

Odtwarzanie zmiennych stanu w układzie sterowania turbiną wiatrową z generatorem indukcyjnym

Streszczenie. W artykule przedstawiono propozycję obserwatora zmiennych stanu w układzie sterowania turbiną wiatrową z generatorem indukcyjnym klatkowym. Układ regulacji ma zapewnić maksymalizację uzyskiwanej mocy elektrycznej dla prędkości wiatru w obszarze pomiędzy prędkością startu turbiny, a prędkością wyłączenia ze względu na warunki bezpieczeństwa, tj. w drugiej strefie pracy turbiny. W celu zapewnienia maksymalnej sprawności konwersji energii zaproponowano regulator pozwalający na szybkie osiągnięcie nowego punktu pracy turbiny w ślad za szybkimi zmianami prędkości wiatru. Pokazano wyniki badań symulacyjnych układu regulacji z obserwatorem zmiennych stanu elektrowni wiatrowej

Abstract. A proposal of the observer system for wind turbine control scheme with the induction generator is presented in this paper. The control system of the turbine should ensure maximum captured electrical power for wind speed in the region between start speed of turbine and cut-off speed, when wind turbine is shutdown due to safety reasons, i.e. in a second operating region of the turbine. In order to obtain maximum efficiency of the energy conversion, the control system is proposed, which enables the wind turbine to reach fast new operating point, following fast variables of the wind speed. Simulations results of the control system with the state observer are shown in the paper (**State Variables Estimation in the Control Scheme for Wind Turbine with Induction Generator**)

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa, generator indukcyjny, obserwator zmiennych stanu, układ regulacji, maksimum mocy

Keywords: wind turbine, induction generator, state variables observer, control system, maximum electrical power

Wstęp

Dążenie do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych (dwutlenku węgla) do atmosfery oraz wyczerpywanie się tradycyjnych źródeł energii, głównie kopalni, powoduje coraz większe zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii (OZE), w tym elektrowniami wiatrowymi. W związku z krótkim czasem projektowania i budowy (od roku, do dwóch lat), elektrownie (farmy) wiatrowe mogą stać się bardzo atrakcyjnym źródłem energii elektrycznej dla KSE, które w niedługim czasie może znacząco uzupełnić rosnące zapotrzebowanie na energię [1]. Wprowadzone ostatnio w polskim prawodawstwie zmiany dotyczące OZE (Ustawa z dnia 20 lutego 2015r. o odnawialnych źródłach energii), pomimo problemów z ich wprowadzeniem, w sposób znaczący powinny wpłynąć na rozwój elektrowni wiatrowych w kraju [2].

Współcześnie budowane elektrownie wiatrowe to jednostki w większości posiadające poziomą oś obrotu i trójpłatową turbinę (koło wiatrowe). Moc zainstalowanych w nich generatorów sięga kilku MW. Stosowanie szybkoobrotowych generatorów przy prędkościach koła wiatrowego nie większych niż kilkadziesiąt obrotów na minutę wymusza instalowanie przekładni mechanicznej. Jako generatory w elektrowniach wiatrowych stosowane są maszyny asynchroniczne klatkowe (IG) i pierścieniowe (DFM) oraz maszyny synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSG) wraz z przekształtnikami energoelektronicznymi i układami sterowania. W przypadku zastosowania generatorów asynchronicznych pierścieniowych moc przekształtnika włączonego w obwód wirnika stanowi tylko ok. 30% mocy całego generatora. Generatory klatkowe oraz synchroniczne wymagają podłączenia do sieci poprzez przekształtnik obliczony na pełną moc generatora. W przypadku maszyny asynchronicznej niezbędna dla pracy generatora moc bierna dostarczana jest z sieci przez przekształtnik [1].

Układy sterowania turbiną wiatrową

Podstawowym celem funkcjonowania elektrowni (farmy) wiatrowej jest uzyskanie wysokiej sprawności konwersji energii niesionej z wiatrem w energię elektryczną. Energia wiatru jest przejmowana przez łopaty wirnika turbiny, a następnie przekształcana w energię mechaniczną. Energia mechaniczna przekazywana jest poprzez wał

wirnika do generatora, który wytwarza energię elektryczną, przekazywaną następnie, poprzez przekształtnik energoelektroniczny, do sieci lub do odbiorców lokalnych. W tym złożonym procesie przetwarzania energii wykorzystywane są zjawiska aerodynamiczne, mechaniczne i elektromechaniczne wraz z przekształcaniem parametrów energii w układzie energoelektronicznym. Skale czasowe wszystkich tych zjawisk różnią się znacząco, co wywiera silny wpływ na sposób podejścia do metod sterowania całym układem elektrowni wiatrowej, a w efekcie na sprawność konwersji energii.

