

ZASTOSOWANIE METODY MONTE CARLO W KOMPUTEROWYM SYSTEMIE ZARZĄDZANIA ELEKTROWNIĄ WIATROWĄ

Wojciech RADZIEWICZ

Streszczenie: W ostatnich latach można zaobserwować dynamiczny rozwój odnawialnych źródeł energii, a w szczególności energetyki wiatrowej. Inwestowanie w elektrownię wiatrową obarczone jest dużym ryzykiem związanym nie tylko z losowością wiatru, ale także ze zmiennością rynku, w tym cen sprzedaży energii elektrycznej i zielonych certyfikatów. Pomocnym narzędziem w podejmowaniu decyzji inwestycyjnej może być system komputerowy uwzględniający stochastyczność wybranych zmiennych losowych poprzez zastosowanie metody Monte Carlo w prognozowaniu wyniku finansowego elektrowni wiatrowej. Oprogramowanie takie powinno także wspomagać zarządzanie elektrownią wiatrową umożliwiając prognozy krótkookresowe.

Słowa kluczowe: elektrownia wiatrowa, metoda Monte Carlo, system komputerowy, produkcja energii, zmienne losowe, analiza ekonomiczna, wspomaganie decyzji, prognozowanie.

1. Wstęp

Rozwój społeczny i gospodarczy naszego państwa wiąże się - mimo kryzysu - ze zwiększeniem zapotrzebowania na energię elektryczną. Według [3] wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną w Polsce sięga 2% rocznie, a wzrost mocy szczytowej wynosi aż 5% rocznie.

W ostatnich latach można zaobserwować bardzo dynamiczny rozwój energetyki wiatrowej. Obecnie na świecie zainstalowano ponad 157 GW mocy w elektrowniach wiatrowych, a roczny przyrost mocy przekracza 30% w skali całego globu [5]. Również w Polsce na przestrzeni ostatnich lat występuje bardzo duże zainteresowanie energetyką wiatrową.

Oprócz niekwestionowanych wartości ekologicznych, podstawowym czynnikiem mającym wpływ na dynamiczny rozwój energetyki wiatrowej na świecie, w Europie i w Polsce jest postęp technologiczny obejmujący przede wszystkim poprawę konstrukcji turbin (pojedyncze turbozespoły osiągają moc 7 MW) oraz zwiększeniem wysokości masztów turbozespołów. Nie bez znaczenia jest także system wsparcia państwa w postaci mechanizmu dopłat (zielone certyfikaty¹), promujący czyste technologie produkcji energii elektrycznej. Skutkuje to wzrostem opłacalności farm wiatrowych oraz redukcją kosztów wytwarzanej energii elektrycznej.

¹ Związane są z pochodzeniem energii ze źródeł odnawialnych i stanowią prawa majątkowe podlegające procesowi kupna-sprzedaży lub umorzenia na życzenie posiadacza przez prezesa Urzędu Regulacji Energetyki. Zielone certyfikaty stanowią mechanizm wsparcia producentów, umożliwiając uzyskanie dodatkowych przychodów.

Jednak budowa nowych źródeł wiatrowych w gospodarce rynkowej obarczona jest dużym ryzykiem inwestycyjnym. Pomiary prędkości wiatru są niewystarczające do jednoznacznego określenia optymalnej lokalizacji farmy wiatrowej. Duże znaczenie mają także inne czynniki nie związane z wiatrem, a określające ekonomiczne powodzenie inwestycji. Należą do nich między innymi: koszty kapitałowe podczas realizacji inwestycji, koszty eksploatacji ze szczególnym uwzględnieniem awarii i przestojów oraz ceny sprzedaży energii elektrycznej i zielonych certyfikatów [9].

