

**Paweł Łapiński, Adam Kuźma**  
**Politechnika Białostocka, Białystok**

## **BADANIA ELEKTROWNI WIATROWEJ Z SILNIKIEM ASYNCHRONICZNYM DWUSTRONNIE ZASILANYM W STANACH AWARYJNYCH**

### **INVESTIGATIONS OF WIND PLANT WITH (DFIG) DOUBLE FED ASYNCHRONOUS GENERATOR IN FAULT STATES**

**Streszczenie:** W pracy zaprezentowane zostanie stanowisko laboratoryjne przeznaczone do badania elektrowni wiatrowej z maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną w stanach awaryjnych sieci zasilającej. Odpowiednio połączone moduły stanowiska dają użytkownikowi możliwość wykonywania badań symulujących zachowania rzeczywistej elektrowni wiatrowej podczas zakłóceń w sieci zasilającej. W skrócie opisany zostanie moduł symulujący zapady napięcia i zwarcia w sieci zasilającej. Przedstawione zostaną wyniki badań ukazujące reakcję części mechanicznej turbiny wiatrowej przy 100% zapadach napięcia oraz utrzymanie pracy turbiny przy różnych rodzajach zwarć.

**Abstract:** A laboratory model introduced for the wind power plant with double fed asynchronous generator investigations in times of grid emergency is proposed in article. An user thanks to adequate modules connections may investigate wind power plant operations during grid disturbances. A module to simulate grid voltage falls and short-circuit will be shortly presented. The investigations results showing: the mechanical parts of wind turbine reactions during 100% grid voltage falls and turbine behavior during different kind of short-circuits will be presented.

**Słowa kluczowe:** *maszyna asynchroniczna dwustronnie zasilana, elektrownia wiatrowa, zapad napięcia*

**Keywords:** *double fed asynchronous generator, wind power plant, voltage sag*

### **1. Wstęp**

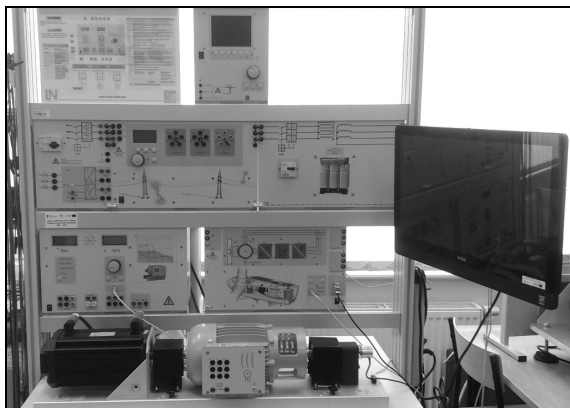
Zwarcia 1-fazowe są najczęstszymi przyczynami zakłóceń sieci. Zwarcia wywołane są połączeniem o zaistniałej małej impedancji w miejscu zwarcia, co powoduje niesymetryczne obciążenia sieci. W przypadku zwarcia 2-fazowego napięcie w miejscu wystąpienia zwarcia jest praktycznie zerowe, ale wraca do normalnego stanu w pobliżu miejsca zasilania, dlatego obciążenie sieci jest niesymetryczne. Natomiast 2-fazowe zwarcie doziemne między L2, L3 i ziemią zazwyczaj wytwarza łuk elektryczny i również powoduje niesymetryczne obciążenie sieci. Zwarcie 2-fazowe szybko rozwija się w zwarcie 3-fazowe, które jest najrzadziej występującym zwarcie. Zwarcie 3-fazowe wywołuje największe prądy zwarcie w sieci, a obciążenie sieci jest w tym przypadku symetryczne. Niekiedy zdarzają się też zwarcia 3-fazowe z doziemieniem. W tym przypadku obciążenie również jest symetryczne.

