

Krótkoterminowa optymalizacja harmonogramu prac eksploatacyjnych w farmach wiatrowych

Streszczenie. W referacie przedstawiono zadanie krótkoterminowej optymalizacji harmonogramowania prac eksploatacyjnych, które wiążą się z wyłączaniem poszczególnych turbozespołów wiatrowych. Zaproponowano heurystyczny algorytm rozwiązujący zadanie optymalizacyjne, który z dużym prawdopodobieństwem i krótkim czasie obliczeń zwraca optymalny wynik. Opracowany model i algorytm jego rozwiązania zaimplementowano i przetestowano na danych rzeczywistych w rozwijanym systemie informatycznym „4RES”.

Abstract. The paper deals with an optimization task concerning short-term maintenance work scheduling. The considered maintenance works result in outages of wind turbines. A heuristic algorithm for solving the optimization problem has been proposed. The presented algorithm returns with high probability an optimal result in short computation time. The developed optimization model and algorithm has been implemented and tested in the computer system „4RES” based on real data (**Short-term optimization of maintenance work schedule at wind farms**).

Słowa kluczowe: prace eksploatacyjne, optymalizacja, farma wiatrowa, heurystyka.

Keywords: maintenance work, optimization, wind farm, heuristics.

doi:10.12915/pe.2014.09.35

Wstęp

Turbozespoły wiatrowe stanowią jedną z najbardziej rozpowszechnionych i dynamicznie rozwijających się technologii odnawialnych źródeł energii (OZE) na świecie. Prowadzona w dalszym ciągu przez Unię Europejską polityka promująca wytwarzanie energii w OZE [1], spowodowała, że w Polsce konieczne stało się przyjęcie rozwiązań prawnych mających zachęcić do inwestowania w tego typu energetykę i tym samym spełnić założone przez Unię Europejską cele. Aktualnie obowiązującym aktem prawnym regulującym kwestię OZE jest Prawo Energetyczne [2], przy czym w resorcie gospodarki trwają aktualnie prace nad nową ustawą o OZE w ramach tzw. "trójpaku energetycznego".

Farmę wiatrową można w uproszczeniu rozumieć jako strukturę $\langle O, G \rangle$, gdzie O jest zbiorem obiektów elektroenergetycznych i przypisanych do nich węzłów wraz z lokalizacją przestrzenną, G jest grafem reprezentującym fizyczne połączenia poszczególnych obiektów (zbiór węzłów V i łuków E).

Eksploatację obiektu elektroenergetycznego (elementu) opisuje się jako proces stochastyczny $\{X_t : t \in T \wedge X_t : \Omega \rightarrow S\}$, gdzie T jest czasem życia obiektu (czas ciągły), Ω jest przestrzenią zdarzeń towarzyszących procesowi eksploatacji elementu oraz S jest skończonym zbiorem stanów eksploatacyjnych obiektu. Wyróżnia się stany związane z funkcjonowaniem elementu (pełnego lub częściowego) jego rezerwą oraz niefunkcjonowaniem (remonty awaryjne, remonty planowe, itd.). Przejścia pomiędzy stanami obiektu mogą być powodowane przez zdarzenia losowe (awarie i naprawy), zdarzenia deterministyczne (odstawienie obiektu do remontu profilaktycznego lub przeglądu w ustalonym czasie) oraz zdarzenia losowo-deterministyczne (warunkowa realizacja planowego remontu obiektu).

Wg zaleceń Europejskiej Oceny Ekspertycznej, w ramach głównych czynności eksploatacyjnych (przeglądy, inspekcje, czynności konserwacyjne) dotyczących farm wiatrowych dokonuje się m.in.: oceny stanu łopaty wirnika, masztu i fundamentów, współosiowości generatora z przekładnią, urządzeń i komponentów elektronicznych, wymianę oleju w przekładniach i układzie hydraulicznym, przeglądy i konserwację wind i wciągarek, wymianę łożysk w generatorach, przekładniach i wiele innych czynności [3].

