

Anna MAZURKIEWICZ, Agnieszka SOŁTYSIAK, Klaudiusz MIGAWA

OCENA GOTOWOŚCI ELEKTROWNI WIATROWEJ Z ZASTOSOWANIEM SYSTEMU REJESTRACJI DANYCH EKSPLOATACYJNYCH ENERCON SCADA REMOTE 3

Streszczenie: W pracy wyznaczono charakterystyki gotowości siłowni wiatrowych na przykładzie siłowni ENERCON typ E-82/BF/107/23/01/2.0MW eksploatowanych w farmie wiatrowej Glinisk 6.0 MW. Analizowane charakterystyki zostały wyznaczone na podstawie zbioru danych eksploatacyjnych uzyskanych z systemu ENERCON SCADA Remote 3. Do oceny gotowości siłowni wiatrowych zastosowano charakterystyki modelu procesu odnowy ze skończonym czasem odnowy. Wyznaczone charakterystyki umożliwiają zarówno ocenę możliwości przystąpienia do realizacji, jak i zrealizowania zadania (produkcji energii elektrycznej).

Słowa kluczowe: siłownie wiatrowe, energia odnawialna, gotowość funkcjonalna, gotowość operacyjna

1. WPROWADZENIE

Siłownie wiatrowe są jednym z istotnych źródeł energii elektrycznej. Wytwarzanie energii odbywa się z wykorzystaniem sił natury. W świecie natury występuje wiele niewykorzystanych zasobów. Siłownia wiatrowa jest to złożony obiekt, którego zadaniem jest wytwarzanie energii elektrycznej z wykorzystaniem energii wiatru. Energia ta jest uznawana za energię czystą. Siła wiatru jest zamieniana na ruch obrotowy wirnika generatora wytwarzającego prąd, a zasoby energii wiatrowej są nieograniczone. Siła wiatru nie jest jednakowa w każdym miejscu na ziemi – wynika to z wielu uwarunkowań – jednakże na przestrzeni lat badacze zlokalizowali najsilniejsze źródło energii wiatrowej. Wiedza ta jest następnie wykorzystywana przez producentów energii elektrycznej z elektrowni wiatrowej. Prawidłowe usytuowanie generatorów wiatrowych (farm wiatrowych) skutkuje dużą efektywnością tych sieci. Doświadczenie dowodzi, że dokonanie wyboru usytuowania farm wiatrowych musi uwzględniać również opinie lokalnych społeczności, które współdecydują o powstawaniu takich rozwiązań. W globalnym świecie zapotrzebowanie na energię elektryczną nadal gwałtownie wzrasta. W konsekwencji wzrasta również świadomość ekologiczna. Przyczynia się to do dywersyfikacji źródeł energii elektrycznej. W Unii Europejskiej nadal prym w wytwarzaniu energii elektrycznej wiodą elektrownie i elektrownie ciepłowne wykorzystujące paliwa kopalne, takie jak: węgiel kamienny czy węgiel brunatny. Świadome podejście do rozwiązań energetycznych skłania

¹ inż. Anna MAZURKIEWICZ, UTP Bydgoszcz, e-mail: an_mazurkiewicz@onet.pl

² mgr inż. Agnieszka SOŁTYSIAK, UTP Bydgoszcz, e-mail: agnieszka.soltysiak@utp.edu.pl

³ dr hab. inż. Klaudiusz MIGAWA, prof. UTP, e-mail: klaudiusz.migawa@utp.edu.pl

obecne społeczeństwa w kierunku rozwoju energetyki odnawialnej. Powodem takiego podejścia są postępujące zmiany klimatu i zwiększenie zanieczyszczenia powietrza, co w realny sposób pogarsza stan zdrowia ludzi. Jest wiele projektów, które mają przyczynić się do karbonizacji przemysłu energetycznego. Nie jest to jednak proces, który można zrealizować w krótkim przedziale czasowym. Dlatego prognozy dotyczące rozwoju energetyki wiatrowej w Unii Europejskiej w latach 2020–2030, przygotowywane przez Komisję Europejską, przewidują znaczące zwiększenie mocy elektrowni wiatrowych, w szczególności lokalizowanych na obszarach morskich [3]. Cechą charakterystyczną elektrowni wiatrowych jest zmienność poziomu wytwarzanej mocy (energii) w czasie. W odróżnieniu od elektrowni konwencjonalnych na niezawodność siłowni wiatrowych wpływa zarówno możliwość uszkodzenia jej zespołów i elementów – niezawodność strukturalna, jak i losowy charakter źródła energii pierwotnej – niezawodność produkcyjna [1, 2, 7].