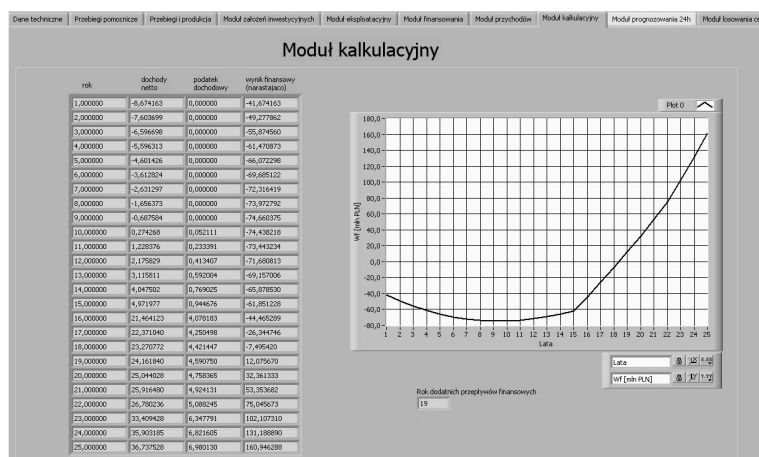
Pomocnym narzędziem dla wspomagania decyzji dotyczącej wyboru optymalnej lokalizacji dla elektrowni wiatrowej oraz jej eksploatacji może być system komputerowy do analizy ekonomicznej i wspomagania zarządzania elektrownią wiatrową, uwzględniający losowość istotnych parametrów, mających wpływ na opłacalność inwestycji, dzięki zastosowaniu metody Monte Carlo.

2. System komputerowy do analizy ekonomicznej elektrowni wiatrowej

Ze względu na stochastyczność wiatru inwestowanie w energetykę wiatrową obarczone jest dużym ryzykiem [10]. Zmienność cen sprzedaży energii elektrycznej na rynku oraz zmienność cen zielonych certyfikatów utrudnia oszacowanie potencjalnych przychodów w elektrowni wiatrowej.

Powyższe zmusza inwestorów do wykorzystywania narzędzi w postaci systemów komputerowych do analizy ekonomicznej. Istnieją systemy komercyjne wspomagające funkcjonowanie elektrowni wiatrowej, ale ich koszty są wysokie. Ponadto są to najczęściej realizacje obce, które nie zawsze dostosowane są do polskich przepisów i regulacji prawnych [9].

Autor opracował narzędzie w postaci programu komputerowego *Farma Wiatrowa 2.5*, który umożliwi przeprowadzanie wielokryterialnych badań symulacyjnych funkcjonowania elektrowni wiatrowej w otoczeniu rynkowym. Oprogramowanie to wspomaga także eksploatację elektrowni wiatrowej poprzez wykorzystanie modułu prognozowania. Moduł kalkulacyjny systemu komputerowego *Farma Wiatrowa 2.5* przedstawia rys. 1 [11].



Rys. 1. Moduł kalkulacyjny autorskiego systemu komputerowego *Farma Wiatrowa 2.5* [11]

W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych z wykorzystaniem programu *Farma Wiatrowa 2.5* ustalono parametry wejściowe. System posiada 46 zmiennych stanu, z których najistotniejsze przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry wejściowe dla potrzeb symulacji wyniku finansowego elektrowni wiatrowej. Opracowanie własne na podstawie [1, 6, 12, 13, 7, 4]

