POZNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ACADEMIC JOURNALS
No 70 Electrical Engineering 2012

Andrzej TOMCZEWSKI*

DOBÓR TURBIN WIATROWYCH DO PRACY W USTALONEJ LOKALIZACJI GEOGRAFICZNEJ Z ZASTOSOWANIEM ALGORYTMU OPTYMALIZACJI

W artykule przedstawiono koncepcję doboru zespołu turbin wiatrowych do pracy w lokalizacji geograficznej o znanych warunkach wietrzności wykorzystującą algorytm optymalizacji. Założonym celem rozwiązania postawionego zadania jest uzyskanie minimalnej ceny jednostkowej generowanej w układzie energii elektrycznej. Jako kryterium oceny jakości zaproponowano funkcję celu o charakterze techniczno - ekonomicznym. W związku z jej cechami (funkcja wielomodalna) w rozważaniach uwzględniono metodę optymalizacyjną o charakterze stochastycznym. Zaproponowano sposób zrównoleglenia zastosowanego algorytmu z wykorzystaniem procesorów wielordzeniowych.

1. WPROWADZENIE

Podstawowym powodem wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną jest rozwój techniczny i związane z tym stosowanie coraz większej liczby urządzeń elektrycznych. Konsekwencjami takiego stanu jest coraz wyższe zużycie pierwotnych surowców energetycznych, konieczność utrzymania wysokiej pewności dostaw energii oraz wprowadzanie do środowiska dużych ilości szkodliwych substancji – szczególnie dwutlenku węgla. Prowadzone od wielu lat badania doprowadziły do powszechnego wykorzystywania odnawialnych (alternatywnych) źródeł energii OZE. Ich coraz szersze stosowanie prowadzi do redukcji emisji dwutlenku węgla do środowiska, dywersyfikacji dostaw energii oraz ograniczenia zużycia węgla, ropy naftowej, gazu ziemnego itd. Wśród odnawialnych źródeł energii największe znaczenie praktyczne uzyskały elektrownie wiatrowe, solarne, biogazowe oraz geotermalne. Pomimo pewnych wad (niespokojny charakter generacji, wysokie koszty inwestycyjne) szczególnym zainteresowaniem energetyki zawodowej cieszą się turbiny wiatrowe co związane jest z dostępnością nośnika energii oraz dobrze opanowaną technologią wytwarzania i eksploatacji jednostek o mocach rzędu kilku MW łączonych często w farmy wiatrowe. W związku z różnorodnością dostępnych na rynku turbin wiatrowych o identycznych lub zbliżonych mocach znamionowych oraz

* Politechnika Poznańska.

złożonymi warunkami środowiskowymi pracy istotne jest, aby ich dobór do ustalonej lokalizacji geograficznej prowadził do efektywnego wykorzystania potencjału energetycznego i związanego z tym obniżenia ceny jednostkowej wytworzenia energii elektrycznej.

2. OPIS ZADANIA OPTYMALIZACJI

2.1. Warunki pracy turbiny wiatrowej

Turbina wiatrowa pracuje w trudnych warunkach środowiskowych. Poddawana jest oddziaływaniu różnych czynników atmosferycznych, z czego na poziom generowanej mocy wpływa stochastycznie zmieniająca się prędkość wiatru v_w. Generator turbiny napędzany jest dzięki przekształceniu energii kinetycznej wiatru A_w na ruch obrotowy wału połączonego z przetwornikiem – kołem wiatrowym [3].

Do ustalenia ilości, generowanej przez określony typ turbiny w okresie T, energii elektrycznej zastosowane mogą być, zależnie od posiadanych danych wejściowych, dwie podstawowe metody. Pierwsza z nich wykorzystuje opis statystyczny zmian prędkości wiatru w czasie realizowany z zastosowaniem rozkładu gęstości prawdopodobieństwa Weibulla o postaci [5]:

$$p_p(v_w) = \frac{k}{c}\left(\frac{v_w - \gamma}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_w-\gamma}{c}\right)^k} \tag{1}$$

gdzie: $p_p(v_w)$ – gęstość prawdopodobieństwa wystąpienia prędkości wiatru v_w, γ – współczynnik przesunięcia wyrażany w jednostkach zmiennej v_w (dla analizowanego przypadku $\gamma=0$), k – bezwymiarowy współczynnik kształtu ($k>0$), c – współczynnik skali wyrażany w jednostkach prędkości wiatru v_w ($c>0$).

Przy tak przyjętym opisie wartość oczekiwana energii wytworzonej w założonym okresie T przez określony typ turbiny opisywana jest zależnością:

$$E(A_s) = T \cdot \int_0^{v_{cut-out}} p_p(v_w) \cdot P_1(v_w) \cdot dv_w \tag{2}$$

gdzie $P_1(v_w)$ jest mocą generatora dla prędkości wiatru v_w ustaloną na podstawie charakterystyki wytwarzania $P_1=f(v_w)$ wybranego typu turbiny wiatrowej.

Dokładność powyższej metody uzależniona jest w znacznej mierze od sposobu ustalania wartości parametrów rozkładu (1) i może prowadzić do znacznych rozbieżności w stosunku do stanu rzeczywistego [6].

W przypadku znajomości danych pomiarowych zmian prędkości wiatru energię generowaną w okresie T można ustalić z zależności:

$$A_s = \sum_{i=0}^{N} (t_p^{(i+1)} - t_p^{(i)}) \cdot \left(\frac{P_1^{(i)} + P_1^{(i+1)}}{2}\right) \tag{3}$$

gdzie: $P^{(i)}_1$, $P^{(i+1)}_1$ – moce generatora odpowiadające prędkościom wiatru $v^{(i)}_w$ i $v^{(i+1)}_w$ odpowiednio w chwilach czasowych $t^{(i)}$ i $t^{(i+1)}$. Zakłada się przy tym, że prędkości $v^{(i)}_w$ są prędkościami średnimi z krótkich okresów pomiarowych, których długości nie powinny przekraczać kilkadziesiąt sekund [5].

Druga z przedstawionych metod, w porównaniu z zastosowaniem rozkładu Weibulla, pozwala ustalić wartość generowanej energii z wyższą dokładnością, wykorzystuje jednak dane pomiarowe z okresu przeszłego. Przeniesienie ustalonych wyników na okresy przyszłe wymaga wykorzystania metod przybliżonych np. ekstrapolacyjnych.

Dla rozpatrywanych metod ilość generowanej w okresie T energii elektrycznej wyznaczana jest z zastosowaniem charakterystyki wytwarzania turbiny $P_1=f(v_w)$ oraz parametrów prędkości wiatru na wysokości piasty koła wiatrowego. Wykorzystana w zależnościach (2) i (3) charakterystyka wytwarzania jest cechą złożonej konstrukcji turbiny wiatrowej i przedstawia zależność mocy generatora w funkcji prędkości wiatru $P_1=f(v_w)$ w przedziale od prędkości załączenia $v_{cut\text{-}in}$ do wyłączenia $v_{cut\text{-}out}$ turbiny. Drugi z wymienionych elementów związany jest z lokalizacją geograficzną (w tym ukształtowaniem terenu, rodzajem podłoża, występowaniem przeszkód np. lasów, budynków itp.). Na stochastyczny charakter warunków wiatrowych nakładają się dodatkowo trzy składowe deterministyczne: dobowa, roczna i wieloletnia co znacznie utrudnia prowadzenie analiz. Według normy IEC 61400-1 obowiązującej przy doborze turbiny do lokalizacji przyszłej elektrowni złożona stochastyczna natura zmian prędkości wiatru v_w w czasie sprowadzana jest do czterech klas wietrzności oraz dwóch klas turbulencji. Podstawowym parametrem jakie brane są pod uwagę jest średnia 10-cio minutowa prędkość wiatru. Należy zwrócić uwagę, że nie oddaje ona złożonych warunków wietrzności w ustalonej lokalizacji geograficznej. Znacznie dokładniej można to ustalić na podstawie przebiegów pomiarowych zmian prędkości wiatru, które powinny być realizowane na potrzeby każdej z projektowanych elektrowni wiatrowych. W związku z tym zastosowanie zaleceń normy IEC 61400-1 w zakresie doboru turbiny do określonej lokalizacji geograficznej nie jest zadowalające z punktu widzenia uzyskania maksymalnej efektywności generacji energii i związanej z tym minimalizacji kosztów jej produkcji.

3. PROPOZYCJA ALGORYTMU DOBORU ZESPOŁU TURBIN WIATROWYCH

3.1. Wprowadzenie, ekonomiczne aspekty optymalizacji

Zgodnie z opisem zawartym w punkcie 2 dobór zespołu turbin wiatrowych do określonej lokalizacji geograficznej powinien uwzględniać zdecydowanie szersze informacje o panujących warunkach wietrzności jak stosowane w normie IEC 61400 – 1. W celu realizacji tego zadania wskazane jest zastosowanie procesu

optymalizacyjnego uwzględniającego przebiegi pomiarowe zmian prędkości wiatru z określonej lokalizacji geograficznej, którego wynikiem jest zbiór turbin gwarantujący uzyskanie ekstremalnych wartości przyjętego kryterium oceny rozwiązania.

W zagadnieniach technicznych w kryterium oceny jakości rozwiązania wymagane jest często uwzględnienie kilku składników posiadających odmienny charakter. Istnieją wówczas problemy z ich bezpośrednim porównywaniem, a przede wszystkim z utworzeniem jednej, logicznie spójnej struktury pozwalającej porównywać różne rozwiązania. Realizacja tak postawionego problemu jest możliwa poprzez zastosowanie funkcji celu o charakterze ekonomicznym (najczęściej kosztowym) oraz przeniesienie kontroli parametrów technicznych do zbioru ograniczeń. Wykorzystanie funkcji celu o wymienionym charakterze ma także inne uzasadnienie – sprzedawane produkty muszą spełniać wymogi techniczne (normy, zalecenia itp.) i być przy tym tanie, niezawodne i energooszczędne, tak aby podwyższony popyt uzasadniał ponoszone na etapie projektowania, wdrożenia i produkcji koszty.

3.2. Funkcja celu, zmienne decyzyjne, ograniczenia

Do porównywania opłacalności inwestycji energetycznych w zakresie kosztów jednostkowych wytworzenia energii elektrycznej powszechnie stosowana jest metoda UNIPEDE (ang. International Union of Producers & Distributors of Electrical Energy). Zgodnie z jej założeniami ustalany jest wskaźnik zdyskontowanego kosztu jednostkowego wytwarzania energii elektrycznej k_j definiowany jako stosunek całkowitych zdyskontowanych kosztów budowy i eksploatacji elektrowni do zdyskontowanej ilości wyprodukowanej w tym okresie energii elektrycznej. Dla układów związanych tylko z generacją energii elektrycznej wskaźnik k_j zapisywany jest w postaci [7]:

$$k_j = \frac{K_i^{(0)} + \sum_{t=1}^{T_e} \left(K_e^{(t)} + A^{(t)} \cdot k_p^{(t)} \right) \cdot (1+p)^{-t}}{\sum_{t=1}^{T_e} A^{(t)} \cdot (1+p)^{-t}} \tag{4}$$

gdzie: p – stopa dyskontowa równa oprocentowaniu kredytów, t – indeks roku eksploatacji, $K^{(0)}_i$ – składowa kosztów inwestycyjnych ponoszonych w tzw. „roku zerowym”, $K_e^{(t)}$ – składowa kosztów eksploatacyjnych ponoszonych w roku t, $A^{(t)}$ – energia elektryczna wyprodukowana w roku t, $k_p^{(t)}$ – koszt paliwa zużytego do produkcji jednostki energii w roku t (dla turbin wiatrowych k_p=0), T_e – okres żywotności elektrowni (okres eksploatacji).

Czynnik dyskontujący $(1+p)^{-t}$ pozwala uwzględnić rozciągnięcie produkcji energii, uzyskiwanych z tego tytułu przychodów oraz kosztów eksploatacji na okres T_e lat z uwzględnieniem ustalonej stopy oprocentowania kredytów.

W pracy zakłada się, że zdefiniowany zależnością (4) wskaźnik zastosowany zostanie jako funkcja celu $J(\mathbf{x})$ w procesie optymalizacji doboru turbin wiatrowych do lokalizacji geograficznej o znanych warunkach wietrzności (znane przebiegi pomiarowe zmian prędkości wiatru). Ustalono, że wektor zmiennych decyzyjnych $\mathbf{x}$ obejmuje kolejno: x_1 – typ turbiny, x_2 – typ zastosowanej wieży (wysokość wieży h_w), x_3 – odległość między turbinami d_T (wpływa na koszty osprzętu dodatkowego), x_4 – wyrażoną w MW moc znamionową elektrowni P_{NE}. Na podstawie powyższego opisu stwierdzono, że część zmiennych niezależnych występuje w funkcji celu $J(\mathbf{x})$ w postaci niejawnej, co komplikuje ocenę jej charakteru. Koszty inwestycyjne obejmują wiele składników, z których najwyższy udział procentowy mają koszty zakupu, transportu i montażu turbin wiatrowych. W przypadku kosztów eksploatacyjnych istotne są przeglądy planowe (po określonej liczbie przepracowanych godzin), likwidacja awarii (ich częstość oraz zakres zmieniają się w funkcji lat eksploatacji układu), dzierżawy, koszty osobowe obsługi itd.

Zdefiniowane powyżej zadanie należy do grupy z ograniczeniami. Kontroli podlegają: moc znamionowa elektrowni P_{NE}, odległość między turbinami d_T oraz wysokość wieży h_w. Przedstawione ograniczenia należą do grupy nierównościowych i zostaną uwzględnione z zastosowaniem metody funkcji kary zewnętrznej [4]. Zmodyfikowana funkcja celu przyjmuje wówczas postać:

$$J_m(x) = J(x) + \rho^k \sum_{i=1}^{M} \max\left(0, g_i(x)\right)^2 \tag{5}$$

gdzie $g_i(\mathbf{x})$ są funkcjami ograniczeń nierównościowych (i=1,2,...,M), ρ jest bezwymiarowym współczynnikiem kary, natomiast k jest numerem iteracji.
Zakłada się, że wartości graniczne stosowane przy kontroli ograniczeń są danymi wejściowymi algorytmu. Celem unormowania przestrzeni ograniczeń wykorzystuje się przekształcenia prowadzące do ich bezwymiarowej postaci [4].

3.3. Wybór metody optymalizacyjnej, proponowany model informatyczny

Realizacja zadań optymalizacyjnych możliwa jest z zastosowaniem wielu metod podzielonych na trzy grupy algorytmów: deterministycznych, stochastycznych i hybrydowych. Wybór grupy, a następnie konkretnej metody uzależniony jest od kilku czynników, z których najważniejszymi są: postać wektora zmiennych decyzyjnych i funkcji celu, ograniczenia strukturalne i funkcjonalne oraz złożoność obliczeniowa procedur przeznaczonych do ustalania wartości zmodyfikowanej funkcji celu. Na podstawie analizy rozpatrywanego zadania, uwzględniając strukturę współczesnych jednostek przetwarzających, a

także możliwości języków programowania w zakresie rozproszenia procedur obliczeniowych, do rozwiązania przedstawionego w punkcie 2 problemu proponuje się wykorzystanie stochastycznej metody Monte Carlo.

Dokładność rozwiązania zadań optymalizacyjnych realizowanych z zastosowaniem metody Monte Carlo jest funkcją liczby losowań oraz sposobu generacji liczb losowych. W systemach komputerowych, zamiast fizycznych układów generacji liczb prawdziwie losowych, stosowane tzw. generatory pseudolosowe. Ich implementacja obejmuje formuły matematyczne, które na podstawie wartości początkowej (np. czasu systemowego) pozwalają wyznaczać szereg wartości o cechach określonego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa.

W przypadku wielu zadań optymalizacji globalnej zastosowanie najprostszej postaci algorytmu Monte Carlo prowadzić może do rozwiązań odległych od rzeczywistego ekstremum. Jest to związane z realizacją skończonej liczby losowań determinowanej czasem analizy i możliwościami jednostek przetwarzających. Celem poprawy efektywności metody podstawowej zalecana jest realizacja różnego typu modyfikacji oraz stosowanie rozproszenia obliczeń.

W związku z powyższym do realizacji zadania doboru zespołu turbin wiatrowych do lokalizacji geograficznej o znanych warunkach wietrzności proponuje się zastosowanie metody zmodyfikowanej o następującej strukturze:

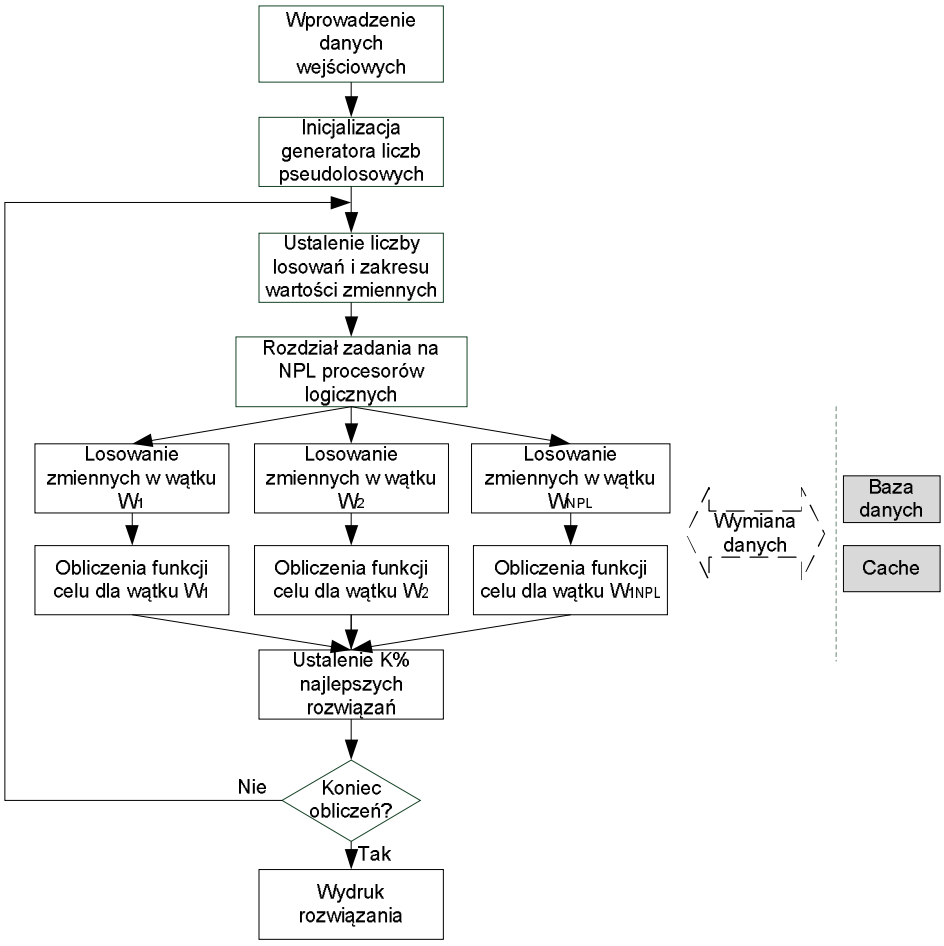
- z zastosowaniem klasycznego algorytmu Monte Carlo wyznaczany jest zbiór $R_1=\{J_m^{(1)}(\mathbf{x})\}$ N_1 rozwiązań – pierwsza iteracja,
- z elementów zbioru R_1 wydzielany jest podzbiór $R_2=\{J_m^{(2)}(\mathbf{x})\}$ składający się $N_2<N_1$ najlepszych rozwiązań,
- w otoczeniu każdego z elementów zbioru R_2 wykonane są losowania w nowej, lokalnej przestrzeni poszukiwań $X_i' \subset X$ (dla $i=1,2,..,N_2$), umożliwiające poprawę poprzednio uzyskanych wyników,
- proces powtarzany jest do uzyskania jednoelementowego zbioru R_k.

Jednym z istotnych elementów zaproponowanego algorytmu jest sposób ustalenia liczności podzbioru R_k w kolejnych iteracjach. Jedną z możliwości jest jej uzależnienie od wskaźnika względnej poprawy najlepszego rozwiązania oraz globalnego czasu analizy.

Celem przyspieszenia realizacji zadania proponowane jest wykorzystanie rozproszenia obliczeń z zastosowaniem wielordzeniowych procesorów przeznaczonych dla komputerów klasy PC. Losowanie zmiennych decyzyjnych oraz wyznaczanie wartości zmodyfikowanej funkcji celu rozporoszone zostaje na dostępne NPL procesory logiczne. Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy zaproponowanej, zmodyfikowanej metody Monte Carlo z uwzględnieniem NPL dostępnych do obliczeń procesorów logicznych.

Efektywna realizacja informatyczna przedstawionego powyżej algorytmu wymaga zastosowania szeregu mechanizmów programowych. Szczegółowe implementacje oraz uzyskiwane z ich wykorzystaniem efekty dla mechanizmów

wątków (klasa `Theard`), semaforów (klasa `Semaphor`) oraz generatora liczb pseudolosowych (klasa `Random`) przedstawiono szczegółowo w pracach [1,2]. Algorytm zakłada także współpracę procedur obliczeniowych z bazą danych przechowującą informacje o parametrach elektrycznych, mechanicznych i ekonomicznych turbin wiatrowych. Istotny wpływ na szybkość działania algorytmu ma wykorzystanie programowej struktury typu „pamięć podręczna" utworzonej z zastosowaniem listy generycznej `List`. Dzięki takiej strukturze rozwiązania dla wylosowanych wcześniej zmiennych decyzyjnych pobierane są wymienionej „pamięci podręcznej", bez konieczności uruchamiania ponownych obliczeń.



Rys. 1. Schemat blokowy zmodyfikowanej metody Monte Carlo z rozproszeniem obliczeń na NPL procesorów logicznych

4. PODSUMOWANIE

Energia generowana w okresie T przez turbinę wiatrową zależy od przebiegu zmian prędkości wiatru $v_w=f(t)$ oraz charakterystyki wytwarzania turbiny $P_1=f(v_w)$. Turbiny o identycznych lub zbliżonych mocach znamionowych, z punktu widzenia generacji energii, różnią się przede wszystkim przebiegiem wymienionej charakterystyki. Szczegółowy dobór turbiny do warunków wietrzności może zatem wpływać na efektywność wykorzystania zasobów energetycznych wiatru obniżając jednocześnie koszty jednostkowe generowanej energii.

Metoda doboru turbiny do warunków wietrzności ujęta w normie IEC 61400–1 bierze pod uwagę zbyt ogólne parametry. Decyzja o typie stosowanej turbiny powinna być poprzedzona szczegółowymi pomiarami prędkości wiatru – nie tylko ustaleniem wartości średniej 10 – cio minutowej. Przy obecnym stanie techniki obliczeniowej do tego typu zadań obliczeniowych powinny być stosowane algorytmy optymalizacyjne uwzględniające znacznie szersze aspekty pracy turbin w określonej lokalizacji jak norma IEC 61400-1.

W związku z charakterem proponowanej w referacie funkcji celu dalsze badania powinny objąć możliwość realizacji zdefiniowanego zadania optymalizacyjnego z zastosowaniem metod hybrydowych obejmujących metody populacyjne i deterministyczne.

LITERATURA

[1] Bednarek K., Kasprzyk L., Tomczewski A., Rozproszenie obliczeń elektromagnetycznych i optymalizacyjnych układów elektrycznych z zastosowaniem procesorów wielordzeniowych, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 2011, Nr 11b, ss. 82 – 85.

[2] Freeman A., Pro .NET 4 Parallel Programming in C#, Springer Verlang, 2010.

[3] Lubośny Z., Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym, WNT, Warszawa, 2006.

[4] Szeląg W., Analiza stanów pracy i synteza silników synchronicznych magnetoelektrycznych. Ujęcie polowe, Rozprawy 331, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998.

[5] Tomczewski A., Wykorzystanie kinetycznych magazynów energii do poprawy warunków współpracy turbiny wiatrowej z systemem elektroenergetycznym, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 2010, Nr 6, ss. 224 – 227.

[6] Tomczewski A., Selecting the Wind Turbine for a Particular Geographic Location using Statistical Methods, Zeszty Naukowe Politechniki Poznańskiej (referat przyjęty do druku).

[7] Zaporowski B., Analiza kosztów wytwarzania energii elektrycznej, Polityka Energetyczna, 2008, Tom 11, Zeszyt 1, ss. 531 – 542.

SELECTION OF WIND TURBINES FOR USE IN FIXED GEOGRAPHICAL LOCATION USING OPTIMIZATION ALGORITHM

The article presents the concept of set selection for wind turbines operating in the geographical location of known wind conditions using optimization algorithm. Established to solve the task in question is to obtain a minimum price per unit in the system-generated electricity. As a criterion for assessment of the proposed function of the technical-economic character. In connection with its characteristics (multimodal function) included in the consideration of a method for stochastic optimization. The method of parallelization of the algorithm by using multi-core processors was proposed.