We współczesnych turbinach wiatrowych wykorzystuje się wielopoziomowe układy sterowania, które odpowiadają za cały proces konwersji energii oraz zapewniają warunki bezpieczeństwa pracy turbiny. Nadzędne układy sterowania zarządzają startem i wyłączeniem turbiny, monitorują bieżące warunki pracy turbiny oraz rejestrują parametry elektryczne i mechaniczne (także w długich przedziałach czasowych).

Układy sterowania turbiną w sposób bezpośredni zarządzają sprawnością konwersji energii poprzez regulację wartości zmiennych, takich jak: moment na wale i prędkość generatora, wartość mocy czynnej i biernej. Niezależne regulatory sterują pracą przekształtnika energii, którego podstawową funkcją jest zapewnienie odpowiednich parametrów jakościowych tej energii, przekazywanej następnie do sieci elektroenergetycznej.

W obecnie budowanych turbinach wiatrowych stosuje się kilka sposobów regulacji prędkości obrotowej wirnika, a co za tym idzie, mocy generatora. W dużych jednostkach stosuje się regulację kąta natarcia łopat (pitch control). Zmiana kąta natarcia powoduje zmianę siły nośnej powstającej na płatach wirnika. W małych i średnich jednostkach stosuje się głównie pasywną regulację przez przeciąganie (passive stall control). Ograniczanie prędkości obrotowej przy prędkości wiatru powyżej wartości znamionowej odbywa się w tym przypadku poprzez wykorzystanie efektu przeciągania (oderwania laminarnej strugi powietrza) na krawędzi spływu łopat wirnika [5].

Rozróżnia się cztery obszary (strefy) pracy turbiny wiatrowej w zależności od aktualnej prędkości wiatru. Pierwszą strefą pracy jest start turbiny przy minimalnej prędkości wiatru. W drugiej strefie pracy, pomiędzy prędkością startu, a prędkością maksymalną dopuszczalną

ze względu na warunki bezpieczeństwa, układ regulacji ma za zadanie sterowanie prędkością wału w sposób zapewniający maksymalną wartość możliwej do uzyskania energii. Szacuje się, że ponad 50% rocznej energii uzyskanej z turbiny, powstaje w warunkach wiatrowych obejmujących drugą strefę pracy. W trzeciej i czwartej strefie pracy, powyżej wartości znamionowej prędkości wału, prędkość wiatru znacznie przewyższa wytrzymałość turbiny. W związku z tym układ regulacji utrzymuje stałą (największą dopuszczalną) prędkość obrotową i ogranicza wartość mocy wyjściowej. W związku z tym, sprawność konwersji energii w tej strefie pracy jest daleka od wartości optymalnej [6].

Model normalnego profilu wiatru (NWP)

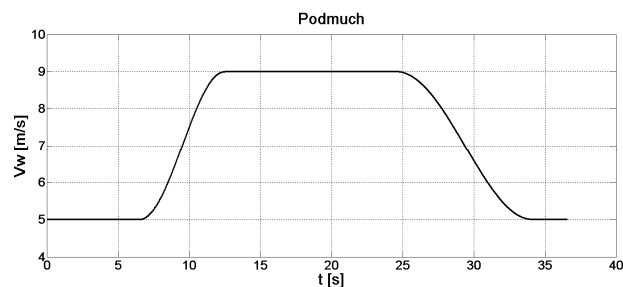
Dla celów projektowych opracowano akty normatywne dotyczące obciążeń i bezpieczeństwa podczas pracy elektrowni wiatrowych. Znormalizowane warunki wiatrowe dotyczące małych turbozespołów wiatrowych (SWT – Small Wind Turbine) przedstawiono w pracach [2] i [3] na podstawie normy PN-EN 61400-2 [4]. Warunki pracy turbin wiatrowych dzieli się na warunki wiatrowe normalne, które występują często podczas normalnej pracy turbozespołu oraz warunki definiowane jako ekstremalne.

