

Bartosz Soliński

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

METODYKA OCENY RYZYKA ZASOBÓW ENERGETYCZNYCH WIATRU

1. Wstęp

Do właściwego podejmowania decyzji inwestycyjnych związanych z zagospodarowaniem i wykorzystaniem energii wiatru wymagana jest duża dokładność szacowania wielkości zasobów energetycznych. Zasoby te w sposób bezpośredni zależą od prędkości wiatru, której charakterystyczną cechą jest ciągła zmienność. Wielkość zasobów jest czynnikiem krytycznym decydującym o wyborze lokalizacji inwestycji i jej efektywności ekonomicznej. Zasoby energetyczne wiatru poprzez swą zmienność niosą więc ze sobą istotny element ryzyka inwestycyjnego. Wynika z tego, że wykorzystanie zasobów energii wiatrowej jest związane z ponoszeniem ryzyka wynikającego z samej ich natury, a ryzyko związane z zasobami energetycznymi powinno być należycie oszacowane.

W pracy przedstawiono metodykę umożliwiającą zarówno ocenę zasobów energetycznych wiatru w długim horyzoncie czasowym, jak i wyznaczenie ryzyka zasobów energetycznych wiatru. **Ryzyko zasobów energetycznych** w tej pracy rozumiane jest jako możliwość uzyskania wielkości zasobów energetycznych niezgodnych z oczekiwaniami i dotyczy sytuacji, w której nie można być absolutnie pewnym, jak ukształtują się w przyszłości wielkości tych zasobów, których wielkość może być zarówno większa jak i mniejsza od oczekiwanych.

W literaturze przedmiotu podejście oceny ryzyka zasobów energetycznych nie jest zbyt szeroko omawiane, a jako metody jego minimalizacji stosuje się wydłużanie okresu badań zasobów i zakładania marginesu błędu, np. 10% wielkości zasobów [Soliński 1999; Hau 2000].

2. Parametry charakteryzujące zasoby energetyczne wiatru

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi zasoby energetyczne wiatru są: prędkość wiatru, kierunek wiatru, pionowy profil wiatru i gęstość powietrza. Parametry te różnicują zasoby energetyczne w skali zarówno geograficznej (lokalizacyjnej), jak i skali czasu (opisującej różnice i zmiany tej energii w kolejnych godzinach, dniach, miesiącach, porach roku i kolejnych latach) (por. [Soliński 2004]). Zależność tę przedstawia wzór na **gęstość mocy wiatru** (P_w) [W/m^2] informujący o wielkości mocy przypadającej na m^2 powierzchni i **potencjał energetyczny wiatru** (E_p) [$kWh/m^2/rok$], wyrażający możliwość do uzyskania w ciągu jednego roku energii z m^2 powierzchni przepływającego powietrza:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho V^3, \quad (1)$$

$$E_p = 8,76 \cdot P_w, \quad (2)$$

gdzie: ρ – gęstość powietrza [kg/m^3], V – prędkość wiatru [m/s].

Prędkość wiatru wzrasta także wraz z wysokością n.p.g. Wielkość tych zmian (profil wiatru) jest zależna m.in. od rodzaju pokrycia terenu, warunków stabilności atmosfery i jest opisywana przez pionowy profil wiatru. Należy dodatkowo nadmienić, że część wymienionych parametrów może być przyjmowana deterministycznie – taka sytuacja występuje w przypadku gęstości powietrza i pionowego profilu wiatru (dla danej lokalizacji).

3. Zmienność zasobów energetycznych wiatru

Zasoby energetyczne wiatru ulegają ciągłym zmianom. Zmienność ta jest widoczna zarówno w ciągu kolejnych sekund, minut godzin, jak i poszczególnych miesięcy czy też lat. Do oceny zasobów konieczne jest więc dysponowanie danymi wieloletnimi, które mogą być dopiero w miarę rzeczywistym odpowiednikiem długookresowych zasobów energetycznych wiatru na danym terenie. Jednak ten typ zmienności zasobów energetycznych wiatru jest szczególnie trudny do przewidzenia. Badania zmienności przeprowadzone w Europie wykazały, że z dekady na dekadę można spodziewać się zmiany energii wiatru sięgającej 30% [Troen, Petersen 1989]. Badania wykonane przez Gerdesa i Stracka [1999] przez 6 lat (dla elektrowni o mocy 600 kW) wykazały silne odchylenie produkcji energii w poszczególnych latach od średniej sześciolletniej sięgające od -10% do $+6\%$. W badaniach autora, w których analizowano zmienność warunków wiatrowych w ciągu kilkunastu lat w wybranych lokalizacjach na terenie Polski i Holandii, wykazano, że zmienność średniej prędkości wiatru w kolejnych latach, w maksymalnych zakresach, sięga od -25% do $+26\%$ w lokalizacjach na terenie Polski i od -11% do $+16\%$ na terenie Holandii.