Parametr	Jedn.	Wartość	Uwagi
Turbozespół	szt.	15	Producent Vestas, model V-80, prędkość nominalna 15 m/s
Moc zainstalowana	MW	30	Moc turbozespołów: 2,0 MW każdy
Sprawność elektryczna turbozespołu	%	44,00	Sprawność elektryczna waha się w granicach 42 - 46%
Powierzchnia objęta wirnikiem	m ²	5027,00	Średnica rotora wynosi 80 m
Średnioroczna prędkość wiatru	m/s	6,25	Roczne pomiary rzeczywiste w lokalizacji G na wys. 42 m nad poziomem gruntu
Współczynnik strat	%	2,00	Współczynnik strat obejmuje roczną dyspozycyjność turbozespołów
Koszty inwestycyjne	mln PLN	165,00	Wartość zmienna w zależności od symulacji
Koszt podłączenia do systemu elektroenergetycznego	mln PLN	16,50	10% całości projektu
Kurs euro	PLN	4,0587	Średni kurs NBP z dnia 23-06-2010 r.
Udział środków własnych	%	20,00	80% środków inwestycyjnych pochodzi z kredytu inwestycyjnego
Dotacje	%	0,00	Brak dotacji
Wysokość oprocentowania kredytu inwestycyjnego	%	8,00	Oprocentowanie w skali roku. Dodatkowo jednorazowy koszt uzyskania kredytu: 1%
Koszty zatrudnienia	mln PLN	0,12	Roczne koszty zatrudnienia uwzględniają wysokość podatków i opłat dla ZUS
Koszty administracyjne, media, ubezpieczenie, pozostałe podatki	mln PLN	5,81	3,52% całości projektu rocznie
Naprawy, remonty, części zamienne	mln PLN	3,30	2% całości projektu rocznie
Średnia cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym	PLN/MWh	197,21	Średnia cena sprzedaży energii na rynku konkurencyjnym w roku 2009
Średnioroczny kurs jednolity zielonych certyfikatów na TGE	PLN/MWh	250,03	Średni kurs sprzedaży zielonych certyfikatów na RPM ² TGE w pierwszym półroczu 2009 r.

² RPM- Rynek Praw Majątkowych na Towarowej Giełdzie Energii.

Dla zaproponowanych parametrów wejściowych wykonano symulację funkcjonowania elektrowni wiatrowej w 25-letnim horyzoncie czasowym i określono wynik finansowy (W_f), który wyniósł 160,95 mln zł.

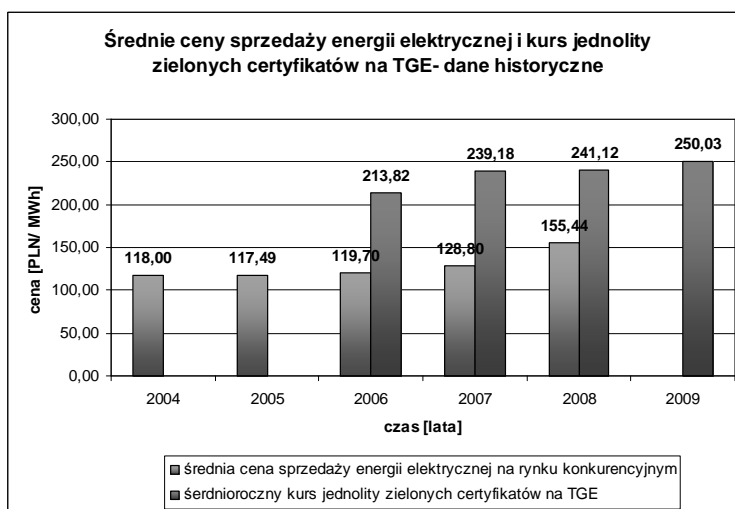
3. Zastosowanie metody Monte Carlo w komputerowym systemie *Farma Wiatrowa* 2.5 dla wybranych zmiennych losowych

Metoda Monte Carlo (MC) służy do modelowania procesów złożonych, w których trudno wyznaczyć wynik w sposób analityczny. Metoda ta jest zaliczana do metod symulacyjnych i może być stosowana wszędzie tam, gdzie występują procesy lub zjawiska stochastyczne. Istotą MC jest przypadkowe losowanie wielkości charakteryzujących proces, a następnie wyznaczenie i przeanalizowanie parametrów statystyki opisowej, tj.: statystyki położenia i rozrzutu [2].

Metodę Monte Carlo zastosowano do analizy ekonomicznej elektrowni wiatrowej dla wybranych zmiennych losowych, a następnie dokonano estymacji przedziałowej funkcji celu jaką jest wynik finansowy.

W procesie kalkulacji funkcji celu (W_f) w 25-letnim horyzoncie czasowym występuje wiele zmiennych stochastycznych. Dla potrzeb analizy wybrano 2 zmienne losowe: cenę sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym oraz kurs jednolity zielonych certyfikatów na Towarowej Giełdzie Energii (TGE).