Większość obecnie istniejących elektrowni wiatrowych dostarcza wytwarzaną energię bezpośrednio do sieci elektroenergetycznej. Zwiększanie mocy elektrowni wiatrowych wiąże się bezpośrednio z problemami dotyczącymi magazynowania wytworzonej energii. Coraz częściej stosowane rozwiązania to wyposażanie elektrowni wiatrowych w magazyny energii (np. baterie akumulatorów) lub stosowanie rozwiązań hybrydowych (np. paneli fotowoltaicznych). W takich przypadkach możliwe jest dostarczanie wytworzonej energii do sieci elektroenergetycznej w sposób ciągły ze stałą mocą. Miarą niezawodności strukturalnej takich elektrowni są klasyczne wskaźniki awaryjności (uszkodzalności) i dyspozycyjności (gotowości), wyznaczane analogicznie jak w przypadku elektrowni konwencjonalnych.

W wielu pracach prezentowane są modele matematyczne niezawodności elektrowni wiatrowych, w tym modele probabilistyczne i stochastyczne [4, 5, 9], a także modele przystosowane do wyznaczania i analizy niezawodności, dostępności i bezpieczeństwa w warunkach ograniczeń stosowanej metodyki i narzędzi obliczeniowych oraz istniejących danych niezawodnościowych [8].

W tej pracy wyznaczono stacjonarne charakterystyki opisujące gotowość funkcjonalną i operacyjną siłowni wiatrowych. W kolejnych etapach realizowanych prac badawczych zostaną opracowane modele oceny i sterowania gotowością i bezpieczeństwem siłowni wiatrowych, z zastosowaniem stochastycznych modeli procesu eksploatacji, semi-markowskich modeli decyzyjnych oraz niedeterministycznych metod wyznaczania rozwiązań optymalnych (algorytmów ewolucyjnych, genetycznych i symulowanego wyżarzania).

2. MODEL OCENY GOTOWOŚCI SIŁOWNI WIATROWYCH

Wiatrowe generatory prądu elektrycznego są to obiekty o złożonej konstrukcji, którą można podzielić na dwa podstawowe zespoły. Zespół pierwszy składa się ze słupowego elementu nośnego o dużym przekroju, na którym zamontowana jest głowica generatora. W takiej konstrukcji bardzo ważną rolę odgrywa prawidłowe posadowienie i fundamentowanie. Na konstrukcji fundamentu

osadza się element słupowy, który można zaliczyć do konstrukcji wysokościowej. Konstrukcja z racji swych wymiarów musi mieć odpowiednią sztywność. Generator umieszczony na elemencie nośnym musi być trwale powiązany z częścią nośną. Konstrukcja i rozmiar generatora wraz z łopatom wirującymi w bardzo silny sposób oddziałują na fundament i część nośną urządzenia. Z tego względu siłownia wiatrowa musi być rozpatrywana jako cała konstrukcja. W prezentowanym opracowaniu siłownia wiatrowa rozpatrywana jest jako obiekt złożony, a do oceny jej poprawnego funkcjonowania należy stosować metody i modele matematyczne. Narzędzia matematyczne, które należy zastosować, pozwolą na dokładne odwzorowanie zachodzących procesów destrukcyjnych oraz wiarygodną ocenę niezawodności. Sprawne narzędzia obliczeniowe i umiejętność odwzorowywania zachodzących zdarzeń za pomocą modelu matematycznego w znaczny sposób ograniczają przedział czasu, w którym byłoby trzeba zbierać informacje z wielu obiektów o tej samej konstrukcji. Do oceny niezawodności rozpatrywanych siłowni wiatrowych farmy wiatrowej Glińsk 6.0 MW zastosowano rzeczywisty model odnowy. Rzeczywisty model odnowy zapewnia możliwość oceny niezawodności rozpatrywanych obiektów technicznych w sposób dokładny i – co szczególnie istotne – w modelu tym uwzględniane są również charakterystyki opisujące gotowość (dostępność) tych obiektów. Poniżej przedstawiono podstawowe charakterystyki zastosowanego modelu matematycznego [6]:

a) wartość oczekiwana czasu zdatności:

$$ET' = \int_0^{+\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{+\infty} [1 - F(t)] dt \quad (1)$$

gdzie:

$F(t)$ – dystrybuanta czasu zdatności,

$f(t)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa uszkodzeń;

b) wartość oczekiwana czasu odnowy:

$$ET'' = \int_0^{+\infty} t \cdot g(t) dt = \int_0^{+\infty} [1 - G(t)] dt \quad (2)$$

gdzie:

$G(t)$ – dystrybuanta czasu odnowy,

$g(t)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa odnowy;

c) funkcja odnowy $H(t)$ – oczekiwana liczba uszkodzeń (odnów) w danym przedziale czasu:

$$H(t) = E[N(t)], \quad t \geq 0 \quad (3)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} H(t) = \frac{t}{ET' + ET''} \quad (4)$$

gdzie:

$N(t)$ – proces losowy określający liczbę uszkodzeń (odnów) w danym przedziale czasu;

- d) funkcja gęstości odnowy $h(t)$ – oczekiwana liczba uszkodzeń (odnów) przypadająca na jednostkę czasu:

$$h(t) = H'(t) \quad (5)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} H'(t) = \frac{1}{ET' + ET''} \quad (6)$$

- e) gotowość funkcjonalna K_g jest charakterystyką niezawodności obiektu technicznego mierzona prawdopodobieństwem tego, że obiekt techniczny w dowolnej chwili t jest zdalny i może przystąpić do realizacji zadania:

$$K_g = \lim_{t \rightarrow \infty} K_g(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left[R(t) + \int_0^t R(t-x) \cdot h(x) dx \right] \quad (7)$$

gdzie:

$R(t)$ – oznacza prawdopodobieństwo tego, że obiekt nie uszkodzi się w przedziale czasu $(0, t)$,

$\int_0^t R(t-x) \cdot h(x) dx$ – oznacza prawdopodobieństwo tego, że w przedziale czasu $(0, t)$

obiekt n razy uszkodził się i n razy został odnowiony, a ostatnia odnowa została zrealizowana w chwili $t_n'' < t$ i w przedziale czasu (t_n'', t) obiekt nie uszkodził się;

- f) gotowość operacyjna $G_o(\tau)$ jest charakterystyką obiektu technicznego, mierzona prawdopodobieństwem tego, że obiekt techniczny w dowolnej chwili t jest zdalny i może przystąpić do realizacji zadania i ma zasób funkcjonowania niezbędny do jego ukończenia w wymaganym przedziale czasu τ :

$$G_o(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} G_o(t, \tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left[R(t+\tau) + \int_0^t R(t+\tau-x) \cdot h(x) dx \right] \quad (8)$$

Charakterystyki gotowości funkcjonalnej K_g i operacyjnej $G_o(\tau)$ opisują w sposób kompleksowy niezawodność rozpatrywanych obiektów technicznych (siłowni wiatrowych) i w ocenie uwzględniają nie tylko możliwość wystąpienia uszkodzeń, ale także możliwość prawidłowego wykonania zadania – produkcję energii elektrycznej.

3. WYNIKI BADAŃ GOTOWOŚCI FARMY WIATROWEJ GLIŃSK 6.0 MW

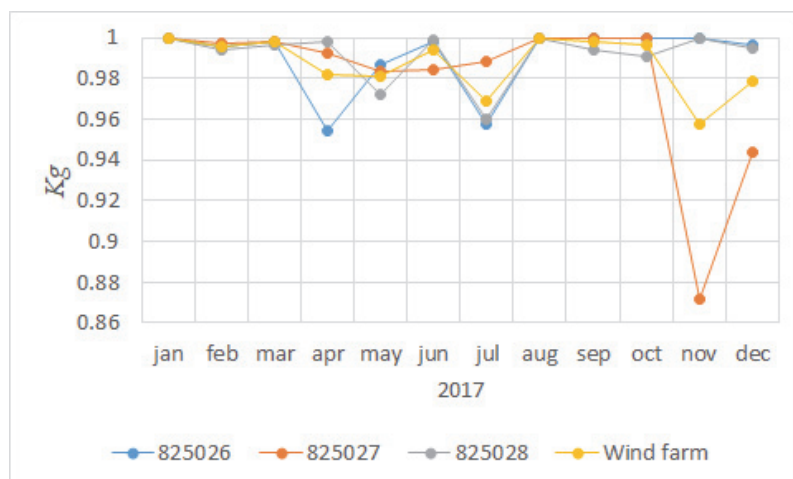
Poniżej na rysunku 1 przedstawiono przykładowe dane eksploatacyjne dotyczące siłowni wiatrowej ENERCON E-82 nr seryjny 825026, zarejestrowane w kolejnych miesiącach 2017 roku. Przedstawione dane dotyczą sumarycznych rocznych czasów: T1 – produkcji energii elektrycznej, T2 – pracy systemu SCADA, T3 – braku dostępu do sieci elektroenergetycznej, T4 – postoiu organizacyjnego, T5 – braku możliwości rejestrowania danych przez system SCADA, T6 – postoiu spowodowanego serwisowaniem i naprawą. Następnie na podstawie informacji pozyskanych z systemu rejestracji danych eksploatacyjnych

ENERCON SCADA Remote 3 wyznaczono gotowość rozpatrywanych siłowni wiatrowych do realizacji zadania w latach 2013–2017 oraz w kolejnych miesiącach 2017 roku. Przedstawione na rysunkach 2–5 wyniki badań dotyczą farmy wiatrowej Glińsk 6.0 MW, złożonej z trzech siłowni wiatrowych ENERCON typ E-82/BF/107/23/01/2.0MW o numerach seryjnych: 825026, 825027 i 82502.

Plant	Time	T1 [h]	T2 [h]	T3 [h]	T4 [h]	T5 [h]	T6 [h]
1 / 825026 / CS82	Dec 2017	741.33	743.98	0.04	0.00	0.00	2.60
1 / 825026 / CS82	Nov 2017	706.75	719.99	0.04	0.00	13.17	0.03
1 / 825026 / CS82	Oct 2017	659.11	744.93	0.14	0.00	85.66	0.02
1 / 825026 / CS82	Sep 2017	719.16	719.97	0.03	0.00	0.78	0.00
1 / 825026 / CS82	Aug 2017	734.85	743.97	0.08	0.00	9.03	0.01
1 / 825026 / CS82	Jul 2017	690.90	743.94	0.08	0.00	21.62	31.34
1 / 825026 / CS82	Jun 2017	709.86	719.97	0.04	0.00	8.94	1.13
1 / 825026 / CS82	May 2017	726.14	743.96	0.04	0.00	7.85	9.93
1 / 825026 / CS82	Apr 2017	686.57	719.98	0.08	0.00	0.59	32.74
1 / 825026 / CS82	Mar 2017	547.05	742.93	0.16	0.00	195.41	0.31
1 / 825026 / CS82	Feb 2017	549.41	671.95	0.13	0.00	119.37	3.04
1 / 825026 / CS82	Jan 2017	741.61	743.97	0.03	0.00	2.32	0.00

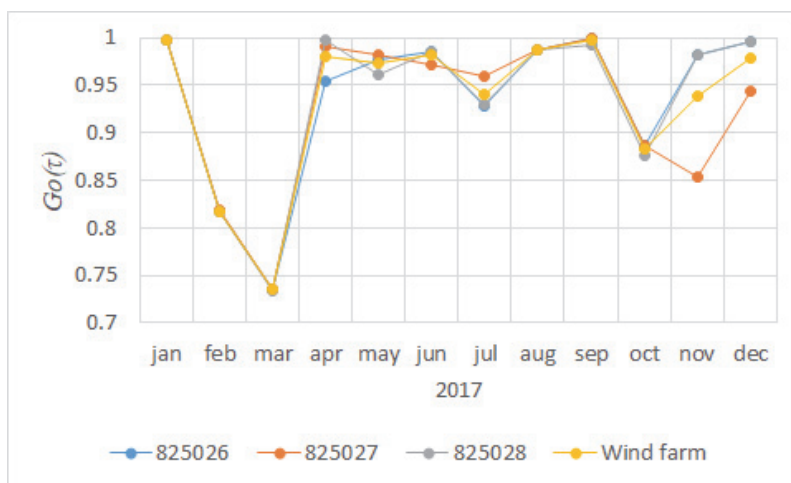
Rys. 1. Zrzut ekranowy przykładowych danych eksploatacyjnych z systemu ENERCON SCADA Remote 3 dla siłowni wiatrowej ENERCON E-82 nr seryjny 825026

Fig. 1. Screen projection of selected operational data from the ENERCON SCADA Remote 3 system for the ENERCON E-82 wind turbine serial number 825026



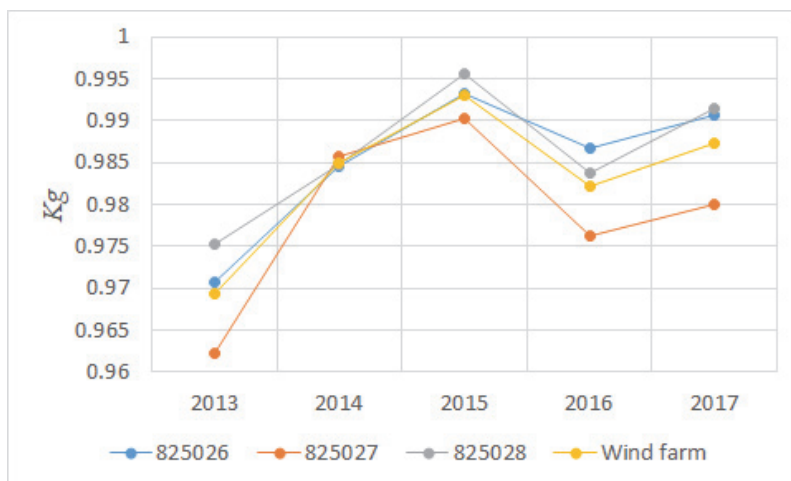
Rys. 2. Gotowość funkcjonalna K_g siłowni wiatrowych ENERCON E-82 farmy wiatrowej Glińsk 6.0 MW w kolejnych miesiącach 2017 roku

Fig. 2. Functional K_g availability of wind turbines ENERCON E-82 at the wind farm Glińsk 6.0 MW over the following months of 2017



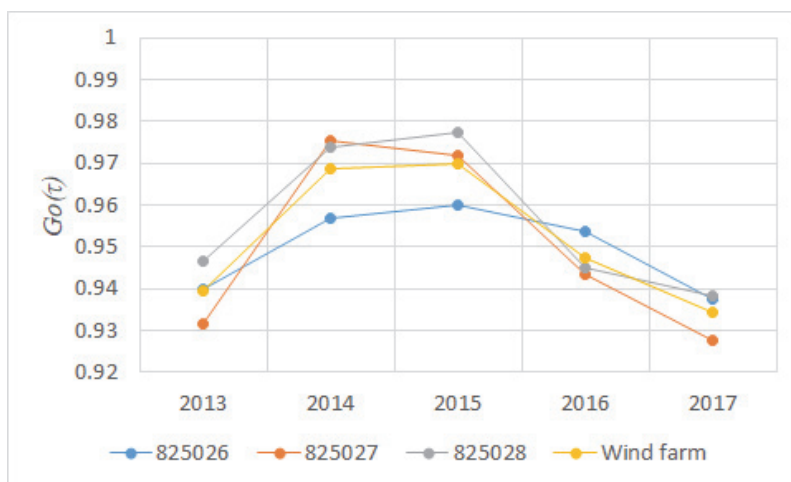
Rys. 3. Gotowość operacyjna $G_o(t)$ siłowni wiatrowych ENERCON E-82 farmy wiatrowej Glińsk 6.0 MW w kolejnych miesiącach 2017 roku

Fig. 3. Operational $G_o(t)$ availability of wind turbines ENERCON E-82 at the wind farm Glińsk 6.0 MW over the following months of 2017



Rys. 4. Gotowość funkcjonalna K_g siłowni wiatrowych ENERCON E-82 farmy wiatrowej Glińsk 6.0 MW w latach 2013–2017

Fig. 4. Functional K_g availability of wind turbines ENERCON E-82 at the wind farm Glińsk 6.0 MW over the years 2013–2017



Rys. 5. Gotowość operacyjna $G_o(\tau)$ siłowni wiatrowych ENERCON E-82 farmy wiatrowej Glińsk 6.0 MW w latach 2013–2017

Fig. 5. Operational $G_o(\tau)$ availability of wind turbines ENERCON E-82 at the wind farm Glińsk 6.0 MW over the years 2013–2017

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić wysoką gotowość funkcjonalną rozpatrywanych siłowni wiatrowych w poszczególnych miesiącach 2017 roku (dla farmy wiatrowej $K_g > 0,96$). Niewielki spadek odnotowano jedynie w listopadzie 2017 roku i dotyczy on siłowni wiatrowej o numerze seryjnym 825027. W przypadku gotowości operacyjnej poważne zakłócenia możliwości realizacji zadania (produkcji energii elektrycznej) wystąpiły w lutym, marcu, a także październiku 2017 roku.

Analiza gotowości funkcjonalnej farmy wiatrowej w poszczególnych latach jej eksploatacji świadczy, że gotowość ta w latach 2014–2017 była na wysokim poziomie ($K_g > 0,975$), natomiast należy również zauważyć znaczny spadek gotowości operacyjnej w latach 2016–2017, nawet poniżej wartości 0,93.

Ocena gotowości farmy wiatrowej zarówno ze względu na możliwości przystąpienia do realizacji zadania (gotowość funkcjonalna), jak i możliwości zrealizowania zadania (gotowość operacyjna) może być wykorzystana do bieżącej kontroli jej działania, a także – w przyszłości w celu zapewnienia ciągłości produkcji energii elektrycznej – do modernizacji i zastosowania rozwiązań hybrydowych, np. paneli fotowoltaicznych.

LITERATURA

- [1] BILLINTON R., BAI G.: Generating capacity adequacy associated with wind energy. IEEE Transactions on Energy Conversion 19(3), 2004.
- [2] CHOWDHURY A., KOVAL D.: Modelling non-dispatchable wind energy sources in generating capacity reliability planning. Proceedings of the fourth IASTED International Conference Power and Energy Systems, Rhodes, Greece, 2004.

- [3] Communication from the Commission to the Council and the European Parliament: Renewable energy road map renewable energies in the 21st century: building a more sustainable future. COM, 2006, 848.
- [4] HAGHIFAM M.-R., OMIÐVAR M.: Wind farm modelling in reliability assessment of power system. 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, KTH, Stockholm, Sweden, 2006.
- [5] KARKI R., HU P., BILLINTON R.: A simplified wind power generation model for reliability evaluation. IEEE Transactions on Energy Conversion 21(2), 2006.
- [6] MIGAWA K.: Availability control in transport means operation systems. University of Science and Technology in Bydgoszcz, Publishing Department, Dissertations no. 168, 2013.
- [7] MILLIGAN M.R.: A chronological reliability model incorporating wind forecasts to assess wind plant reserve allocation. AWEA WindPower 2002 Conference, Portland, Oregon, 2002.
- [8] MILLIGAN M.R.: A sliding window technique for calculating system LOLP contributions of wind power plants. Proceedings of the WindPower 2001 Conference, Washington, D.C., 2001.
- [9] PASKA J., BARGIEL J., OLEKSY A.: Application of value-based reliability approach in power transmission system planning. 7th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems – PMAPS 2002, Naples, Italy, 2002.

ASSESSMENT OF WIND FARM AVAILABILITY WITH THE ENERCON SCADA REMOTE 3 OPERATIONAL DATA REGISTRATION SYSTEM

Summary: This paper analyzes wind turbine availability characteristics based on the example of the ENERCON type E-82/BF/107/23/01/2.0MW engine used at the Glińsk 6.0 MW wind farm. The analyzed characteristics were determined on the basis of a set of operating data obtained from the ENERCON SCADA Remote 3 system. In the evaluation of wind turbine availability, the characteristics of the renewal process model with finite regeneration time were used. The designated characteristics make both the assessment of the possibility of commencing an operation, as well as the completion of the task (production of electricity) possible.

Key words: wind turbine, renewable energy, functional availability, operational availability