Istotnym elementem farmy wiatrowej jest także infrastruktura sieciowa (transformatory SN/nn, linie kablowe SN, czy stacje GPZ z rozdzielnicami 110 kV i SN oraz

transformatorem 110 kV/SN) mająca za zadanie wyprowadzenie generowanej mocy do sieci OSD lub OSP. Tego typu elementy także podlegają okresowym badaniom eksploatacyjnym [4].

Wyniki przeprowadzanych badań stanowią przesłankę do decyzji o ewentualnych czynnościach remontowych lub naprawczych poszczególnych urządzeń farmy wiatrowej.

Jednym ze wskaźników jakości prowadzenia eksploatacji farmy wiatrowej powinien być całkowity koszt prowadzenia eksploatacji, włączając w to utracony przychód ze sprzedaży energii, wynikający z wyłączeń turbozespołów wiatrowych. Zatem, proces eksploatacji powinien dążyć do minimum kosztu przy stosownych ograniczeniach technicznych i administracyjno-prawnych.

Przeważająca większość publikacji dotyczących optymalnego harmonogramowania prac eksploatacyjnych w farmach wiatrowych dotyczy perspektywy długoterminowej, w której szacuje się prawdopodobieństwo czasu do uszkodzenia poszczególnych elementów farmy wiatrowej na podstawie modeli niezawodnościowych oraz wyników badań diagnostycznych [5, 6, 7]. Problematyka planowania remontów, wymagających wyłączeń elektrowni wiatrowych w horyzoncie krótkoterminowym (dostępne są prognozy prędkości i kierunku wiatru) jest poruszana w niewielu publikacjach i w dodatku nie wprost [8, 9].

Zarówno interesująca tematyka, jak również brak dużej liczby stosownych publikacji skłoniły autorów referatu do rozpoczęcia badań naukowych i rynkowych w tym zakresie.

Optymalne harmonogramowanie prac

Niech będzie dana funkcja $f: O \rightarrow TS$ przypisująca każdemu obiektowi infrastruktury farmy wiatrowej $o \in O$, reprezentowanego przez odpowiedni węzeł v w skierowanym grafie G , liście (węzły końcowe) grafu G połączone jednokierunkowo z v , które reprezentują turbozespoły $ts \in TS \subset O$.

Innymi słowy, funkcja f przypisuje każdemu obiektowi pełniącemu rolę urządzenia pośredniczącego w dystrybucji energii (np. segment linii kablowej SN, transformator SN/nn, wyłącznik w rozdzielnicy WN), od źródeł do punktu przyłączenia z siecią zewnętrzną, zbiór turbozespołów wiatrowych, z których zasilany jest ten obiekt. Oczywiście, obiektem tym może być turbozespół wiatrowy, natomiast wartością funkcji f będzie ten sam turbozespół.

Dany jest także zbiór niezbędnych do wykonania prac $w \in W$. Każda praca jest opisana następującą strukturą:

$$(1) \quad w = \langle o, TS_o, t_{p,start}, t_{p,stop}, \Delta t \rangle$$

gdzie o jest obiektem elektroenergetycznym poddawany pracy, $TS_o = f(o)$ jest zbiorem turbozespołów wymagających wyłączenia w celu wykonania danej pracy, $t_{p,start}$ jest początkiem przedziału planowania pracy, $t_{p,stop}$ jest końcem przedziału planowania pracy oraz Δt jest planowanym czasem pracy.

Niech będzie dana funkcja $g: TS^h \rightarrow \mathbb{R}_+^h$ prognozująca w horyzoncie h produkcję energii elektrycznej w czynnych (niewyłączonych w wyniku prac) turbozespołach wiatrowych, tj.:

$$(2) \quad \hat{A}_{n,n+1,\dots,n+h-1} = g_{n,n+1,\dots,n+h-1}(ATS_{n,n+1,\dots,n+h-1})$$

gdzie: $ATS_{n,n+1,\dots,n+h-1}$ jest ciągiem zbiorów niewyłączonych turbozespołów w godzinach $n, n+1, \dots, n+h-1$.