Profil prędkości wiatru, $V(z)$, opisuje przebieg średniej prędkości wiatru w funkcji wysokości z , nad poziomem terenu. W przypadku turbozespołu klas standardowych należy przyjąć normalny profil prędkości wiatru przedstawiony za pomocą funkcji potęgowej, znanej z teorii wiatru jako wzór Hellmana-Suttona (często odnoszony do wysokości 10m, na której umieszczane są standardowo wiatromierze w stacjach pogody) [5]:

$$(1) \quad V(z) = V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha,$$

gdzie: V_{hub} – prędkość wiatru na wysokości gondoli turbiny,
 z_{hub} – wysokość zawieszenia gondoli turbiny.

Do obliczeń przyjmuje się, że wartość wykładnika funkcji potęgowej, α wynosi 0,2. Przyjęty profil stosuje się do wyznaczenia średniego pionowego gradientu prędkości wiatru, który zależy w głównej mierze od szorstkości podłoża oraz stanu równowagi pionowej powietrza [5].



Rys. 1. Przebieg podmuchu: $V_{amp} = 4.0m/s$, $T_{gust} = 13s$, $T_{ris} = 5s$, $T_{fall} = 8s$

Do normalnych warunków wiatrowych zalicza się także podmuch wiatru, który charakteryzuje się krótkotrwałą zmianą prędkości o pewną amplitudę V_{amp} , z czasem trwania T_{gust} , czasem narastania T_{ris} , oraz czasem opadania T_{fall} . Na rysunku 1 pokazano przykładowy przebieg podmuchu.

Model normalnej turbulencji (NTM)

Model turbulencji normalnej powinien uwzględnić gradient prędkości wiatru opisany powyżej. Wyrażenie „turbulencja wiatru” oznacza przypadkową zmienność prędkości średniej 10 minutowej. Model turbulencji powinien

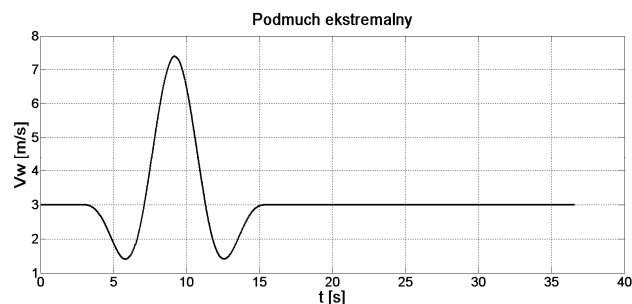
zawierać opis zmienności w czasie prędkości i kierunku wiatru oraz efekty wynikające z próbkowania obrotowego. W przypadku standardowych klas SWT wartość charakterystyczna odchylenia standardowego składowej wzdłużnej prędkości wiatru powinna wyrażać się wzorem:

$$(2) \quad \sigma_1 = I_{15} (15 + aV_{hub}) / (a + I).$$

Przyjmuje się wartości: $I_{15} = 0.18$, $a = 2$ [2].

Ekstremalne warunki wiatrowe (EWC)

Warunki te uwzględniają maksymalne, burzowe prędkości wiatru oraz gwałtowne zmiany jego prędkości i kierunku.



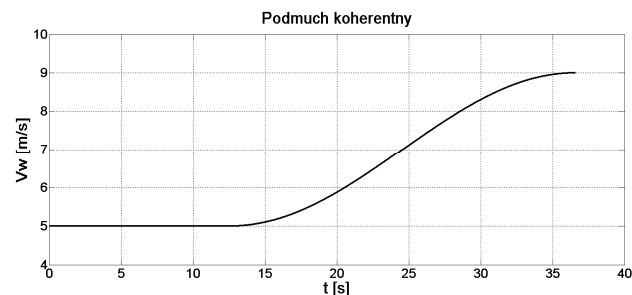
Rys. 2. Przebieg podmuchu ekstremalnego: $V_{amp} = 4.5m/s$,

Ekstremalny podmuch (EOG)

Podmuch ekstremalny charakteryzuje się prędkością podmuchu V_{amp} . Na rysunku 2 pokazano przykładowy przebieg podmuchu ekstremalnego.

Ekstremalny podmuch koherentny (ECG)

Ekstremalny podmuch koherentny charakteryzuje się prędkością podmuchu V_{amp} oraz czasem narastania T_{ris} . Na rysunku 3 pokazano przykładowy przebieg podmuchu koherentnego.