W artykule, za pomocą stanowiska laboratoryjnego przeznaczonego do badania elektrowni wiatrowej z maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną, przedstawiony zostanie wpływ zwarć

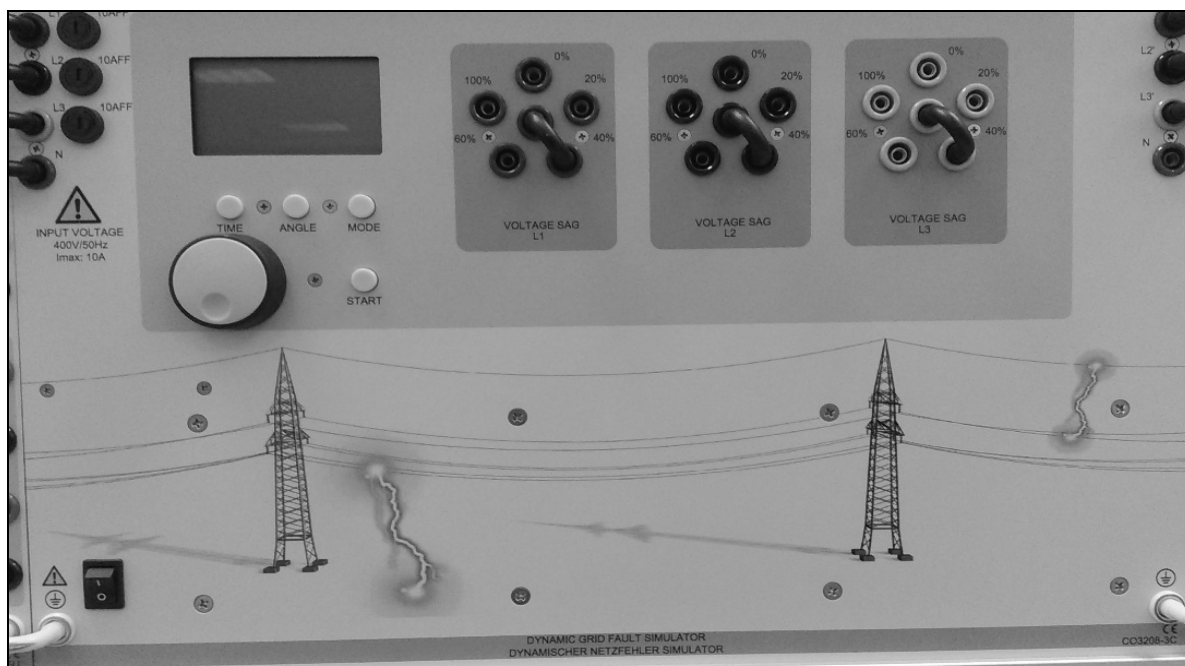
w sieci i zapadów napięcia na elektrownię wiatrową z dwustronnie zasilaną prądnicą indukcyjną. Obserwacja odpowiedzi elektrowni wiatrowej na zwarcia powodujące zapady napięcia do 100% i wpływ zwarć w przypadku zapadów napięcia o 40% w stosunku do napięcia znamionowego.

### **2. Stanowisko laboratoryjne do badania elektrowni wiatrowej z silnikiem asynchronicznym dwustronnie zasilanym**

W Politechnice Białostockiej Wydziału Elektrycznego znajduje się stanowisko laboratoryjne do badania elektrowni wiatrowej z silnikiem asynchronicznym dwustronnie zasilanym, którego kompletny widok przedstawiony został na rysunku 1. 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 układu napędowego.



Rys. 1. Widok stanowiska laboratoryjnego



Rys. 2. Widok bloku do symulacji zwarć

Przy użyciu zworek, zależnie od ustawień, można generować zapady napięcia o wartości od 0%, ze skokiem 20%, aż do wartości 100%. Na wyświetlaczu jest możliwość ustawienia wzmocnienia (w tym przypadku prądu), czasu zwarcia i szerokości martwej strefy (wartości, po której elektrownia wiatrowa musi odpowiednio zareagować).

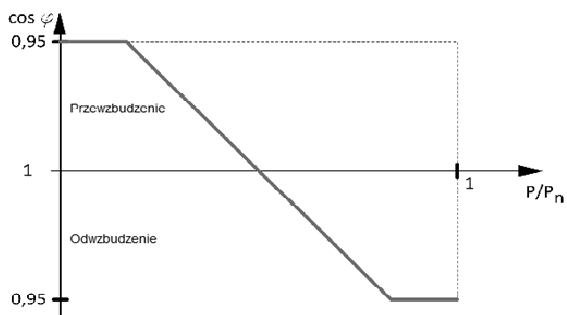
### 3. Sterowanie elektrowni wiatrowej

W razie niedoboru mocy istotne dla źródeł wytwórczych jest utrzymanie w trybie pracy i przyczynianie się do utrzymania stabilności systemu energetycznego [1]. Jeśli źródło nie funkcjonuje poprawnie pogłębiają się problemy ze stabilnością. Rozwój energetyki wiatrowej wiąże się ze zmniejszeniem udziału konwencjonalnych źródeł, które pełnią rolę stabilizato-

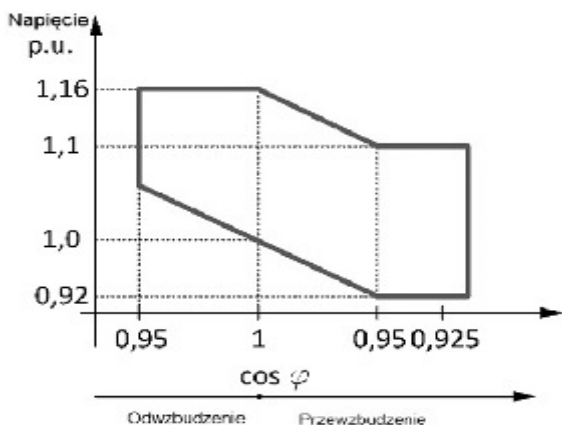
Stanowisko laboratoryjne oraz jego możliwości zostały opisane w artykule: „Badania elektrowni wiatrowej z generatorem asynchronicznym dwustronnie zasilanym”, dlatego skupiono się na opisie bloku realizującego symulacje zwarć w sieci zasilającej.

Blok symulujący zwarcia w sieci (rys. 2) umożliwia symulację zwarć o różnych konfiguracjach. Zwarcia mogą powodować zapady napięcia w każdej fazie, w różnym stopniu.

rów, dlatego elektrownie wiatrowe starego typu, postawione zanim określono warunki przyłączeniowe są odłączane od sieci nawet przy relatywnie niewielkich fluktuacjach napięcia, aby nie wpływały na bezpieczeństwo sieci. Operator sieci może zażądać stałego współczynnika mocy  $\cos\varphi$ , wyrażonej w [var] mocy biernej albo pracy według zadanej charakterystyki  $\cos\varphi = f(P)$ , czy  $\cos\varphi = f(U)$ . Jeżeli operator zażąda pracy według którejś z wyżej wymienionej charakterystyk, wówczas pożądana wartość mocy biernej powinna być automatycznie zadawana. W przypadku charakterystyki  $\cos\varphi = f(P)$  przedstawionej na rysunku 3, zwłoka nie powinna przekraczać 10s. Zwłoka przy żądanej charakterystyce  $\cos\varphi = f(U)$  z rysunku 4 powinna zawierać się w przedziale od 10s do 1 minuty.



Rys. 3. Przykład charakterystyki  $\cos \varphi = f(P)$

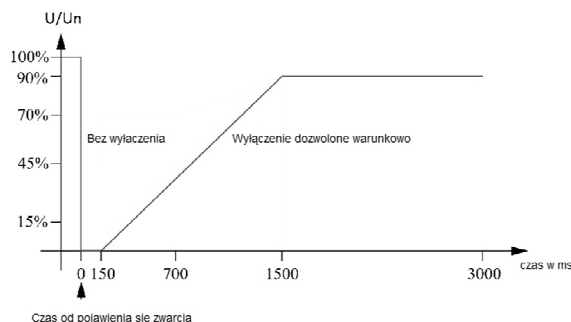


Rys. 4. Przykład charakterystyki  $\cos \varphi = f(U)$

Aby zapobiec skokom napięcia, gdy moc czynna podlega fluktuacjom, charakterystyka powinna być ciągła i mieć małe nachylenie.

### 3.1. Zdolność utrzymania pracy

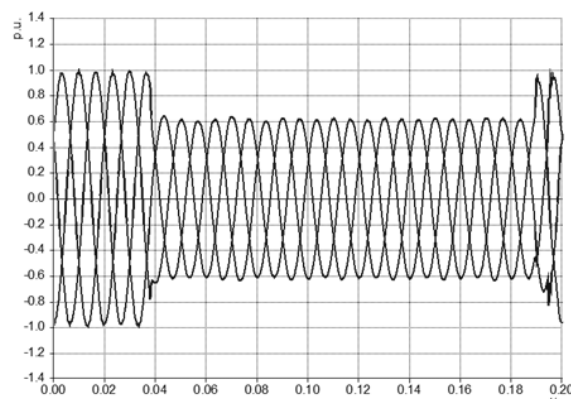
Czas trwania zwarcia ma duże znaczenie dla utrzymania ciągłości pracy elektrowni wiatrowej. Na rysunku 5 przedstawiono graniczną krzywą napięcia w punkcie przyłączenia źródeł wytwórczych do sieci. W zależności od poziomu spadku napięcia sterowanie elektrowni wiatrowej powinno odpowiednio zareagować. Zgodnie z charakterystyką, jeżeli zwarcie w sieci, trwające 300 ms, spowoduje obniżenie napięcia w miejscu przyłączenia elektrowni wiatrowej do wartości 15% napięcia znamionowego, wówczas elektrownia natychmiast powinna się wyłączyć. Natomiast elektrownia może pracować bez przerwy podczas zwarcia, które spowoduje spadek napięcia do wartości nie większej niż 90% napięcia znamionowego. Powyżej granicznej linii zapady napięcia nie powinny doprowadzić do niestabilności pracy lub odłączenia generatora elektrowni wiatrowej od sieci.