Najpierw dokonano prognozowania wartości tych zmiennych wykorzystując dane historyczne przedstawione na rys. 2.



Rys. 2. Dane historyczne średniej ceny sprzedaży energii elektrycznej i kursu jednolitego zielonych certyfikatów. Opracowanie własne na podstawie [12, 13]

Ponieważ dane historyczne nie zawierają elementów odstających, zatem do prognozowania wartości zmiennych wykorzystano model regresji liniowej, w którym współczynniki modelu obliczane są za pomocą najpopularniejszej metody statystycznej estymacji i wyznaczania linii trendu - metody najmniejszych kwadratów. Regresja liniowa zakłada zależność liniową pomiędzy zmiennymi objaśnianymi, a objaśniającymi i polega

na znalezieniu współczynników regresji, co w przypadku jednej zmiennej objaśnianej sprowadza się do wyznaczenia współczynników funkcji liniowej jak najlepiej dopasowanej do danych historycznych.

W przypadku średniej ceny sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów współczynniki te wyniosły: $a= 8,619$ oraz $b= -17 161,80$. Analogicznie dla średniorocznego kursu jednolitego zielonych certyfikatów współczynniki regresji liniowej wyniosły odpowiednio: $a= 11,057$ oraz $b= -21 960,90$ [9]. Wyznaczono w ten sposób linie trendu dla analizowanych zmiennych losowych, które przedstawiono na rys. 3.

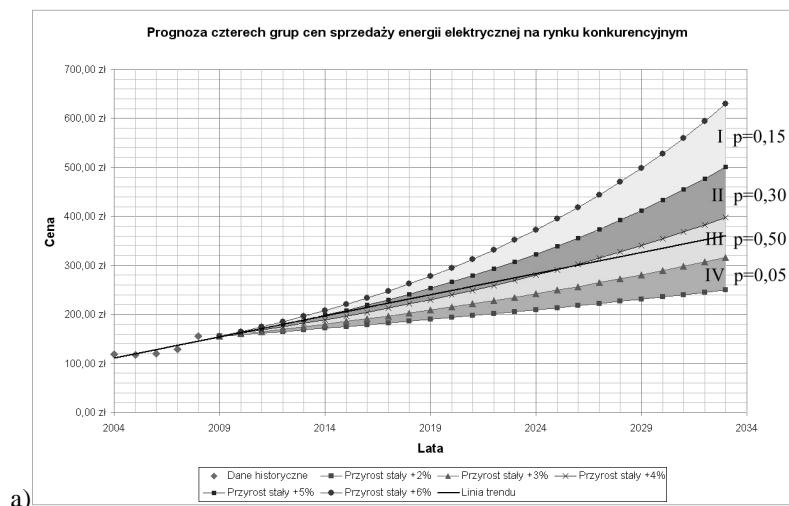
Dokonano także prognoz wybranych zmiennych losowych, które obejmowały stały przyrost tych zmiennych w przedziale od 2- 6% co 1%.

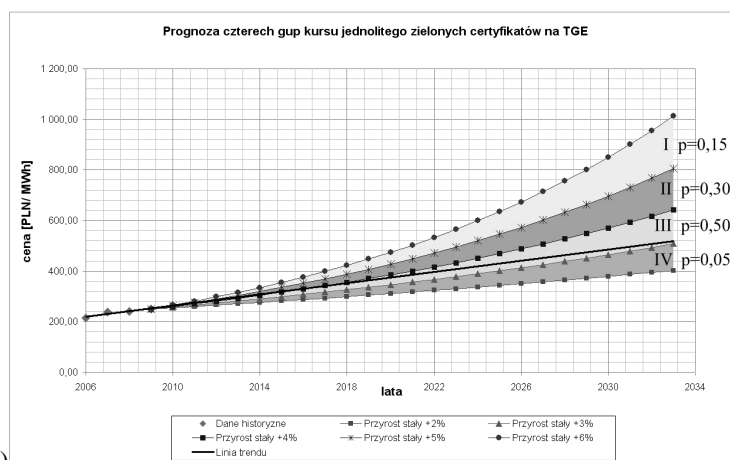
Następnie określono grupy wartości (cen sprzedaży) dla każdej zmiennej oraz określono gęstość prawdopodobieństwa zmiennych losowych poprzez założenie prawdopodobieństwa wystąpienia wartości w poszczególnej grupie dla każdej z dwóch zmiennych. Założono, że cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym oraz kurs jednolity zielonych certyfikatów na TGE, mają rozkład logarytmiczno-normalny i wstępują w czterech grupach z następującym prawdopodobieństwem [9]:

- I grupa: 0,15
- II grupa: 0,30
- III grupa: 0,50
- IV grupa: 0,05

Podział na 4 grupy wybranych zmiennych losowych przedstawia rys. 3 a) i 4 b).

W oparciu o metodę Monte Carlo można oszacować różnice pomiędzy minimalnym, a maksymalnym potencjalnym przychodem. Korzystając z założeń dotyczących gęstości prawdopodobieństwa wybranych zmiennych losowych, wykonano 100 losowań par cen dla roku 2013 oraz dla roku 2033. Wartości cen sprzedaży energii (1 MWh) w roku 2013 znajdują się w przedziale od 168,25 zł do 196,24 zł, a wartości kursu zielonych certyfikatów są w przedziale od 270,64 zł do 315,66. Analogiczne przedziały wartości zmiennych losowych dla roku 2033 to: od 250,02 zł do 629,37 zł (energia) oraz od 402,16 zł do 1012,36 zł (zielone certyfikaty).

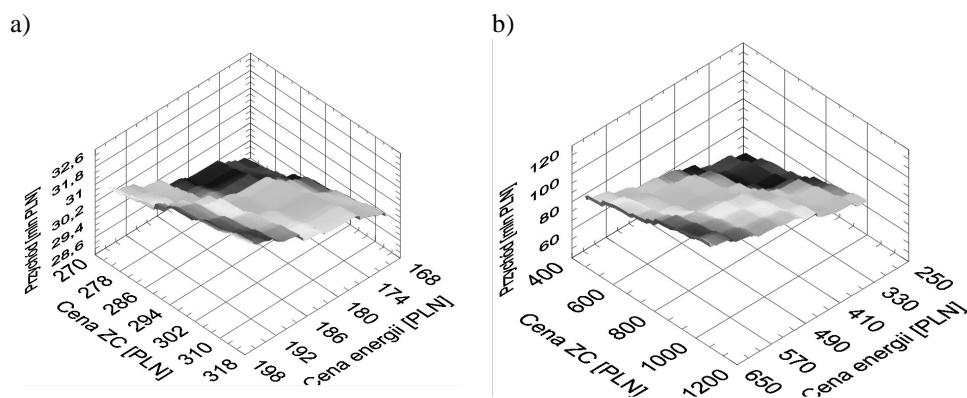




b)
Rys. 3. Podział na 4 grupy wartości wybranych zmiennych losowych:
a) cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym,
b) kurs jednolity zielonych certyfikatów na TGE [9]

Różnice przychodu w 2013 roku, dla założonych warunków początkowych opisanych w tabeli 1, wahały się w przedziale 39,17 mln zł, a 45,54 mln zł. Im dalsza predykcja, tym większe różnice, które dla roku 2033 i znalazły się w przedziale od 58,27 mln zł do 145,38 mln zł [9].

Badania symulacyjne z wykorzystaniem metody Monte Carlo i systemu komputerowego *Farma Wiatrowa 2.5* umożliwiły wygenerowanie płaszczyzn przychodów dla analizowanych przypadków, co przedstawia rys. 4 a) i 5 b).



