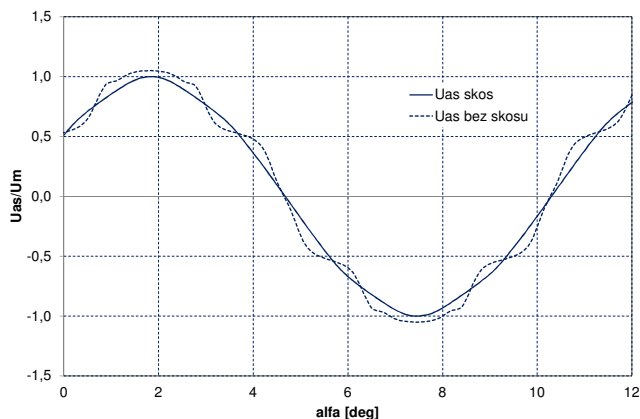
$$e(t) = -\frac{d\psi(\alpha)}{dt} = -\frac{d\alpha}{dt} \frac{d\psi(\alpha)}{d\alpha} = \omega_m \frac{d\psi(\alpha)}{d\alpha}, \quad (5)$$

gdzie: α [rad] – kąt obrotu wirnika, ω_m [rad/s] – prędkość kątowa wirnika. Strumień sprzężony obliczono na podstawie rozkładu strumienia magnetycznego wzbudzonego magnesami trwałymi wyznaczonego dla kolejnych położenia wirnika. Obliczenia w programie FEMM wykonywane są dla dwuwymiarowego modelu maszyny. Skos żłobka można uwzględnić uśredniając wartość strumienia wyznaczonego dla kolejnych położenia wirnika wzdłuż podziałki żłobkowej.

Obliczenia uruchamiane są automatycznie za pomocą odpowiednio przygotowanego skryptu LUA [7].

Po uwzględnieniu skosu żłobków stojana przebieg napięcia indukowanego w uzwojeniu stojana jest zbliżony do sinusoidalnego (rys. 5).

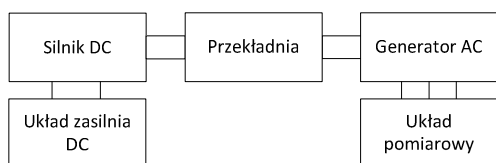
Wprowadzając skos żłobków stojana ograniczono jednocześnie wartość maksymalną momentu zaczepowego. Wyniki analizy prototypu GMT w programie FEMM pozwoliły zweryfikować założenia projektowe i wprowadzić odpowiednie poprawki do projektu maszyny.



Rys. 5. Przebieg napięcia indukowanego rotacji bez skosu i ze skosem żłobków stojana – wyniki obliczeń w programie FEMM

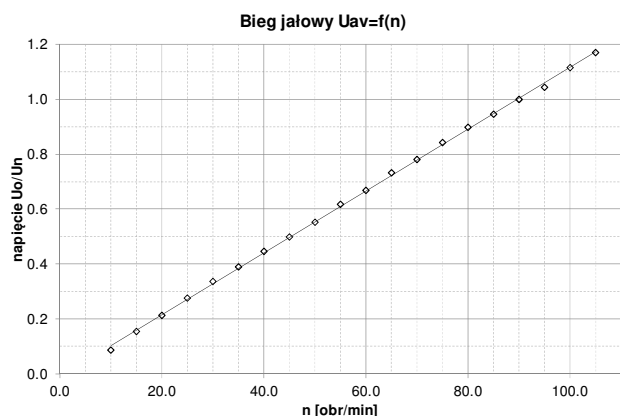
3. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

W wyniku prac projektowych przygotowano dokumentację techniczną i technologiczną GMT. Po wykonaniu prototypu GMT przygotowano specjalne stanowisko pomiarowe, którego schemat blokowy przedstawia rys. 6. Generator został sprzęgnięty z silnikiem prądu stałego za pomocą przekładni o przełożeniu $i=17,5$.



Rys. 6. Uproszczony schemat blokowy stanowiska pomiarowego do badania wolnoobrotowego GMT

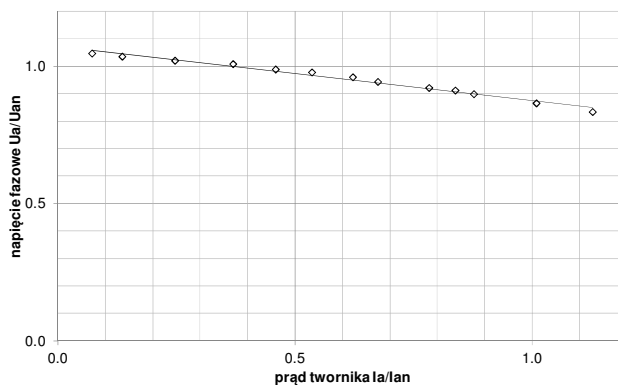
W trakcie badań prototypu wyznaczono między innymi charakterystykę biegu jałowego $U = f(n)$ (rys. 7) oraz charakterystykę zewnętrzną $U_a = f(I_a)$ przy obciążeniu rezystancyjnym (rys. 8).



Rys. 7. Charakterystyka biegu jałowego prototypu GMT $U=f(n)$

Zależność napięcia indukowanego w czasie próby biegu jałowego od prędkości obrotowej zachowuje liniowy charakter (rys. 7). Stosunkowo duża zmienność napięcia przy obciążeniu generatora (rys. 8) wynika z powiększonej szczeliny powietrznej prototypu względem projektu.

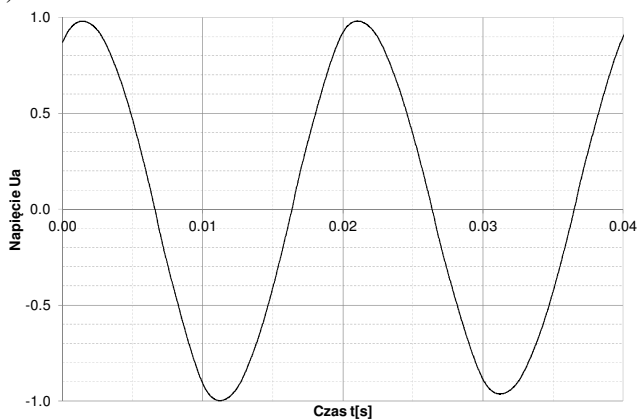
Charakterystyka zewnętrzna $U_a=f(I)$



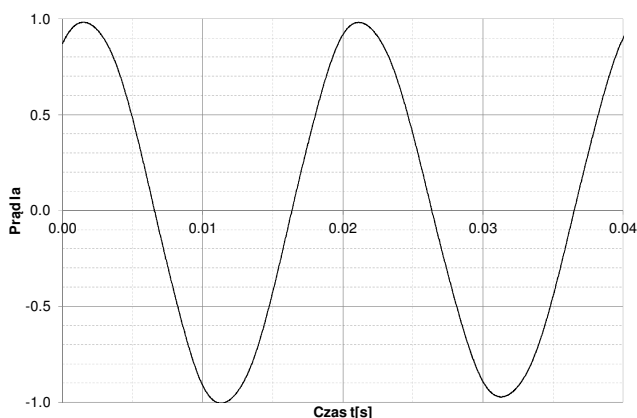
Rys. 8. Charakterystyka zewnętrzna prototypu prądnicy $U_a = f(I_a)$

Na rys. 9 przedstawiono zarejestrowane przebiegi napięcia i prądu generatora przy znamionowym obciążeniu rezystancyjnym. Zmierzone wartości zniekształceń harmonicznym THD nie przekraczają wartości 1,5% dla obu przebiegów.

a)



b)



Rys. 9. Przebieg a) napięcia i b) prądu przy obciążeniu czynnym (wartości względne)

4. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule przedstawiono założenia projektowe, wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych prototypu wolnoobrotowego generatora z magnesami trwałymi, współpracującego z innowacyjną turbiną wiatrową o pionowej osi obrotu. Badania laboratoryjne potwierdziły słuszność przyjętych założeń projektowych. Zmiany dokonane w projekcie na etapie

wykonania prototypu GMT miały wpływ na charakterystykę zewnętrzną i sprawność generatora.

Generator może znaleźć zastosowanie w energetyce wiatrowej małej mocy, w tym na jednostkach pływających (statkach, jachtach) oraz w stacjonarnych instalacjach przemysłowych.

Prototyp GMT wykonano w ramach projektu badawczo-rozwojowego *Pionowa Turbina Wiatrowa*, współfinansowanego przez Polską Agencję Rozwoju Przedsiębiorczości ze środków programu *Wsparcie w ramach dużego bonu*. Realizacja projektu dała możliwość nawiązania współpracy uczelni z partnerami przemysłowymi.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Nalepa K., Miąskowski W., Pietkiewicz P., Piechocki J., Bogacz P.: *Poradnik małej energetyki wiatrowej*. Olsztyn 2011.
2. Dąbrowski M.: *Zarys projektowania Maszyn Elektrycznych*, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 217, str. 5-30, Warszawa 2003.
3. Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcova V.: *Design of Rotating Electrical Machines*. Wiley, 2008.
4. Huang S., Luo J., Leonardi F., Lipo T. A.: A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 1, pp. 92-97, Jan/Feb 1998.
5. Honsinger V. B.: *Sizing Equations for Electrical Machinery*. *IEEE Power Engineering Review*, vol. PER-7, no. 3, pp. 39-40, March 1987.
6. *Finite Element Method Magnetics: HomePage*. [Online]. Dostępne na: www.femm.info, udostępniono: 24-lip-2016.
7. *Lua: 4.0 reference manual - contents*. [Online]. Dostępne na: www.lua.org/manual/4.0/, udostępniono: 24-lip-2016.

LOW SPEED PERMANENT MAGNET GENERATOR FOR VERTICAL AXIS WIND TURBINE

The paper presents the design of the low speed permanent magnet generator for the innovative vertical axis wind turbine. The paper shows the design assumption, selected results from the design stage and the prototype testing stage. The project was commissioned by the company ALU ECO Sp. o.o. Gdansk and co-financed by the Polish Agency for Enterprise Development. The power of the prototype generator is 15kVA and the rated voltage is 400V at a speed of 95 rpm. The generator can be used in low-power wind energy, including on vessels (ships, yachts) and in the stationary installations.

Keywords: low power vertical axis wind turbine, permanent magnet generator, design.