Realny horyzont prognozy h wynosi 1 tydzień (168 h) ze względu na niską dokładność prognoz prędkości i kierunku wiatru pochodzących z numerycznych modeli pogodowych [10].

Zadanie optymalizacyjne postawiono w następujący sposób:

$$(3) \quad g_{n,n+1,\dots,n+h-1}(ATS_{n,n+1,\dots,n+h-1}^*) = \max \left\{ g_{n,n+1,\dots,n+h-1} \left(\begin{array}{l} ATS_{n,n+1,\dots,n+h-1} \\ ATS_{n,n+1,\dots,n+h-1} \in TS^h \end{array} \right) \right\}$$

Zmienna $ATS_{n,n+1,\dots,n+h-1}$ jako ciąg zbiorów niewyłączonych turbozespołów jest w istocie zmienną decyzyjną zadania. Ograniczenie zmiennej decyzyjnej sprowadza się do spełnienia niezbędnych do wykonania prac $w \in W$.

W celu rozwiązania przedstawionego zadania optymalizacyjnego, zaproponowano intuicyjny algorytm oparty na podejściu heurystycznym, niebędący tym samym przeglądem zupełnym przestrzeni rozwiązań. Poniżej przedstawiono uproszczony opis algorytmu.

1. Utwórz podzbiór prac, z tych $w \in W$, których zakres czasowy pracy (od $t_{p,start}$ do $t_{p,stop}$) ma część wspólną z okresem aktualnej prognozy produkcji (od n do $n+h-1$)
2. Dla każdego z rozważanych zbiorów prac:
 - 2.1. Określ zbiór wyłączanych turbozespołów w każdej pracy
 - 2.2. Dla każdego terminu pracy o długości Δt z przedziału stanowiącego część wspólną (od $t_{p,start}$ do $t_{p,stop}$ oraz od n do $n+h-1$):
 - 2.2.1 Oblicz za pomocą funkcji g niewyprodukowaną energię uwzględniając pracujące turbozespoły
 - 2.3. Utwórz ciąg prac wg posortowanych wyników niewyprodukowanej energii od największej wartości do najmniejszej
3. Dla każdego z utworzonych ciągów prac:
 - 3.1. Dla każdego terminu pracy o długości Δt z przedziału stanowiącego część wspólną (od $t_{p,start}$ do $t_{p,stop}$ oraz od n do $n+h-1$):
 - 3.1.1 Oblicz za pomocą funkcji g niewyprodukowaną energię uwzględniając pracujące turbozespoły
 - 3.1.2. Dla okresu, w którym niewyprodukowana energia jest minimalna, wyznacz jeszcze raz prognozę uwzględniając wyłączone turbiny podczas tej pracy.

Wynikiem działania algorytmu jest zbiór okresów dla których wyłączenia turbin w ramach poszczególnych prac dają minimum niewyprodukowanej energii. Istotną kwestią w prezentowanym algorytmie jest wstępne "ważenie" prac w związku z liczbą wyłączeń oraz bieżące korygowanie prognoz uwzględniając wyłączenia.

Naturalnym przykładem jest sytuacja, kiedy w tym samym miesiącu jest planowany przegląd transformatora w stacji GPZ i jednego z turbozespołów. Ponieważ z pierwszą z prac wiąże się wyłączenie wszystkich elektrowni wiatrowych, to jeśli jest ona dokonywana w optymalnym dla niej okresie, to "przy okazji" drugą pracę można wykonać w tym samym czasie.

Implementacja modelu i algorytmu optymalizacyjnego w aplikacji „4RES”

System informatyczny 4RES jest rozwijany od roku 2012 w jednostce badawczo-rozwojowej Globema Sp. z o.o. w ramach projektu badawczego NCBiR. System jest przeznaczony do wspomagania aktywnego udziału w rynku energii elektrycznej tych podmiotów, które zarządzają od strony handlowej oraz technicznej odnawialnymi oraz konwencjonalnymi jednostkami generacji rozproszonej. 4RES pozwala na wykonywanie prognoz produkcji w oparciu o różnego rodzaju dane wejściowe, a także różnego rodzaju obliczenia optymalizacyjne. Na ich podstawie można opracowywać harmonogramy produkcji energii oraz zdarzeń eksploatacyjnych.

System „4RES” składa się z trzech niezależnych aplikacji (klienckiej, serwerowej i mobilnej), które współpracują z bazą danych.

Jeden z modułów systemu „4RES” odpowiada za zarządzanie pracami eksploatacyjnymi na terenie farm wiatrowych. Istotną część modułu stanowi optymalne harmonogramowanie prac, przy osiągnięciu minimum utraconych przychodów wynikających z niezbędnych wyłączeń elementów farmy. Dodatkową funkcjonalność modułu stanowi bieżące monitorowanie i ewidencja planowanych i realizowanych prac.

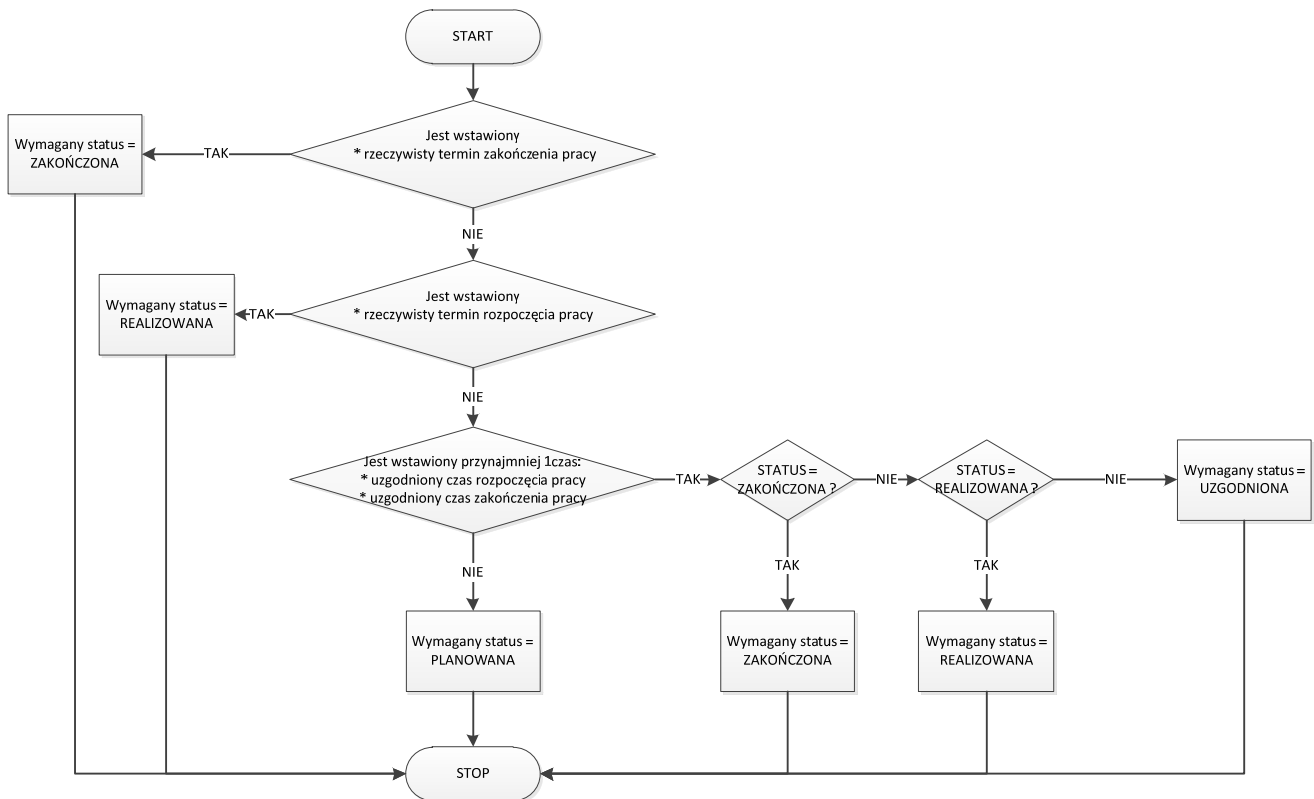
Tabela 1. Atrybuty klasy *praca*

Nazwa atrybutu	Uwagi
Id	nadawane automatycznie
Status	obiekt z listy
Obiekt na którym wykonywana jest praca	obiekt z listy
Czy praca jest związana z wyłączeniem?	tak/nie
Nieprzekraczalny termin zakończenia pracy	data z kalendarza i godzina
Cykl prac okresowych	obiekt z listy
Planowany czas pracy	liczba naturalna w określonych jednostkach (godzina, doba)
Początek przedziału planowania pracy	data z kalendarza i godzina
Koniec przedziału planowania pracy	data z kalendarza i godzina
Wykonawca pracy	obiekt z listy
Uzgodniony czas rozpoczęcia pracy	data z kalendarza i godzina
Uzgodniony czas zakończenia pracy	data z kalendarza i godzina
Rzeczywisty czas rozpoczęcia pracy	data z kalendarza i godzina
Rzeczywisty czas zakończenia pracy	data z kalendarza i godzina

Podstawową klasą obiektów w module optymalizacji wyłączeń systemu „4RES” jest klasa obiektów *praca*. Klasa ta jest utworzona w oparciu o strukturę (2) z dodatkowymi atrybutami i funkcjami (tabela 1).

Oprócz prac o charakterze jednorazowym, istnieją jeszcze prace cykliczne, z ustaloną przez normy lub wytyczne producentów urządzeń częstością. W systemie „4RES”, klasą agregującą dla klasy *praca* jest klasa *cykl_pracy*, w której głównymi atrybutami są „częstość prac okresowych”, „dopuszczalny margines odchylenia terminów poszczególnych prac od planowanego cyklu”, „liczba prac w

cyklu”, „data początku i końca cyklu” (wyklucza się z liczbą prac) oraz „spodziewany czas realizacji pracy”. Wstawienie obiektu *cykl_pracy* skutkuje wygenerowaniem określonej liczby obiektów klasy *praca* z przypisanymi częściowo atrybutami (klonowanymi z grupującego obiektu *cykl_pracy*).



Rys. 1. Schemat przejścia statusów prac.

W module zarządzania pracami eksploatacyjnymi, przewidziano następujące statusy prac:

- "planowana",
- "uzgodniona",
- "realizowana",
- "zakończona".

Przejścia poszczególnych statusów zależą przede wszystkim od uzupełnienia dat w poszczególnych polach obiektu. Zależność ilustruje rys. 1.

Terminy, będące wynikiem optymalizacji harmonogramu prac są podpowiadane prowadzącemu eksploatację przez system. Terminy te mogą być uzgadniane z potencjalnym wykonawcą prac lub odrzucane. W przypadku odrzucenia optymalnego terminu, system wyznacza kolejny optymalny termin z wyłączeniem terminu odrzuconego.

Uwzględnia się dodatkowo (nie wprost) status pracy "po terminie", który jest aktywny, gdy zostanie przekroczona wartość dla atrybutu "Nieprzekraczalny termin zakończenia pracy".

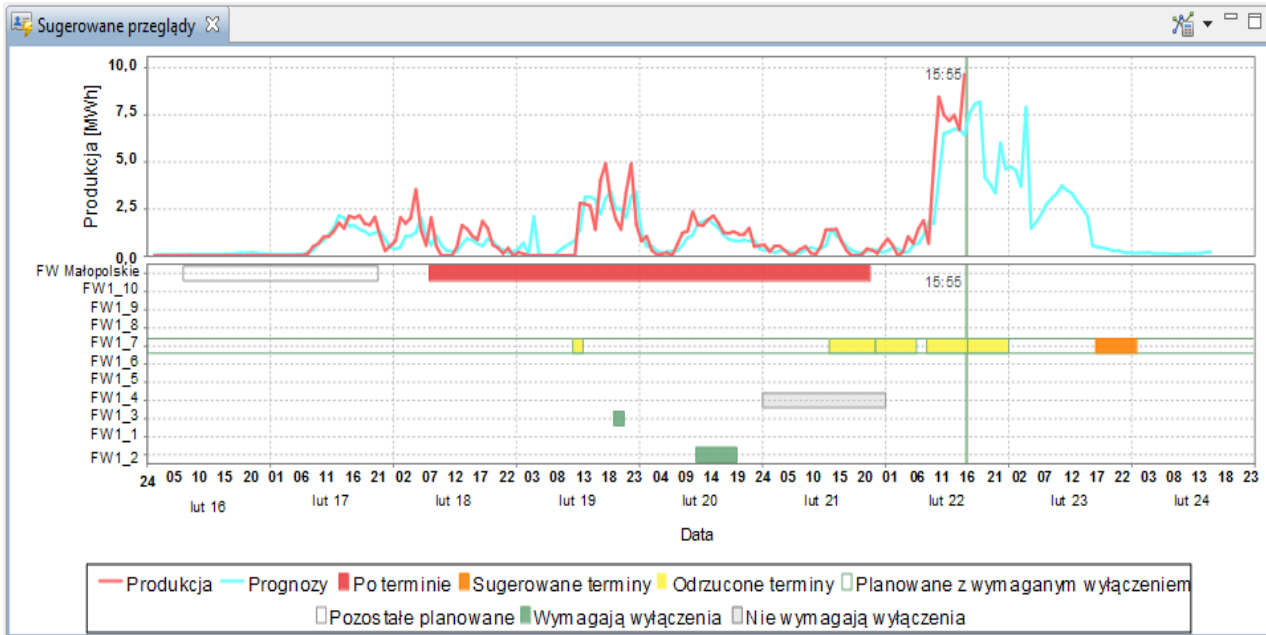
Dodatkowe możliwości systemu „4RES” w zakresie zarządzania pracami eksploatacyjnymi to:

- wyświetlanie filtrowanej po statusie listy prac z poziomu obiektu
- prezentacje informacji o pracach i ich statusie na mapie
- przypomnienia i alarmy informujące o elastycznie definiowanych przez użytkownika zdarzeniach

- wizualizacja harmonogramu prac za pomocą wykresu Gantta skorelowanym z prognozowaną i faktyczną produkcją energii elektrycznej (rys. 2)

Moduł optymalizacyjny w systemie „4RES” został zaimplementowany w oparciu o przedstawiony w poprzednim rozdziale algorytm heurystyczny. Prognozy produkcji są korygowane w oparciu o współczynnik, obliczany jako stosunek sumy mocy znamionowych czynnych (nieodstawionych od pracy) turbozespołów do sumy mocy znamionowych wszystkich turbozespołów w farmie wiatrowej. Wg autorów referatów, bezpośrednie uwzględnianie historycznych statusów turbozespołów (czynny/nieczynny) w uczeniu modeli prognozowania produkcji jest bezcelowe, ze względu na praktyczny brak dysponowania reprezentatywnych sytuacji eksploatacyjnych.

Działanie algorytmu przetestowano na danych rzeczywistych (dysponowano prognozami produkcji dla dwóch farm wiatrowych w Polsce oraz listą typowych prac eksploatacyjnych wymagających odstawienia turbozespołów). Na podstawie przeprowadzonych testów, stwierdzono, że wynik zwracany przez proponowany algorytm heurystyczny jest zgodny z wynikiem zwracany przez algorytm przeszukiwania zupełnego i wynik ten jest otrzymywany w relatywnie krótkim czasie.



Rys. 2. Monitorowanie harmonogramu prac za pomocą diagramu Gantta

Podsumowanie i wnioski

W referacie przedstawiono problem optymalizacyjny dotyczący krótkoterminowego harmonogramowania wyłączeń obiektów infrastruktury farmy wiatrowej oraz zaprezentowano potencjalną możliwość rozwiązania tego problemu.