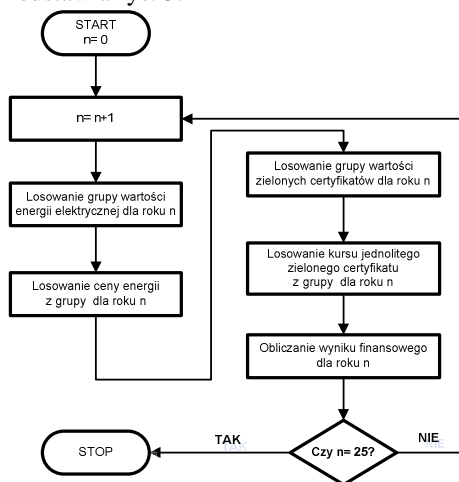
Rys. 4. Płaszczyzny przychodów farmy wiatrowej w funkcji zmiennych losowych:
a) generowanych z przedziału wartości dla roku 2013,
b) generowanych z przedziału wartości dla roku 2033.

4. Prognozowanie wyniku finansowego elektrowni wiatrowej z wykorzystaniem metody Monte Carlo

Kolejnym etapem analizy było prognozowanie wyniku finansowego elektrowni wiatrowej przy użyciu metody MC. W tym przypadku zastosowano programowy generator liczb pseudolosowych, który dokonywał losowania w następującej kolejności:

- grupa wartości (od I do IV),
- liczba odpowiadająca wartości zmiennej losowej z tej grupy (losowanie w przedziale wartości z założoną gęstością prawdopodobieństwa).

Programowy generator liczb pseudolosowych realizował losowanie dla każdej z dwóch zmiennych i dla każdego roku funkcjonowania elektrowni wiatrowej. Algorytm obliczania wyniku finansowego farmy wiatrowej przy zastosowaniu metody MC dla grup wartości zmiennych losowych przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Algorytm obliczania wyniku finansowego elektrowni wiatrowej przy zastosowaniu metody Monte Carlo dla 2 wybranych zmiennych losowych

Na podstawie tego algorytmu wykonano 1250 losowań par cen i wyznaczono 50 prognoz wartości funkcji celu. Wyniki analizy przedstawia rys. 6 [9].



Rys. 6. Symulacja wyniku finansowego elektrowni wiatrowej przy zastosowaniu metody Monte Carlo w odniesieniu do parametrów wejściowych [9]

Analiza wykazała, że dla wybranych zmiennych losowych występujących w czterech grupach z założoną gęstością prawdopodobieństwa prognoza wyniku finansowego elektrowni wiatrowej w początkowym okresie jej funkcjonowania jest zbliżona wartości W_f obliczonej dla warunków początkowych. Natomiast w okresie późniejszym (po 15 latach funkcjonowania), większość wygenerowanych symulacji osiągnęła wyższy wynik finansowy w odniesieniu do warunków początkowych. Po 22 roku działalności farmy wiatrowej wszystkie wyniki symulacji znalazły się powyżej krzywej opisującej wynik finansowy elektrowni wiatrowej skalkulowany dla warunków początkowych. Przedział wartości funkcji celu dla przeprowadzonych symulacji w 25 roku funkcjonowania elektrowni wiatrowej ma postać: $184,06 \text{ mln zł} < W_f < 264,38 \text{ mln zł}$.

5. Wnioski

Ciągły wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną niesie ze sobą konieczność powstawania nowych źródeł energii lub modernizacji istniejących. Coraz większego znaczenia nabierają proekologiczne, niskoemisyjne odnawialne źródła energii, wśród nich energetyka wiatrowa.

Na przestrzeni ubiegłych lat można zaobserwować wzrost zarówno średniej ceny sprzedaży energii elektrycznej, jak i kursu jednolitego zielonych certyfikatów na Rynku Praw Majątkowych TGE.

Według [8] nieunikniony jest wzrost cen energii elektrycznej ze względu na rosnące koszty zakupu uprawnień do emisji CO₂ i wzrost cen węgla.

O opłacalności ekonomicznej inwestycji w farmę wiatrową decyduje nie tylko właściwa lokalizacja (wysoka średnioroczna prędkość wiatru), ale również ceny sprzedaży energii elektrycznej oraz zielonych certyfikatów. Ponieważ inwestowanie w elektrownię wiatrową ma charakter długookresowy, to istotne z punktu widzenia inwestora, wydaje się prognozowanie cen energii elektrycznej i zielonych certyfikatów w 25-letnim horyzoncie czasowym (założony czas funkcjonowania elektrowni wiatrowej).