Rys. 5. Wykres przedstawiający utrzymanie w stanie pracy elektrowni wiatrowej podczas zwarc występujących w sieci

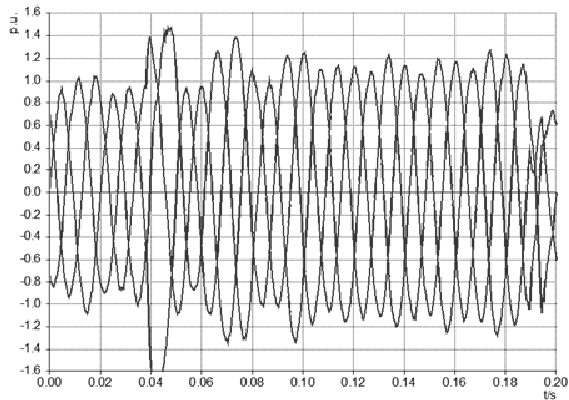
Przenoszone prądy zwarcia muszą być uzgadniane z operatorem sieci. Jeśli generator traci stabilność, albo zadziałałyby zabezpieczenia przy wystąpieniu zwarcia, urządzenie wytórcze może być wyłączone natychmiast według ustaleń z operatorem. Generator musi powrócić do stanu synchronizacji w ciągu 2 sekund od odłączenia, a moc czynna ma rosnąć do pierwotnej wartości z gradientem minimum 10% mocy znamionowej na sekundę. Natychmiastowe wyłączenia powyżej granicznej linii dozwolone są w każdym przypadku. W wyjątkowych przypadkach i według ustaleń z operatorem dozwolone są odchyły od odbudowania mocy oraz czas ponownej synchronizacji.

Na rysunku 6 i 7 pokazano zmianę wartości napięcia i prądu podczas wystąpienia zakłócenia trwającego 150ms.



Rys. 6. Przebieg napięcia w punkcie przyłączenia elektrowni wiatrowej do sieci podczas zwarcia trójfazowego