Zaproponowano również algorytm rozwiązania przedstawionego problemu optymalizacyjnego, w oparciu o podejście heurystyczne.

Zaprezentowano możliwości systemu informatycznego „4RES” w zakresie zarządzania wyłączeniami źródeł OZE, z wykorzystaniem proponowanego algorytmu optymalizacyjnego.

Zdaniem autorów referatu, optymalne harmonogramowanie pracy wymagających wyłączeń turbin wiatrowych jest istotnym elementem prowadzenia eksploatacji infrastruktury farmy wiatrowej, nie tylko ze względów administracyjnych i technicznych, ale również ekonomicznych. Zatem, niezbędne jest prowadzenie prac badawczo-rozwojowych w tym zakresie. Autorzy planują dalsze badania w zakresie optymalizacji wyłączeń w wielu farmach wiatrowych z wykorzystaniem wielu zespołów remontowych.

Wyniki aktualnych i przyszłych prac są i będą wykorzystywane we wspieraniu obszarów i procesów biznesowych podmiotów prowadzących eksploatację farm wiatrowych. Opracowywane przez autorów metody reprezentacji i rozwiązywania problemów eksploatacyjnych OZE są i będą implementowane w rozwijanym w firmie Globema Sp. z o.o. i Instytucie Elektroenergetyki PW systemie informatycznym „4RES”.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego „System wspomaganie udziału w rynku energii elektrycznej dla operatorów OZE” INNOTECH-K1/HI1/21/158535/NCBR/12

LITERATURA

[1] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and

2003/30/EC. Official Journal of the European Union, L 140/16. 5.6.2009.

[2] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 roku Prawo Energetyczne (Dz. U. z 2006 r. Nr 89, poz. 625 z późniejszymi zmianami).

[3] Bradt M., Beckman E., Dilling W., Lanz B., Louis K., Nicolai T., Starke M., Moeller C., Wind power plant testing and commissioning. In: Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES. IEEE, 2012. p. 1-7.

[4] PN-E-04700:1998, Urządzenia i układy elektryczne w obiektach elektroenergetycznych -- Wytyczne przeprowadzania pomontażowych badań odbiorczych.

[5] Wu Y., Zhao H., Optimization maintenance of wind turbines using Markov decision processes. In: *Power System Technology (POWERCON)*, 2010 International Conference on. IEEE, (2010). p. 1-6.

[6] Besnard F., Fischer K., Bertling L., Reliability-Centred Asset Maintenance—A step towards enhanced reliability, availability, and profitability of wind power plants. In: *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, 2010 IEEE PES. IEEE, (2010). p. 1-8

[7] Michler-Cieluch T., Krause G., Buck B. H., Reflections on integrating operation and maintenance activities of offshore wind farms and mariculture. *Ocean & Coastal Management*, (2009), 52(1), pp. 57-68.

[8] Tongdan J., Zhigang T., Huerta M., Piechota J., Coordinating maintenance with spares logistics to minimize leveled cost of wind energy. In: *Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE)*, 2012 International Conference on. IEEE, (2012). p. 1022-1027.

[9] Negra, N. B., Holmstrom, O., Bak-Jensen B., Sorensen P., Aspects of relevance in offshore wind farm reliability assessment. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, (2007), 22(1): p. 159-166.

[10] Giebel G., Brownsword R., Kariniotakis G., Denhard M., Draxl C., The state-of-the-art in short-term prediction of wind power: A literature overview. ANEMOS. plus, (2011).

Autorzy: dr inż. Jacek Wasilewski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: jacek.wasilewski@ien.pw.edu.pl; dr inż. Dariusz Baczyński, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: dariusz.baczyński@ien.pw.edu.pl; mgr Ewa K. Fijolek, Globema Sp. z o.o., ul. Wita Stwosza 22, 02-661 Warszawa, E-mail: ewa.fijolek@globema.pl