Zdaniem autora, pomocne może się okazać zastosowanie metody Monte Carlo w systemie komputerowym wspomagającym analizę efektywności ekonomicznej elektrowni wiatrowej. Przykładem zastosowania jest autorski program *Farma Wiatrowa 2.5*, w którym zaimplementowano metodę MC do estymacji przedziałowej wyniku finansowego (osiąganego przez elektrownię wiatrową) w funkcji czasu.

Podczas badań okazało się, że dla założonej gęstości prawdopodobieństwa wzrostu cen sprzedaży energii elektrycznej i zielonych certyfikatów, otrzymano większą wartość funkcji celu (W_f) po 25 latach dla wszystkich losowań.

Istnieje możliwość elastycznej modyfikacji gęstości prawdopodobieństwa zmiany cen oraz horyzontu czasowego przeprowadzanych analiz.

System zarządzania elektrownią wiatrową umożliwia również prognozy krótkookresowe wybranych zmiennych losowych z wykorzystaniem metody MC i może wspomagać funkcjonowanie elektrowni wiatrowej poprzez możliwość sprzedaży energii elektrycznej nie tylko na rynku konkurencyjnym, ale także na już funkcjonującym, Rynku Dnia Bieżącego Towarowej Giełdy Energii.

Literatura

1. Boczar T.: Energia wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania., PAK, Warszawa, 2007.
2. Chyliński A.: Metoda Monte Carlo w bankowości, Twigger S.A., Warszawa, 1999.
3. Głuszak A.: Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju w perspektywie operatora systemu przesyłowego. Stabilizacja bezpieczeństwa energetycznego Polski w okresie 2008-2020 (z uwzględnieniem perspektywy 2050) za pomocą mechanizmów rynkowych (ekonomiki) i innowacyjnych technologii - różne scenariusze rozwoju energetyki. Komitet Problemów Energetyki PAN, Warszawa, czerwiec 2008.
4. Główny Urząd Statystyczny, <http://www.stat.gov.pl>
5. Global Wind Energy Council, <http://www.gwec.net>
6. Manwell J., McGowan J., Rogers A.: Wind Energy Explained. Theory, Design and Application, University of Massachusetts, Amherst, USA, 2002.
7. Narodowy Bank Polski, <http://www.nbp.pl>
8. Popczyk J.: Rynek i innowacyjność- dwa współczesne filary zarządzania bezpieczeństwem energetycznym. Klaster 3x20. Stabilizacja bezpieczeństwa energetycznego Polski w okresie 2008- 2020 (z uwzględnieniem perspektywy 2050) za pomocą mechanizmów rynkowych (ekonomiki) i innowacyjnych technologii- różne scenariusze rozwoju energetyki. Komitet Problemów Energetyki PAN, Warszawa, 2008.
9. Radziejewicz W.: Modelowanie elektrowni wiatrowej w systemie elektroenergetycznym w otoczeniu rynkowym, rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Opole, 2009.
10. Radziejewicz W., Tomaszewski M.: Produkcja energii elektrycznej w elektrowni wiatrowej w zależności od potencjału wiatru na różnych wysokościach, XII Konferencja Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie, Zakopane, 2009.
11. Radziejewicz W., Tomaszewski M.: System informatyczny do analizy ekonomicznej elektrowni wiatrowej, Konferencja Informatyka ku przyszłości, Warszawa, 2010.
12. Towarowa Giełda Energii, <http://www.tge.pl>
13. Urząd Regulacji Energetyki, <http://www.ure.gov.pl>

Dr inż. Wojciech RADZIEWICZ
Instytut Elektrowni i Systemów Pomiarowych
Politechnika Opolska
ul. K. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole
tel.: (0-77) 400 62 15
email: radziejewicz@po.opole.pl



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego