

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Analiza gotowości małych turbin wiatrowych z wykorzystaniem modelu Markowa

Justyna Zalewska-Lesiak, Jerzy Małachowski, Joanna Szkutnik-Rogoż

Zakład Inżynierii Obliczeniowej i Biomedycznej, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Wojskowa Akademia Techniczna  
email: justyna.zalewska@wat.edu.pl, jerzy.malachowski@wat.edu.pl, joanna.szkutnik@wat.edu.pl

**STRESZCZENIE:** W publikacji przedstawiono analizę gotowości małych turbin wiatrowych. Warunkiem efektywności prawidłowej pracy elektrowni wiatrowych jest jej zdatność do realizacji założonych funkcji, która może być wyrażona współczynnikiem gotowości technicznej. W ramach zrealizowanych prac badawczych opracowano stochastyczny model eksploatacji w oparciu o zastosowanie teorii procesów Markowa. Na podstawie zgromadzonych danych zidentyfikowano 3-stanową przestrzeń fazową badanego procesu. Przeprowadzono szereg analiz mających na celu obliczenie wskaźników eksploatacyjnych elektrowni wiatrowych. Wartości prawdopodobieństw ergodycznych (granicznych) obliczono za pomocą trzech metod. Następnie wyznaczono prawdopodobieństwa warunkowe w zależności od rozkładu początkowego. Otrzymane współczynniki gotowości, nie przekraczające 30% świadczą o niskiej efektywności rozpatrywanych elektrowni wiatrowych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** małe turbiny wiatrowe, proces Markowa, gotowość, wskaźniki eksploatacyjne

#### 1. Wstęp

Przeprowadzenie modelowania procesu eksploatacji w oparciu o zastosowanie teorii Markowa skłania do dokładnego poznania badanego procesu oraz umożliwiają analizę i ocenę podstawowych wskaźników eksploatacyjnych badanego obiektu.

Artykuł ten powstał z potrzeby poznania realnych wskaźników eksploatacyjnych oraz wydajności małych turbin wiatrowych użytkowanych na terenie Polski. W artykule do obliczeń wykorzystano rzeczywiste dane wiatrowe z monitoringu czterech turbin o różnych lokalizacjach i modelach.

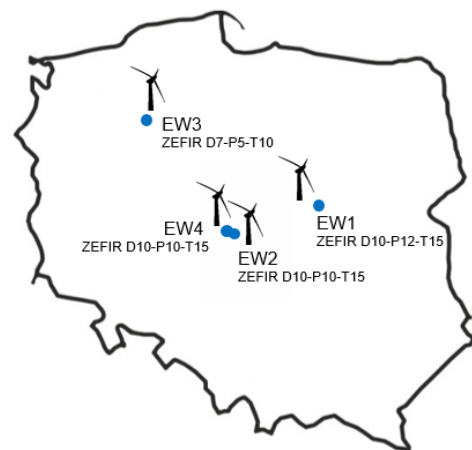
Zastosowanie łańcuchów Markowa pozwoliło oszacować gotowość analizowanych turbin i porównać wskaźniki eksploatacyjne w poszczególnych lokalizacjach małych elektrowni wiatrowych.

#### 2. Przedmiot analizy

Przedmiotem badań są cztery małe elektrownie wiatrowe (rys. 1) jednego producenta zainstalowane w różnych lokalizacjach Polski oraz charakteryzujące się odmiennymi warunkami otoczenia. Wszystkie turbiny, które użyto do analizy charakteryzują się poziomą osią obrotu. Dwa modele są identyczne z punktu widzenia umiejscowienia osi wirnika, średnicy oraz możliwej do uzyskania charakterystyki mocy. Pozostałe różnią się między sobą średnicą wirnika, mocą nominalną i wysokością położenia osi wirnika względem podłoża. Baza danych została opracowana na podstawie danych z monitoringu turbin dostarczonych przez producenta. Dokładność zapisywanych danych z częstotliwością 1 minuta, umożliwiła wnikliwą analizę.

Zakres czasowy prowadzonych analiz powiązany został z pełnym rokiem metrologicznym, tj. dotyczył 12 miesięcy w okresie grudzień 2020 – listopad 2021.

Na wybór odpowiedniej lokalizacji farmy wiatrowej składa się wiele czynników. Przede wszystkim wybrana lokalizacja musi charakteryzować się stabilnymi warunkami wietrzności. Na rysunku 1 zaznaczono lokalizacje wybranych małych elektrowni wiatrowych podlegających analizie.



Rys. 1. Mapa Polski z lokalizacjami badanych elektrowni wiatrowych

W wyniku przeprowadzonej analizy procesu eksploatacji zdefiniowano 3-stanową przestrzeń fazową oraz wyznaczono możliwe przejścia międzystanowe. W tabeli 1 zamieszczono opis przestrzeni stanów eksploatacji elektrowni wiatrowych.

Tabela 1. Przestrzeń stanów procesu eksploatacji elektrowni wiatrowych

Stany	Nazwa	Opis stanu
S1	Stan prawidłowej pracy	Turbina jest sprawna i generuje moc
S2	Stan spoczynku	Turbina jest sprawna i nie generuje mocy
S3	Stan niezdatności	Turbina jest niesprawna i nie generuje mocy

### 3. Metodologia badań

W procesach eksploatacji w losowej chwili  $t$  obiekt znajduje się wyłącznie w jednym ze stanów zidentyfikowanych w przestrzeni fazowej. W niniejszych badaniach wykorzystano łańcuchy Markowa. Na początku utworzono macierze liczebności przejść międzystanowych oraz macierze prawdopodobieństw przejść.

W celu wyznaczenia liczbowej charakterystyki niezawodności jaką jest współczynnik gotowości, dla każdej z elektrowni wyznaczono prawdopodobieństwa ergodyczne.

Dla modelu Markowa współczynnik gotowości technicznej stanowi sumę prawdopodobieństw ergodycznych stanów eksploatacyjnych, w których obiekt techniczny był sprawny i nie wymagał naprawy tj. obiekt przebywał w stanie S1 lub S2.

### 4. Wyniki

W tabeli 2 zestawiono całkowity czas przebywania obiektów w poszczególnych stanach eksploatacyjnych. Należy zauważyć, że każdy obiekt w rozpatrywanym okresie badawczym najdłużej przebywał w stanie niezdatności S3.

Tabela 2. Czasy trwania poszczególnych stanów [min]

	EW 1	EW 2	EW 3	EW 4
S1	76 035	7 433	4 597	20 739
S2	81 189	64 819	98 321	72 679
S3	368 376	453 348	422 682	432 182

Dla każdego obiektu technicznego, przy zastosowaniu trzech różnych metod obliczeniowych wyznaczono graniczne rozkłady prawdopodobieństwa. W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że dla każdego obiektu technicznego istnieje rozkład ergodyczny niezależny od rozkładu początkowego. Korzystając ze wzoru na prawdopodobieństwo całkowite oraz równania Chapmana-Kołmogorowa wyznaczono rozkład graniczny po  $n$  krokach. Dla każdego z możliwych wariantów rozkładu początkowego wyznaczono warunkowe prawdopodobieństwo przebywania w poszczególnych stanach eksploatacyjnych.

Obliczono wskaźniki eksploatacyjne dla elektrowni wiatrowych, a wyniki zamieszczono w tab. 3. Wskaźnik gotowości technicznej pozwala określić w jakim stopniu obiekt był technicznie sprawny i gotowy do użycia. Dla

każdej elektrowni otrzymano wysokie wartości prawdopodobieństwa przebywania w stanie niezdatności, co świadczy o niskiej efektywności analizowanych turbin.

Tabela 3. Wskaźniki eksploatacyjne elektrowni wiatrowych

	Współczynnik gotowości	Współczynnik niegotowości
EW1	0,30	0,70
EW2	0,14	0,86
EW3	0,20	0,80
EW4	0,18	0,82

### 5. Podsumowanie

Na podstawie otrzymanych wyników nasuwa się jednoznaczny wniosek, że osiągi wszystkich analizowanych turbin są na niskim poziomie. Główne wnioski z analiz są następujące:

- Otrzymane współczynniki gotowości technicznej turbin przyjmują wartości od 14% do 30% wskazując w ten sposób wysoki poziom niezdatności do eksploatacji. Może to świadczyć o częstym występowaniu awarii oraz czasowych wyłączeniach turbiny.
- Umiejscowienie turbiny powinno być dobierane każdorazowo odrębnie do lokalnych warunków i poprzedzone oceną wietrzności w danej okolicy.
- Należy unikać stref zawirowań powietrza, wirniki i łopaty turbiny powinny znajdować się w strefie laminarnych strumieni wiatru.

*Praca powstała przy wsparciu uczelnianego grantu badawczego realizowanego w Wojskowej Akademii Technicznej (nr UGB 22-771/2022).*

### Literatura

- Strona producenta DR ZĄBER (<https://zaber.com.pl/zefir/>).
- Zalewska J., Damaziak K., Małachowski J., An Energy Efficiency Estimation Procedure for Small Wind Turbines at Chosen Locations in Poland, *Energies* 2021, 14, 3706, doi:10.3390/en14123706.
- Jakubowski J., Sztencel R., Wstęp do teorii prawdopodobieństwa, wyd. IV, SCRIPT, Warszawa 2010.
- Grabski F., Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance, Elsevier 2015.
- Jaramillo F., Gutiérrez J.M., Orchard M., Guarini M., Astroza R., A Bayesian approach for fatigue damage diagnosis and prognosis of wind turbine blades, *Mechanical Systems and Signal Processing* 2022, 174, 109067, doi:10.1016/j.ymssp.2022.109067.
- Seyr H., Muskulus M., Use of Markov Decision Processes in the Evaluation of Corrective Maintenance Scheduling Policies for Offshore Wind Farms, *Energies* 2019, 12, 2993, doi:10.3390/en12152993.
- Papadopoulos C.T., Li J., O'Kelly, M.E.J. A Classification and Review of Timed Markov Models of Manufacturing Systems. *Computers & Industrial Engineering* 2019, 128, 219–244, doi:10.1016/j.cie.2018.12.019.
- Swiderski A., Borucka A., Grzelak M., Gil L., Evaluation of Machinery Readiness Using Semi-Markov Processes. *Applied Sciences* 2020, 10, 1541, doi:10.3390/app10041541.
- Oszczypała M., Ziółkowski J., Małachowski J., Analysis of Light Utility Vehicle Readiness in Military Transportation Systems Using Markov and Semi-Markov Processes, *Energies*, vol. 15, nr 14, 2022, 5062, 1–24, doi:10.3390/en15145062.
- Ziółkowski J., Małachowski J., Oszczypała M., Szkutnik-Rogoż J., Legas A., Modelling of the Military Helicopter Operation Process in Terms of Readiness, *Defence Science Journal*, vol. 71, nr 5, 2021, 602–611, doi:10.14429/dsj.71.16422.