Rys. 3. Przebieg podmuchu koherentnego: $V_{amp} = 4.0m/s$, $T_{ris} = 20s$

Układ sterowania prędkością turbiny wiatrowej z odtwarzaniem zmiennych stanu

Przy konstruowaniu układów sterowania prędkością obrotową należy pamiętać, że jej dynamika zasadniczo zależy od momentu bezwładności wirnika turbiny. Duży moment bezwładności wirnika w porównaniu z momentem bezwładności generatora w sposób naturalny zmniejsza dynamikę zmian prędkości obrotowej, co powoduje nienadążanie turbiny za zmianami prędkości wiatru. Efektem powolnej dynamiki wirnika są znaczące straty energii podczas szybkich zmian prędkości wiatru. W proponowanym rozwiązaniu wykorzystano opisaną w pracy [6] metodę polepszającą dynamikę turbiny poprzez wspomaganie rozpędzania i hamowania wirnika dodatkowym sterowaniem momentem generatora w szybkich stanach przejściowych. Zastosowano dodatkową pętlę sprzężenia zwrotnego włączaną tylko w stanach

prześciowych, przy szybkich zmianach prędkości wiatru. Moment generatora jest regulowany za pomocą przekształtnika energoelektronicznego. W celu odtwarzania niemierzalnego momentu aerodynamicznego oddziałującego na łopaty wirnika użyto zmodyfikowanego obserwatora zmiennych stanu ze zwiększoną dynamiką. Tego typu struktura układu regulacji powinna zapewnić osiągnięcie dużej sprawności konwersji energii w stanach ustalonych i prześciowych [6].

Na rysunku 1 pokazano proponowaną strukturę regulatora prędkości wirnika turbiny wiatrowej, natomiast na rysunku 2 strukturę zmodyfikowanego obserwatora momentu.

Przy założeniu, że koło wiatrowe ustawione jest prostopadle do kierunku wiatru, moc mechaniczna wytwarzana przez turbinę jest równa [1]:

$$(3) \quad P_T = C_p(\lambda) \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{\omega_T R_T}{\lambda} \right)^3,$$

gdzie: ρ - gęstość powietrza, A - pole powierzchni koła wiatrowego, ω_T - prędkość kątowna wirnika turbiny, R_T - promień wirnika turbiny, $C_p(\lambda)$ - współczynnik wykorzystania energii wiatru, przy czym wyróżnik szybkobieżności:

$$(4) \quad \lambda = \frac{\omega_T R_T}{V_w},$$

gdzie: V_w - prędkość wiatru na wysokości gondoli turbiny. W związku z powyższym, moment aerodynamiczny na wale turbiny wyraża się zależnością:

$$(5) \quad T_T = C_p(\lambda) \frac{1}{2} \rho I R^5 \frac{\omega_T^2}{\lambda^3}.$$

Z równania (5) otrzymuje się:

$$(6) \quad \omega_T = k_T \sqrt{T_T},$$

gdzie:

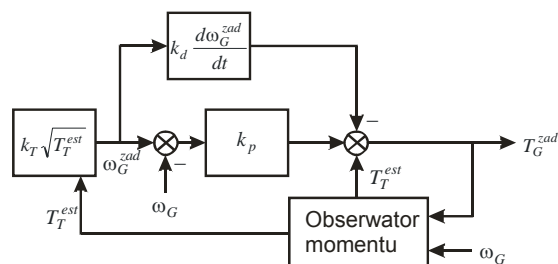
$$(7) \quad k_T = \sqrt{\frac{2\lambda^3}{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot I \cdot R^5}}.$$

Wartość współczynnika k_T jest uzależniona od parametrów konstrukcyjnych turbiny wiatrowej oraz od gęstości powietrza.

Strukturę układu regulacji prędkości pokazano na rysunku 4. W proponowanym rozwiązaniu układu sterowania [6] zadana wartość prędkości wirnika jest obliczana z równania (6) jako nieliniowa funkcja odtwarzanego momentu wirnika. Wartość prędkości zadanej jest porównywana z wartością mierzoną, a błąd regulacji jest podawany na wejście regulatora proporcjonalnego. W układzie regulacji dodano pętlę predykcyjną z odtwarzaną wartością momentu wirnika. Dzięki temu regulator szybciej kompensuje efekty zmienności wiatru pojawiające się w układzie. W tym samym czasie obliczana jest pochodna prędkości wirnika i odejmowana od momentu zadanego. Pętla sprzężenia zwrotnego działa tylko w stanach prześciowych, przy szybkich zmianach prędkości wiatru, wspomagając rozpędzanie bądź hamowanie wirnika. Ostatecznie zadany moment generatora jest złożony z trzech składników, które tworzą układ sprzężenia zwrotnego i predykcji. Taka struktura, opisana zależnością (8) zapewnia dużą

efektywność konwersji energii w stanach ustalonych i prześciowych.

