

Paweł Łapiński, Adam Kuźma
Politechnika Białostocka, Białystok

BADANIA MOCY W MODELU ELEKTROWNI WIATROWEJ Z GENERATOREM ASYNCHRONICZNYM DWUSTRONNIE ZASILANYM

INVESTIGATIONS OF POWER IN A WIND PLANT MODEL WITH DOUBLE FED ASYNCHRONOUS GENERATOR

Streszczenie: W pracy zaprezentowane zostało stanowisko laboratoryjne, znajdujące się w Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej, przeznaczone do badania modelu elektrowni wiatrowej z maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną. Odpowiednio połączone moduły stanowiska dają użytkownikowi możliwość wykonywania badań w różnych konfiguracjach i przypadkach mogących wystąpić podczas normalnego użytkowania rzeczywistej elektrowni wiatrowej oraz w stanach awaryjnych sieci zasilającej. W artykule przedstawione zostaną wyniki badań ukazujące moc generatora asynchronicznego dwustronnie zasilanego w stanach normalnej pracy oraz podczas występowania zapadów napięcia w sieci zasilającej.

Abstract: The work presents a laboratory stand designed to study the wind farm model with a double fed asynchronous generator located in the Electrical Department of the Białystok University of Technology. Properly connected station modules give the user the possibility to perform tests in various configurations and cases that may occur during the normal use of a real wind farm and in emergency conditions of the power supply network. The article presents the results of research showing the power generator asynchronous double fed during normal operation and during the occurrence of voltage dips in the power grid.

Słowa kluczowe: *maszyna asynchroniczna dwustronnie zasilana, elektrownia wiatrowa, odnawialne źródła energii*

Keywords: *double fed asynchronous machine, wind power plant, renewable energy sources*

1. Wstęp

Potrzeba zastąpienia konwencjonalnych źródeł energii oraz zapotrzebowanie na odnawialne źródła energii zmusza człowieka do wykorzystywania energii żywiołów i mobilizuje ludzkość do szukania nowych rozwiązań, poszukiwania technologii uzyskując jak najlepsze rezultaty, jak najmniejszym kosztem. Jednym z rozwiązań są elektrownie wiatrowe. Głównym elementem turbiny wiatrowej jest generator przetwarzający energię mechaniczną wiatru na energię elektryczną. W elektrowniach wiatrowych stosowane są generatory synchroniczne, asynchroniczne klatkowe i pierścieniowe. Elektrownie wiatrowe do wytworzenia mocy dostarczanej do systemu elektroenergetycznego używają również dwustronnie zasilanych generatorów indukcyjnych [1,2,3], które generują energię elektryczną o stałej częstotliwości niezależnie od prędkości wirowania wału [4]. Większą sprawność wykorzystania energii pierwotnej uzyskuje się przez dopasowanie prędkości wirowania do aktualnej prędkości wiatru. Lepsza dynamika zmian mocy oraz mniejsza moc przekształtników są dodatkowymi zaletami

w stosunku do generatora synchronicznego [4]. W artykule przedstawiono wyniki prac zrealizowanych za pomocą stanowiska symulującego rzeczywistą elektrownię wiatrową z asynchroniczną maszyną dwustronnie zasilaną znajdującego się na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej. Przy użyciu stanowiska zasymulowano i przedstawiono badania, których przeprowadzenie na czynnej farmie wiatrowej byłoby zbyt trudne do osiągnięcia.

2. Elektrownia wiatrowa z generatorem asynchronicznym dwustronnie zasilanym

W dwustronnie zasilanej prądnicy asynchronicznej prędkość wirnika może być zmieniana w zakresie do 30% wartości znamionowej. Podnosi to (średni) poziom mocy w warunkach porywistego wiatru. Zmniejsza to jednocześnie niepożądane fluktuacje mocy na zaciskach sieci oraz naprężenia głównych elementów mechanicznych elektrowni. Aby osiągnąć te efekty, uzwojenie wirnika podłącza się przez pierścienie ślizgowe do sieci przez przemienniki częstotliwości. Generator jest więc połączony

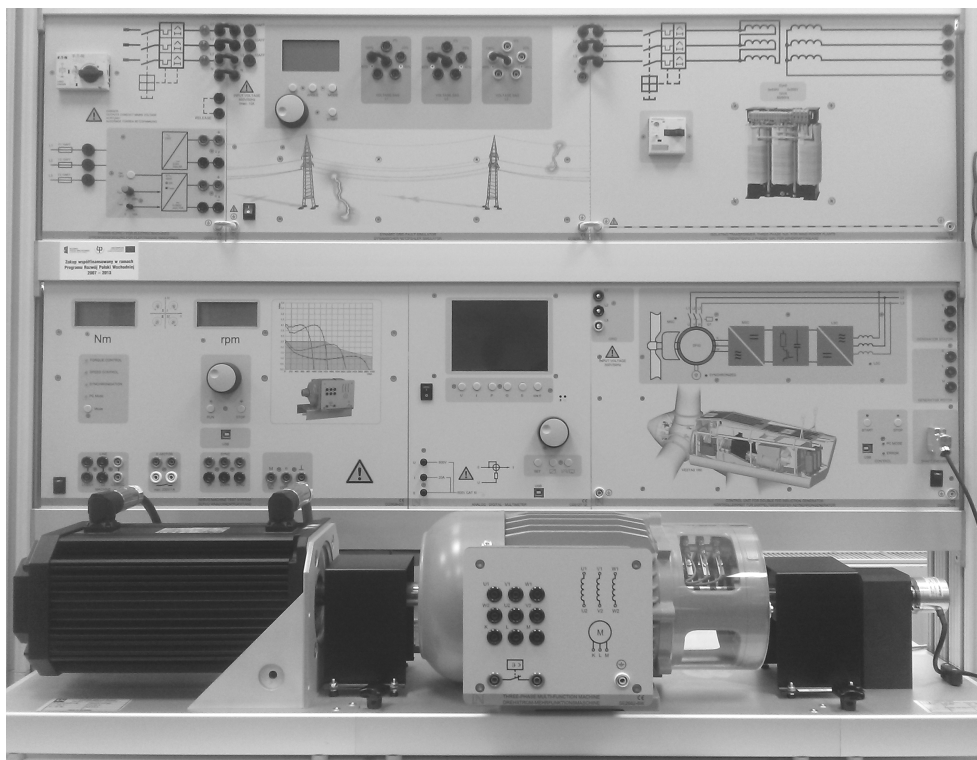
z siecią zarówno od strony stojana, jak i wirnika. Dzięki temu można sterować parametrami obwodu magnetycznego wirnika. Przemienne częstotliwości ma możliwość przetwarzania energii w obu kierunkach. Może pracować jako prostownik, a także generować napięcie przemiennie o dowolnej częstotliwości.

Przy niskiej prędkości wiatru, prędkość obrotowa wirnika jest dużo mniejsza od synchronicznej. W tym trybie pracy strumień wirnika jest wytwarzany przez falownik i jego prędkość dodaje się do prędkości obrotowej wirnika. W ujęciu magnetycznym maszyna osiąga swój znamionowy poślizg, chociaż prędkość mechaniczna jest mała. Energia jest pobierana z sieci aby wytworzyć strumień wirnika. Jednakże ilość tej energii jest znacznie mniejsza niż ilość generowana przez stojan. W ten sposób generator może pracować w szerokim zakresie prędkości obrotowych. Kiedy prędkość wiatru rośnie, częstotliwość strumienia jest odpowiednio zmniejszana, co utrzymuje poślizg na stałym poziomie. Aby skompensować porywy wiatru lub skompensować duże prędkości, odwraca się kierunek wirowania strumienia. Umożliwia to zwiększenie prędkości mechanicznej przy stałym poślizgu (w sensie magnetycznym). Aby to osiągnąć przemiennik częstotliwości oddaje część energii z wirnika do sieci, co skutkuje przepływem mocy w tym samym kierunku.

Około 10% mocy elektrowni jest w ten sposób wytwarzana w wirniku i oddawane przez falownik do sieci energetycznej. Ponieważ wzbudzenie maszyny jest zasilane przez falownik, z sieci nie jest pobierana moc bierna. Co więcej, sterowanie umożliwia wprowadzanie pojemnościowej lub indukcyjnej składowej biernej do sieci wedle wymagań operatora. Zwiększając wzbudzenie, falownikiem podłączonym do uzwojenia wirnika maszyny, ponad wartość znamionową, wymuszamy oddawanie do sieci mocy biernej, wówczas generator zachowuje się jak kondensator. Zmniejszając wzbudzenie poniżej wartości znamionowej wymusimy pobór mocy biernej, generator zachowuje się jak dławik. W praktyce wymagamy pracy przy przewzbudzeniu, by zapewnić zbilansowanie mocy biernej. Praca elektrowni może więc przyczyniać się do stabilizacji sieci.