4. Oceny ryzyka zasobów energetycznych wiatru

Zaprezentowana metodyka opiera się na analizie zmienności prędkości wiatru, wykorzystując zarejestrowane w długim okresie czasu dane pomiarowe. Składa się z kilku etapów, które przedstawiono na schemacie (rys. 1). W metodyce tej dokonano następujących założeń:

- głównym parametrem decydującym o zasobach energetycznych wiatru jest prędkość przepływającego powietrza (prędkość wiatru),
- prędkość wiatru może być traktowana jako zmienna szeregu czasowego V_t reprezentująca ciąg wartości obserwowanych w kolejnych jednostkach czasu,
- prędkości wiatru uśredniana się godzinowo lub 10-minutowo,
- za okresy jednorodne $t_A - t_B$, uznano okresy roczne – zawierające realizację zmiennej losowej $v_t (v_{t_A}, \dots, v_{t_B})$,
- za rozkład gęstości prawdopodobieństwa $f(v)$ prędkości wiatru przyjęto rozkład Weibulla $f(v; \Theta^A, \Theta^k)$,
- wartości estymowanych parametrów $\hat{\Theta}_1^i, \dots, \hat{\Theta}_l^i$ w okresach jednorodnych traktowane są jako zmienne losowe G , ponieważ ulegają one ciągłym zmianom w czasie, a konkretną wartość zmiennej przyjmowaną w czasie t dla i -tego parametru można wtedy oznaczyć jako g_{it} , która będzie odpowiadać wartości $\hat{\Theta}_i^i$,
- za funkcję gęstości prawdopodobieństwa $g_i(\Theta^i)$ charakteryzującą zachowanie estymatora i -tego parametru przyjęto rozkład normalny $N\left(\Theta_m^i, \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}}\right)$ (na podstawie centralnego twierdzenia granicznego).

4.1. Podział danych na okresy jednorodne

W pierwszej kolejności serię danych zawierającą prędkości wiatru należy podzielić na n szeregów zawierających prędkości wiatru v_{it} z danego roku t – który określa się mianem okresu jednorodnego.

4.2. Estymacja parametrów rozkładu prędkości wiatru

Następnie, z wykorzystaniem jednej z metod estymacji parametrów rozkładu (np. metodę najwyższej wiarygodności), zostają oszacowane parametry rozkładu Weibulla – A_t i k_t – dla wartości prędkości wiatru v_{it} w poszczególnych latach t według wzoru:

$$f(v_t) = \frac{k_t}{A_t} \left(\frac{v_{it}}{A_t} \right)^{k_t-1} \exp \left[- \left(\frac{v_{it}}{A_t} \right)^{k_t} \right], \quad (3)$$

gdzie: v_{it} – prędkości wiatru i w roku t , A_t – parametr skali dla roku t , k_t – parametr kształtu dla roku t .

Pożądane jest, by estymator miał określone własności – zgodności, nieobciążoności, efektywności i wystarczalności – gwarantujące uzyskiwanie ocen bliskich prawdziwej wartości szacowanego parametru (por. [Fisz 1969; Hellwig 1991]).

4.3. Utworzenie szeregów estymowanych parametrów rozkładu Weibulla

W wyniku estymacji parametrów Weibulla dla poszczególnych lat zostaje stworzony szereg wartości estymowanych parametrów A i k – $A_1, A_2, \dots, A_n$ i $k_1, k_2, \dots, k_n$. Cechą charakterystyczną tych parametrów jest fakt, że ulegają one ciągłym zmianom w czasie, można więc je traktować jako zmienne losowe A i k . Konkretną wartość zmiennej przyjmowaną w czasie t można wtedy oznaczyć jako A_t i k_t . W analizie zakłada się, że estymowane parametry A i k zachowują się w ciągu kolejnych lat w sposób losowy, zgodny z założonym *a priori* rozkładem normalnym (na podstawie centralnego twierdzenia granicznego).

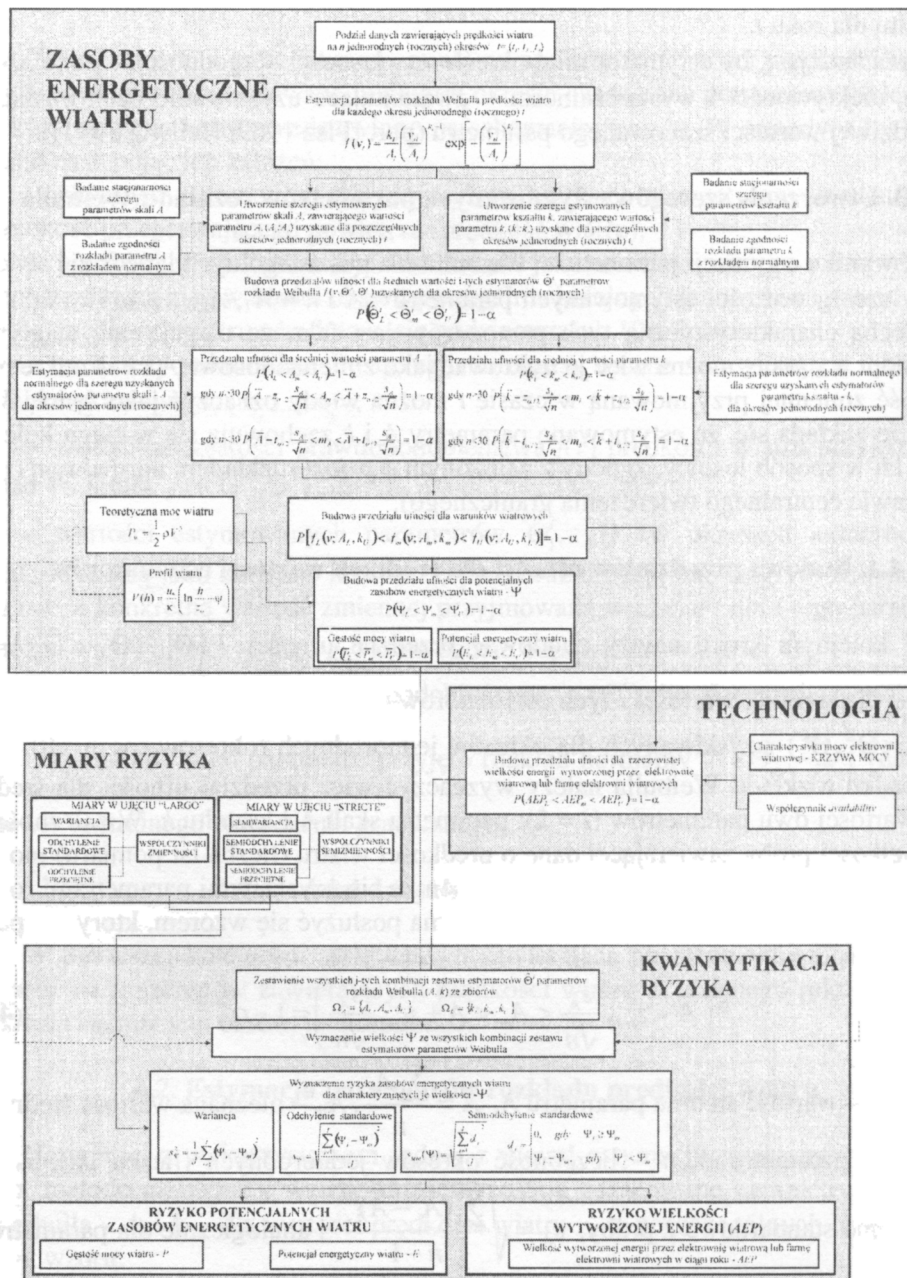
4.4. Budowa przedziałów ufności dla średnich wartości estymatorów

W kolejnym kroku należy zbudować przedział ufności $P(\hat{\Theta}_L^i < \hat{\Theta}_m^i < \hat{\Theta}_U^i) = 1 - \alpha$ dla średniej wartości i -tych estymatorów $\hat{\Theta}^i$ parametrów rozkładu Weibulla $f(v; \Theta^A, \Theta^k)$ uzyskiwanych dla okresów jednorodnych (okresów rocznych). W przypadku rozkładu Weibulla należy wyznaczyć więc przedział ufności dla średniej wartości dwu parametrów ($i = 2$): parametru skali A i kształtu k . W zależności od wielkości próby zawierającej dane o prędkości wiatru (liczba lat pomiaru) można posłużyć się statystyką z lub t . Gdy dysponuje się uzyskanymi parametrami rozkładu Weibulla z kolejnych lat ($n > 30$), można posłużyć się wzorem, który dla parametru A przyjmie postać:

$$P\left(\bar{A} - z_{\alpha/2} \frac{s_A}{\sqrt{n}} < A_m < \bar{A} + z_{\alpha/2} \frac{s_A}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha, \quad (4)$$

gdzie: $\bar{A}$ – wartość średnia parametru A , $\bar{A} = \frac{\sum A_t}{n}$, A_m – nieznana wartość średnia populacji parametru A , n – liczebność okresów jednorodnych (liczba lat), s_A – odchylenie standardowe z próby, $s_A = \sqrt{\frac{\sum (A_t - \bar{A})^2}{n-1}}$ i analogicznie dla parametru k , wzór (4) przyjmie postać:

$$P\left(\bar{k} - z_{\alpha/2} \frac{s_k}{\sqrt{n}} < k_m < \bar{k} + z_{\alpha/2} \frac{s_k}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha. \quad (5)$$



Rys. 1. Schemat postępowania w metodyce oceny ryzyka zasobów energetycznych wiatru
Źródło: opracowanie własne.

Gdy dysponuje się uzyskanymi parametrami rozkładu Weibulla dla $n < 30$ wykorzystuje się wzory (4 i 5), jednak zamiast statystyki z wykorzystuje się statystykę t -studenta, podstawiając do wzoru wartość $t_{\alpha/2}$ za $z_{\alpha/2}$.

Po wyznaczeniu przedziału ufności otrzymuje się wartości A_L , A_m , A_U i można stwierdzić, że z prawdopodobieństwem $1 - \alpha$ rzeczywista średnia wartość parametru A zawiera się w przedziale $(A_L; A_U)$, analogicznie dla parametru kształtu k otrzymano wartości k_L , k_m , k_U i przedział $(k_L; k_U)$. Wyznaczono więc parametry rozkładu Weibulla, które opisują populację wiatru w danej lokalizacji.

4.5. Budowa przedziału ufności dla warunków wiatrowych

Wybierając graniczne warianty z przedziałów ufności dla parametrów A i k , uzyskuje się przedział ufności:

$$P[f_L(v; A_L, k_U) < f_m(v; A_m, k_m) < f_U(v; A_U, k_L)] = 1 - \alpha, \quad (6)$$

który będzie reprezentował z prawdopodobieństwem $1 - \alpha$ warunki wiatrowe panujące w danej lokalizacji. Warunki oczekiwane w danej lokalizacji zostają więc opisane przez zestawienie parametrów A_m i k_m – $f_m(v; A_m, k_m)$, które według rozkładu gęstości prawdopodobieństwa Weibulla ma postać:

$$f_s(v) = \frac{k_m}{A_m} \left(\frac{v}{A_m} \right)^{k_m-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{A_m} \right)^{k_m} \right]. \quad (7)$$

Górna granica przedziału ufności opisująca najkorzystniejsze warunki wiatrowe zostaje opisana przez zestawienie parametrów A_U i k_L i opisana jest analogicznie rozkładem Weibulla o tych parametrach $f_U(v; A_U, k_L)$. Natomiast dolna granica opisująca najmniej korzystne warunki przez zestawienie parametrów A_L i k_U i opisana jest rozkładem Weibulla o tych parametrach $f_L(v; A_L, k_U)$.

4.6. Budowa przedziałów ufności dla potencjalnych zasobów energetycznych i wielkości energii wytworzonej przy zastosowaniu danej turbiny wiatrowej

Znając moc teoretyczną wiatru (1) oraz rozkład prędkości wiatru $f(v)$ opisany przez odpowiednie zestawienie parametrów funkcją gęstości prawdopodobieństwa Weibulla, można wyznaczyć przedział ufności $P(\Psi_L < \Psi_m < \Psi_U) = 1 - \alpha$ dla odpowiednich wielkości Ψ charakteryzujących zasoby energetyczne wiatru poprzez średnią gęstość mocy wiatru, potencjał energetyczny czy też AEP (wielkość uzyskanej w ciągu roku energii).