$$(8) \quad T_G^{zad} = k_p (\omega_G - \omega_G^{zad}) + T_T^{est} - k_d \frac{d\omega_G^{zad}}{dt}$$

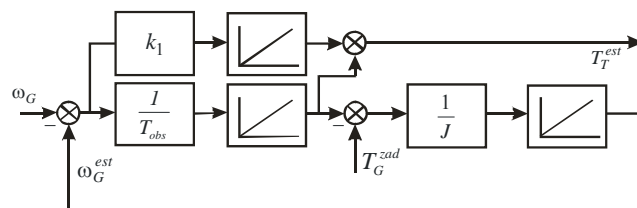


Rys. 4. Struktura regulatora prędkości wirnika turbiny [6]

Moment aerodynamiczny działający bezpośrednio na łopaty wirnika turbiny jest wielkością, której nie można mierzyć bezpośrednio, dlatego proponuje się jego odtwarzanie w obserwatorze [6]. W celu osiągnięcia dużej dynamiki w obserwatorze wprowadzono dodatkowe wzmocnienie k_1 . Strukturę obserwatora opisanego równaniami (9-10) pokazano na rysunku 5:

$$(9) \quad \frac{d\omega_G^{est}}{dt} = \frac{1}{J} (T_T^{est} - T_G^{zad}) + k_1 (\omega_G - \omega_G^{est}),$$

$$(10) \quad \frac{dT_T^{est}}{dt} = \frac{1}{T_{obs}} (\omega_G - \omega_G^{est}).$$



Rys. 5. Struktura obserwatora momentu wirnika turbiny

Wyniki badań symulacyjnych

W badaniach symulacyjnych użyto parametrów rzeczywistej turbiny wiatrowej:

- moment bezwładności turbiny z generatorem $J = 55 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,
- promień koła wiatrowego $R = 2,59 \text{ m}$.

Gęstość powietrza przyjęto równą $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

Wartości współczynników układu regulacji i obserwatora pokazano w tabeli 1.

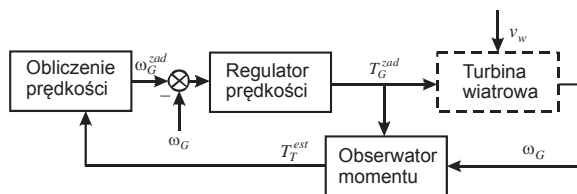
Tabela 1. Wartości współczynników układu regulacji i obserwatora

k_p	k_d	T_{reg}	T_{obs}	k_1
100	40	50 ms	1 ms	15

Wartości współczynników dobrano doświadczalnie, w celu zapewnienia odpowiedniej dynamiki układu oraz stabilności obserwatora w stanach prześciowych.

Struktura układu wykorzystana do badań symulacyjnych jest złożona z regulatora prędkości generatora ω_G oraz modelu turbiny wiatrowej WT. Moment na wale jest regulowany bezpośrednio przez przekształtnik energo-

elektroniczny przedstawiony dla uproszczenia jako element inercyjny pierwszego rzędu opisany równaniem (11). Uproszczony układ regulacji turbiny wiatrowej z obserwatorem momentu pokazano na rysunku 6.



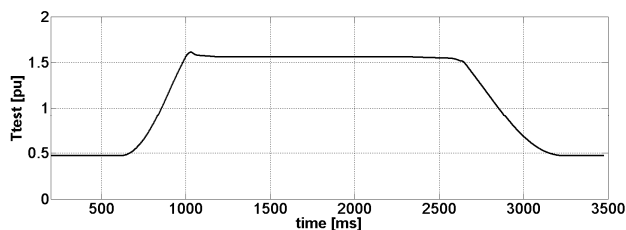
Rys. 6. Schemat układu regulacji turbiny wiatrowej z obserwatorem momentu [6]

Model składa się z równania ruchu pierwszego rzędu (12) oraz nieliniowości statycznej opisanej równaniem (13), gdzie zależność współczynnika wykorzystania energii wiatru od wyróżnika szybkobieżności $C_p = C_p(\lambda)$, jest funkcją nieliniową aproksymowaną dwoma wielomianami 5 rzędu [5]:

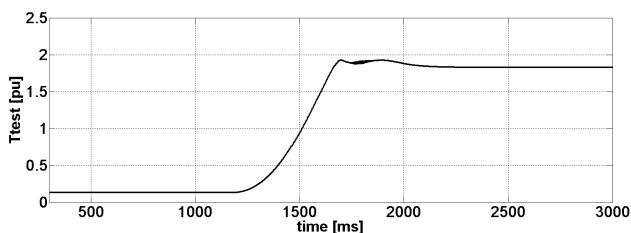
$$(11) \quad \frac{dT_G}{dt} = \frac{1}{T_{reg}} (T_G^{zad} - T_G),$$

$$(12) \quad \frac{d\omega_G}{dt} = \frac{1}{J} (T_T - T_G),$$

$$(13) \quad T_T = C_p(\lambda) \frac{1}{2} \rho I R_T^2 \cdot \frac{v_w^3}{\omega_T}.$$



Rys. 7. Przebieg odtwarzanego momentu turbiny dla warunków poddmuchu



Rys. 8. Przebieg odtwarzanego momentu turbiny dla warunków poddmuchu koherentnego

Symulacje wykonano dla warunków wiatrowych opisanych w PN-EN 61400-2 [3, 4, 7, 8]. Przyjęto, że wirnik turbiny jest ustawiony zgodnie z kierunkiem wiatru (wpływ niedokładnego określenia kierunku wiatru nie jest przedmiotem niniejszych rozważań).

Na rysunku 7 pokazano przebieg odtwarzanego momentu turbiny wiatrowej dla warunków poddmuchu. Start poddmuchu następował przy wartości prędkości wiatru na wysokości gondoli turbiny równej 5 m/s, z amplitudą 4 m/s. Na rysunku 8 pokazano przebieg odtwarzanego momentu turbiny wiatrowej dla warunków poddmuchu koherentnego. Start poddmuchu następował przy wartości prędkości wiatru na wysokości gondoli równej 6 m/s, z amplitudą 5 m/s.

Wnioski

W artykule pokazano wyniki badań symulacyjnych układu regulacji turbiny wiatrowej z odtwarzaniem momentu w obserwatorze. W celu odtwarzania niemierzalnego momentu aerodynamicznego oddziałującego na łopaty wirnika użyto zmodyfikowanego obserwatora zmiennych stanu ze zwiększoną dynamiką. Wykorzystano opisaną w pracy [6] metodę polepszającą dynamikę turbiny poprzez wspomaganie rozpędzania i hamowania wirnika dodatkowym sterowaniem momentem generatora w szybkich stanach przejściowych. Dodatkowa pętla sprzężenia zwrotnego włączana tylko w stanach przejściowych, przy szybkich zmianach prędkości wiatru, powinna zapewnić osiągnięcie dużej sprawności konwersji energii. Badania symulacyjne wykonano dla warunków wiatrowych określonych w aktach normatywnych dotyczących małych elektrowni wiatrowych.

Autorzy:

dr inż. Andrzej Jąderko, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: aj@el.pcz.czest.pl
 dr inż. Marek Gała, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: m.gala@el.pcz.czest.pl

LITERATURA

- [1] Lubośny Z., Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym, (2013), WNT, Warszawa
- [2] Ustawa z dnia 20 lutego 2015r. o odnawialnych źródłach energii, Dz. U. RP poz. 478
- [3] Jąderko A., Kowalewski M. K., Metody wyznaczania energii wiatru, *Przegląd Naukowo-Metodyczny Edukacja dla Bezpieczeństwa*, rok VII, (2014), nr 3, Wyższa Szkoła Bezpieczeństwa - Poznań, 438-463, ISSN 1899-3524
- [4] Jąderko A., Kowalewski M. K., Wyznaczanie parametrów wiatru w energetyce odnawialnej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 1, 148-151
- [5] Jąderko A., Badania symulacyjne układu sterowania turbiną wiatrową z generatorem indukcyjnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 12, 110-113
- [6] Krzemiński Z., Kulesza K., Advance Control Schema for Variable Speed Wind Turbine, *Proceedings of the 18th International Conference on Electrical Machines ICM 2008*, (2008), 1-6
- [7] PN-EN 61400-2: *Turbozespoły wiatrowe. Część 2: Wymagania projektowe dotyczące małych turbozespołów wiatrowych*, PKN 2008
- [8] Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, *Guideline for the Certification of Wind Turbines*, (2010), Hamburg – Germany