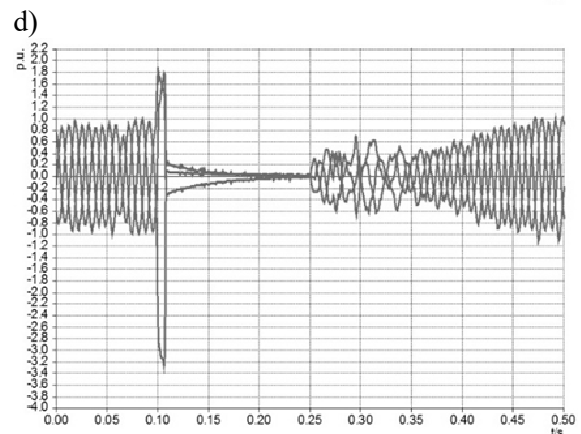
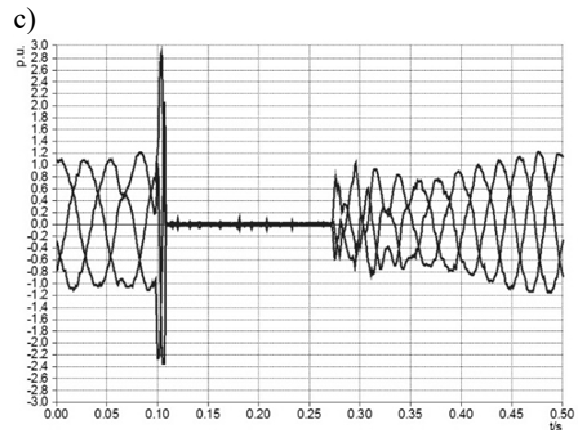
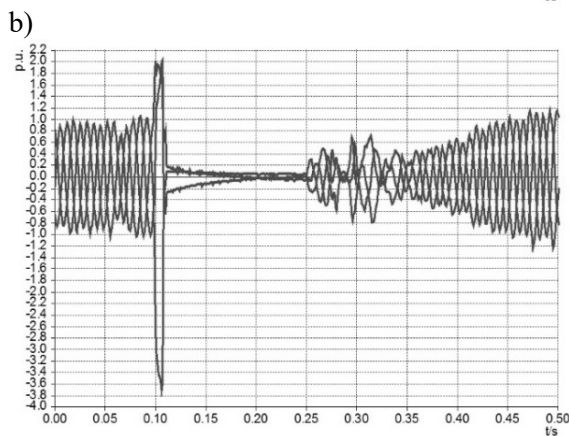
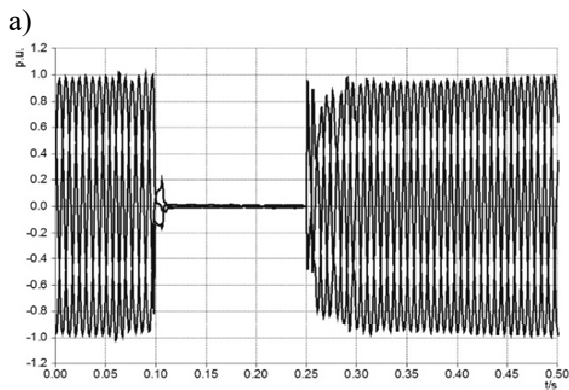
Napięcie spada do 60% napięcia znamionowego, a prąd na początku trwania zwarcia gwałtownie rośnie, a na koniec trwania zwarcia gwałtownie maleje, aby uzyskać wartość prądu znamionowego.



Rys. 7. Przebieg prądu elektrowni wiatrowej podczas zwarcia trójfazowego

#### 4. Badanie elektrowni wiatrowej przy 100% zapadach napięcia

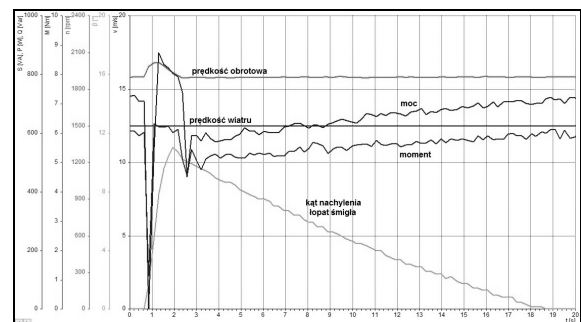
Przeprowadzono badania symulujące zwarcie 3-fazowe, które spowodowało 100% zapad napięcia. Symulacja zwarcia trwała 150ms, podczas tego czasu do sieci nie była oddawana żadna energia, ponieważ falowniki nie były w stanie wyznaczyć fazy napięcia. Stabilizacja napięcia nastąpiła już po 40ms, po tym czasie falowniki zapoczątkowały odbudowywanie napięcia, a wraz z nimi nastąpiła stabilizacja prądu sieci i generatora.



Rys. 8. Charakterystyki wykonane podczas zapadu napięcia 100%. Przedstawiają kolejno napięcie sieci (a), prąd sieci (b), prąd falownika (c), prąd generatora (d).

#### 5. Reakcja części mechanicznej turbiny wiatrowej przy zapadach napięcia 100%

W celu zbadania reakcji części mechanicznej turbiny wiatrowej w stanach awaryjnych występujących w sieci zasilającej, zasymulowano zwarcie 3-fazowe trwające 150 ms. Prędkość wiatru jest stała. Zarejestrowano przebieg prędkości generatora, moc i moment generatora oraz kąt nachylenia łopatek śmigła, co zostało przedstawione na rysunku 9.