3. Stanowisko laboratoryjne do badania elektrowni wiatrowej z silnikiem asynchronicznym dwustronnie zasilanym

Na rysunku 1 przedstawiony jest widok stanowiska laboratoryjnego do badania elektrowni wiatrowej z silnikiem asynchronicznym dwustronnie zasilanym. Stanowisko oraz jego poszczególne bloki zostały opisane w pracy [5].

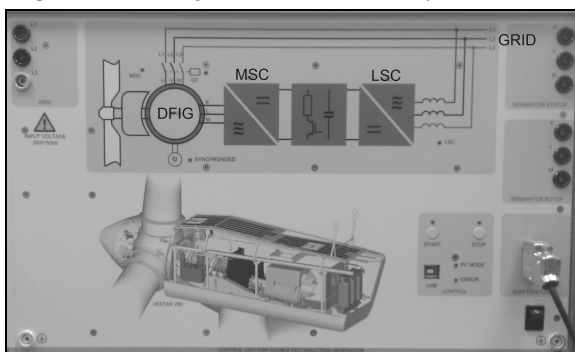


Rys. 1. Widok stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko jest wyposażone w następujące elementy: uniwersalny zasilacz, blok do symulacji zwarć o różnych konfiguracjach, transformator trójfazowy 1kW, blok sterujący maszyną synchroniczną, blok sterujący dwustronnie zasilanym silnikiem asynchronicznym, multimetr analogowo-cyfrowy oraz układ napędowy składający się z dwustronnie zasilanego generatora asynchronicznego i silnika synchronicznego.

3.1. Blok sterujący dwustronnie zasilanym silnikiem asynchronicznym

Jednostka sterująca, której widok przedstawiony jest na rysunku 2, wyposażona jest w dwa sterowane falowniki trójfazowe, wbudowany wyłącznik do łączenia generatora z siecią, interfejs USB oraz układ hamulca elektrycznego do realizacji stanów zwarciowych.

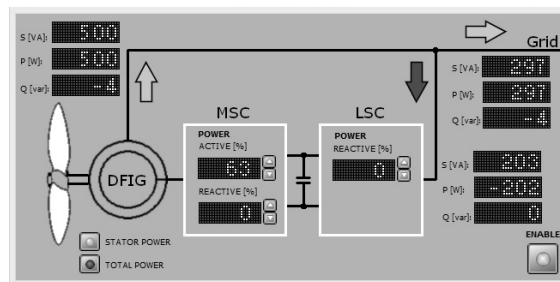


Rys. 2. Widok jednostki sterującej dwustronnie zasilanym silnikiem asynchronicznym

Całość zasilana jest napięciem 3x400 V o częstotliwości 50 - 60 Hz, a maksymalna moc wyjściowa wynosi 1 kVA. Układ ma możliwość pracy przy prędkości podsynchronicznej i nadsynchronicznej, umożliwia ręczną lub automatyczną synchronizację z siecią oraz może niezależnie sterować mocą bierną i czynną oraz napięciem i częstotliwością.

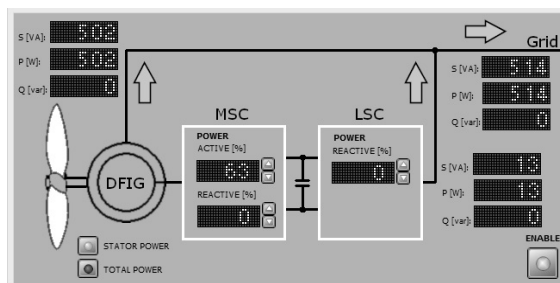
4. Sterowanie mocą przy prędkości podsynchronicznej i nadsynchronicznej

Stanowisko umożliwia symulację elektrowni wiatrowej przy różnych warunkach pogodowych i w różnych stanach istniejących w sieci zasilającej. Przy słabej sile wiatru prędkość obrotowa wirnika jest dużo mniejsza od synchronicznej. Istnieje możliwość zadania prędkości generatora np. na poziomie 1300 obr/min (stała prędkość wiatru, co w rzeczywistych warunkach jest trudne do uzyskania) i ustawieniu generacji mocy czynnej na poziomie np. 500 W. Wynik bilansu mocy przy normalnej pracy sieci zasilającej przedstawiony został na rysunku 3.



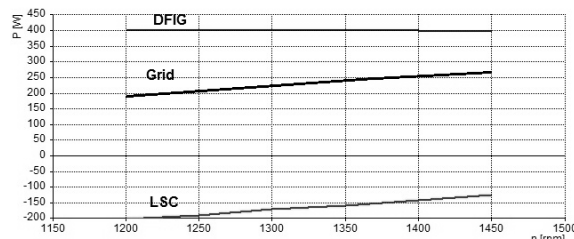
Rys. 3. Rozpływ mocy przy prędkości generatora wynoszącej 1300 obr/min

Przekształtnik podłączony do wirnika generatora, przy prędkości podsynchronicznej, pobiera moc z sieci energetycznej o wartości 200 W. Dzieje się tak, ponieważ wirnik ma zbyt małą częstotliwość napięcia i układ pobiera moc w celu dopasowania częstotliwości względem sieci energetycznej. Stojan i wirnik mając takie same częstotliwości napięcia generują moc o wartości 500 W i w efekcie układ oddaje moc czynną do sieci o wartości wypadkowej 300 W. Ustawiając prędkość do wartości nadsynchronicznej np. na poziomie 1900 obr/min (rys. 4) wirnik nie pobiera energii, ponieważ osiągnął częstotliwość napięcia wystarczającą do generowania zadanej mocy, bez konieczności ponoszenia strat na dopasowanie częstotliwości.



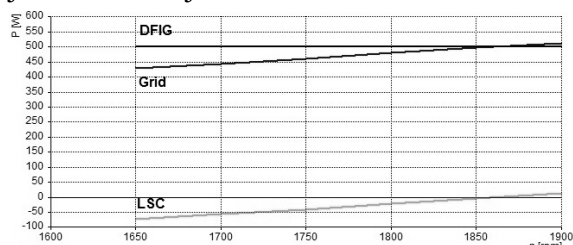
Rys. 4. Rozpływ mocy przy prędkości generatora wynoszącej 1900 obr/min

Prędkość wiatru jest niestabilna dlatego istnieje możliwość wyznaczenia charakterystyki rozprywu mocy przy różnych prędkościach generatora w zakresie prędkości podsynchronicznej i nadsynchronicznej (rys. 5 i 6).



Rys. 5. Rozpływ mocy w zależności od prędkości generatora przy prędkościach podsynchronicznych

Podczas zmniejszania prędkości, w celu zachowania stałej mocy generatora DFIG, przekształtnik LSC pobiera więcej energii z sieci zasilającej, a w związku z tym sumaryczna energia oddawana do systemu energetycznego jest coraz mniejsza.



Rys. 6. Rozpływ mocy w zależności od prędkości generatora przy prędkościach nadsynchronicznych

Przy większych prędkościach wiatru generator pracuje powyżej prędkości synchronicznej. Podczas pracy przy takich prędkościach, w celu zachowania mocy generatora DFIG na zadanej wartości, przekształtnik LSC wraz ze wzrostem prędkości pobiera mniej energii z sieci zasilającej, a w związku z tym sumaryczna energia oddawana do systemu energetycznego jest coraz większa.

5. Moc generatora w czasie występowania zapadów napięcia w sieci zasilającej

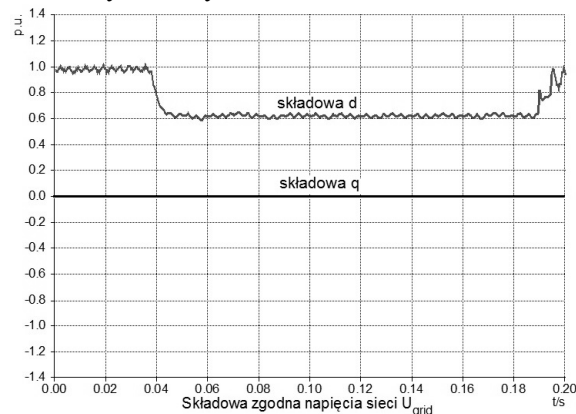
Dużą wadą układów generatorowych z maszyną dwustronnie zasilaną jest ich czułość na zakłócenia napięcia po stronie stojana. Pomiędzy wirnikiem i stojanem występuje sprzężenie magnetyczne, to sprawia, że zakłócenia napięcia, pochodzące od strony systemu elektroenergetycznego, są bezpośrednio transformowane na stronę wirnika. Zakłócenia napięcia w istotny sposób wpływają na działanie przekształtnika zasilającego wirnik generatora i mogą doprowadzić do jego uszkodzenia. Do najczęściej występujących zakłóceń w pracy systemu elektroenergetycznego należą zwarcia. Bezpośrednim efektem zwarć są spadki napięcia na elementach sieci przesyłowej i występowanie zapadów napięcia w węzłach systemu [6].

5.1. Wyniki symulacji generatora podczas zapadów napięcia

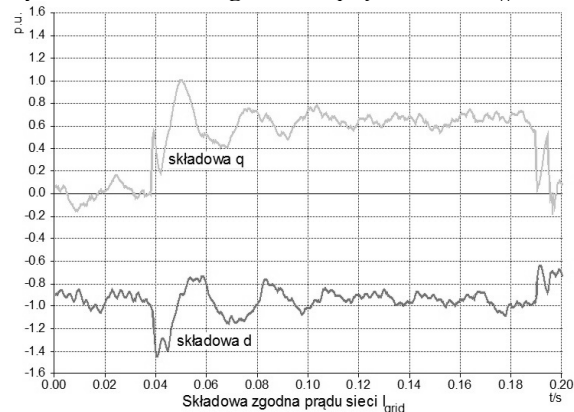
Nie zrównoważone (niesymetryczne) zwarcia skutkują niezrównoważeniem układu napięć. Te z kolei wywołują niezrównoważone prądy w konwencjonalnych, podłączanych bezpośrednio prądnicach elektrowni wiatrowych. Nowoczesne elektrownie wiatrowe z przemiennikami

częstotliwości dają możliwość aktywnego sterowania składową przeciwną. Można to realizować falownikami MSC i LSC. Górną granicę zakresu regulacji ograniczają maksymalne prądy i napięcia przekształtników. Na ogół priorytetowe jest sterowanie składową zgodną, natomiast towarzyszące temu tętnienia momentu nie mogą być w pełni tłumione. Przedstawiane stanowisko umożliwia zasymulowanie różnego typu zwarć sieci powodujących zapady napięcia. Poziom zapadów napięcia ustawia się przy pomocy odpowiednich zworek, indywidualnie dla każdej fazy [5]. W stanowisku wykorzystano metodę składowych symetrycznych natomiast przebiegi prądów i napięć mogą zostać przedstawione w układzie współrzędnych dq . Składowa prądu d jest proporcjonalna do mocy czynnej, a składowa q do mocy biernej.

Przy użyciu stanowiska można przedstawić wpływ zwarć w sieci na pracę dwustronnie zasilanej prądnicy indukcyjnej elektrowni wiatrowej. Poniżej przedstawiono jeden z możliwych przypadków polegających na zwarciu trójfazowym powodującym zapad napięcia o 40% (rys. 7). Oznaczenia prądów i napięć badanego układu są zgodne z oznaczeniami zaznaczonymi na rysunkach 3 i 4.

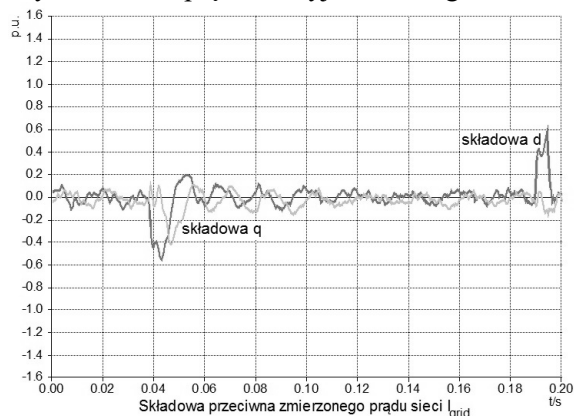


Rys. 7. Składowa zgodna napięcia sieci U_{grid}

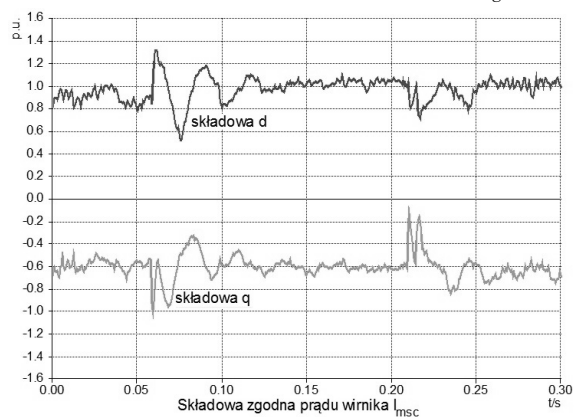


Rys. 8. Składowa zgodna prądu sieci I_{grid}

Składowa czynna prądu wirnika jest proporcjonalna do mocy czynnej generatora. Podczas normalnej pracy sieci zasilającej składowa bierna odpowiada za magnesowanie prądnicy czyli za napięcie wyjściowe generatora.

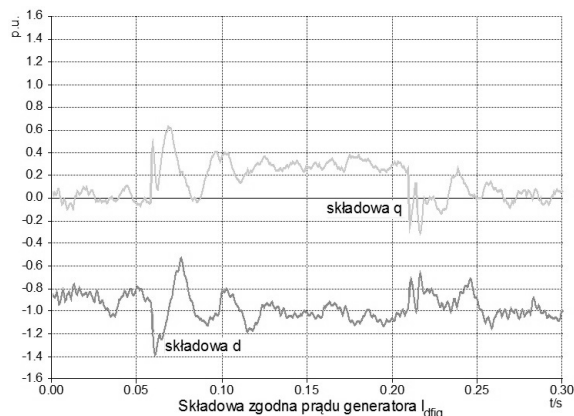


Rys. 9. Składowa przeciwna prądu sieci I_{grid}



Rys. 10. Składowa zgodna prądu wirnika I_{msc}

Podczas zwarcia składowa bierna prądu wirnika wzrasta, a generator oddaje większą moc bierną do sieci.



Rys. 11. Składowa zgodna prądu generatora I_{dfig}

6. Podsumowanie

Odnawialne źródła energii mają coraz większe znaczenie w gospodarce, na skutek zmian w technologii, wymagań prawnych i świadomości ekologicznej społeczeństwa. Przedstawione sta-

nowisko badawcze służy do poznania budowy i zasad działania elektrowni wiatrowej z generatorem indukcyjnym dwustronnie zasilanym. Stanowisko jest na tyle uniwersalne, że można przeprowadzać wiele doświadczeń podczas normalnej pracy systemu energetycznego, jak i podczas trwania awaryjnych stanów w sieci. W pracy, ze względu na ograniczoną ilość miejsca, została przedstawiona tylko część możliwości stanowiska. Zarejestrowanie przebiegów napięć i prądów w każdym miejscu badanego układu podczas zwarcia w sieci jest bardzo trudne dlatego można stwierdzić, że w celach edukacyjnych takie stanowisko jest wielce przydatne. Przedstawione stanowisko badawcze umożliwia przyjazną dla użytkownika obsługę i wizualizację zjawisk w trakcie doświadczeń. Wyniki otrzymanych doświadczeń można czytelnie przedstawić, zobrazować i dokładnie przeanalizować.

7. Literatura

- [1]. W. Koczara "Wprowadzenie do napędu elektrycznego", Wyd. 1, *Politechnika Warszawska*, 2012.
- [2]. W. Przyborowski, G. Kamiński "Maszyny elektryczne", *Politechnika Warszawska*, 2014.
- [3]. J. Przybylski "Napęd odwracalny w elektrowni szczytowo-pompowej", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 72, str. 119 - 124, 2005.
- [4]. Z. Lubośny "Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym", *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, Warszawa, 2006.
- [5]. P. Łapiński, A. Kuźma "Badania elektrowni wiatrowej z generatorem asynchronicznym dwustronnie zasilanym", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 113, str. 37 - 42, 2017.
- [6]. K. Blecharz "Sterowanie maszyną dwustronnie zasilaną, pracującą jako generator w elektrowni wiatrowej przy zapadach napięcia", *Acta Energetica*, 2010, tom. 1, s. 5 - 15.

Autorzy

inż. Paweł Łapiński, pawel-lapinski1@wp.pl, student Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej,
dr inż. Adam Kuźma, a.kuzma@pb.edu.pl
Katedra Energoelektroniki i Napędów Elektrycznych, Wydział Elektryczny, Politechnika Białostocka.

Informacje dodatkowe

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WE/1/2018 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.