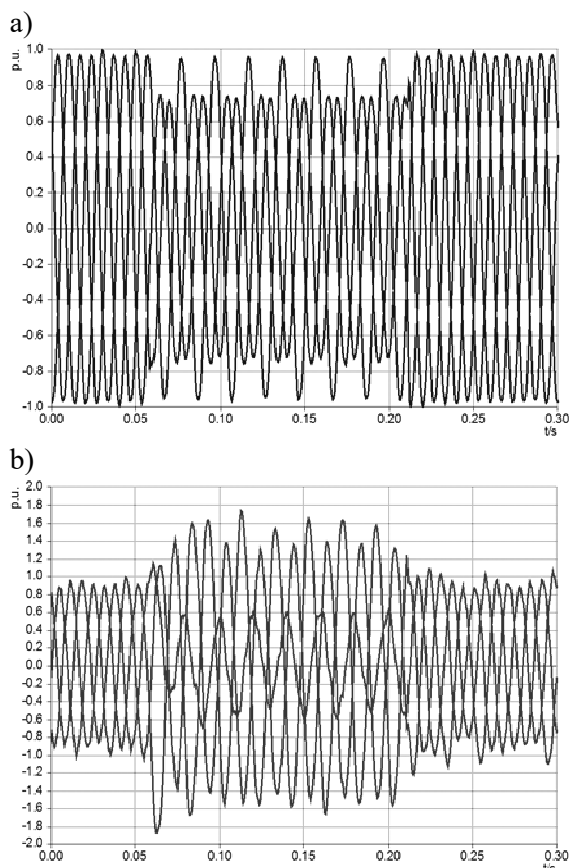


Rys. 9. Charakterystyki części mechanicznej turbiny wiatrowej przy zwarcu w sieci powodującego 100% zapad napięcia.

Podczas zwarcia, moc generatora oddawana do sieci spada do zera. Generator nie jest obciążony a jego prędkość obrotowa zaczyna wzrastać. Wzrost prędkości generatora uruchamia system regulacji kąta łopat. Zmiana kąta łopat oraz zakończenie zwarcia w sieci (trwającego 150 ms) powoduje zmniejszenie prędkości generatora do wartości ustalonej w ciągu około 1,5 sekundy. System regulacji kąta łopat, w ciągu około 17 sekund, ustawia kąt łopat do pierwotnego ustawienia, co powoduje stabilizowanie momentu i mocy generatora.

## 6. Utrzymanie pracy turbiny przy zwarcu 2-fazowym

Kolejne badanie zostało przeprowadzone podczas symulacji zwarcia 2-fazowego trwającego 150 ms, powodującego 40% zapad napięcia. Podczas zwarcia, amplituda napięcia w dwóch fazach, w których wystąpiło zakłócenie, zmalało o 40%, a w trzeciej fazie pozostała bez zmian.



Rys. 10. Charakterystyki przedstawiające zwarcie 2-fazowe przy zapadzie napięcia 40%.

Efektom zwarcia był wzrost prądu na dwóch fazach do wartości wyższej o 60% w stosunku do wartości początkowej, a w fazie wolnej od zakłóceń prąd zmalał o 40%. Pomimo zwarcia, turbina nie zatrzymała swojej pracy, dzieje się tak, ponieważ zakłócenie trwało zbyt krótko w stosunku do ustawienia wartości martwej strefy.

## 7. Podsumowanie

Stanowisko umożliwia symulowanie elektrowni wiatrowej nie tylko w normalnych warunkach pracy, co zostało przedstawione w artykule „Badania elektrowni wiatrowej z generatorem asynchronicznym dwustronnie zasilanym”, ale również w stanach kiedy w sieci zasilającej występują niekontrolowane zjawiska. W pracy przedstawiono tylko podstawowe badania, które można wykonać. Na stanowisku można również przeprowadzić badania pokazujące różnice między dostarczaniem mocy biernej przez elektrownię wiatrową w warunkach normalnych, a dostarczeniem jej w stanach zwarciovych sieci oraz obserwacją zwarć sieci bez oddawania mocy biernej. Stanowisko jest na tyle uniwersalne, że można przeprowadzać jeszcze wiele innych doświadczeń. Stanowisko badawcze umożliwia przyjazną dla użytkownika obsługę i wizualizację zjawisk w trakcie doświadczeń. Wyniki otrzymanych doświadczeń można czytelnie przedstawić przy pomocy kolorowych przebiegów, zobrazować i dokładnie przeanalizować.

## 8. Literatura

[1]. G. Sieklucki, B. Bisztyga, A. Zdrojewski, T. Orzechowski, R. Sykulski: "Modele i zasady sterowania napędami elektrycznymi", *Wydaw. AGH*, str. 174 – 182, 2014.

## 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/3/2013 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.