Przedział ufności dla średniej wartości gęstości mocy wiatru ma postać $P(\bar{P}_L < \bar{P}_m < \bar{P}_U) = 1 - \alpha$ i jest wyrażony w $[W/m^2]$. Wartość średnia przedziału

ufności reprezentująca oczekiwaną średnią wartość gęstości mocy występującą w danej lokalizacji $\bar{P}_m$, opisana jest wzorem:

$$\bar{P}_m = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v; A_m, k_m) dv \quad (8)$$

i analogicznie górna granica przedziału ufności reprezentująca najwyższą średnią wartość gęstości mocy $\bar{P}_U$, występującą w danej lokalizacji, opisana jest wzorem (8), w którym warunki wiatrowe opisane są przez kombinację parametrów $f_U(v; A_U, k_U)$. Natomiast dolna wartość przedziału ufności $\bar{P}_L$, reprezentująca najniższą wartość średniej gęstości mocy występującą w danej lokalizacji, opisana jest wzorem (8) z rozkładem Weibulla $f_L(v; A_L, k_U)$.

Po uwzględnieniu czasu – 8760 godzin w ciągu roku – można wyznaczyć przedziały ufności dla potencjału energetycznego wiatru (2) dla danej lokalizacji $P(E_L < E_m < E_U) = 1 - \alpha$ w [kWh/m²/rok], analogicznie jak dla średniej gęstości mocy, poprzez wymnożenie wielkości (8) przez 8,76. W przypadku uwzględnienia krzywej mocy elektrowni wiatrowej opisanej przez funkcję $p(v)$ oraz liczbę godzin przepracowanych w ciągu roku (8760 godzin) można także wyznaczyć przedział ufności dla wielkość wytworzonej energii elektrycznej przez daną elektrownię wiatrową $P(AEP_L < AEP_m < AEP_U) = 1 - \alpha$ wyrażony w [GWh/rok].

4.7. Ocena ryzyka zasobów energetycznych wiatru

Wyznaczenie ryzyka związanego ze zmiennością zasobów energetycznych wiatru dotyczy ryzyka zarówno jego potencjalnych zasobów energetycznych przedstawianych przez gęstość mocy wiatru i potencjał energetyczny, jak i ryzyka wielkości energii wytworzonej przy zastosowaniu danej technologii przedstawianych przez AEP .

Jako miary ryzyka zasobów energetycznych wiatru mogą być wykorzystane statystyczne miary ryzyka, które zostały przedstawione m.in. w pracach [Jajuga, Jajuga 1998; Zeliaś i in. 1998]. Miary te można podzielić na dwie grupy według podejścia do ryzyka. W pierwszej grupie ryzyko traktowane jest jako możliwość wystąpienia efektu niezgodnego z oczekiwaniami, akcentując zarówno pozytywne, jak i negatywne skutki jego oddziaływania, a w drugiej – jako możliwość wystąpienia efektu gorszego niż oczekiwany. Do pierwszej grupy można zaliczyć m.in. takie miary, jak: wariancję, odchylenie standardowe oraz odchylenie przeciętne, a do drugiej grupy – m.in. miary: semiwariancji, semiodchylenia standardowego i semiodchylenia przeciętnego.

Przy wyznaczaniu wartości ryzyka wydaje się celowe zastosowanie wszystkich j -tych kombinacji estymatorów $\hat{\Theta}^i$ parametrów rozkładu $f(z; \Theta^i, \dots, \Theta^N)$ z odpowiednich zbiorów $\Omega^i = \{\hat{\Theta}_L^i, \hat{\Theta}_m^i, \hat{\Theta}_U^i\}$ dla każdego z parametrów i związanych nimi wielkości Ψ prezentujących gęstości mocy wiatru, potencjał energetyczny i AEP . Dla rozkładu We-

ibulla ze zbiorów estymatorów parametrów A i k , $\Omega_A = \{A_L, A_m, A_U\}$ oraz $\Omega_k = \{k_L, k_m, k_U\}$ uzyskuje się dziewięć kombinacji ($J = 9$) parametrów i dziewięć związanych z nimi wielkości Ψ . Wszystkie uzyskane kombinacje posłużą do wyznaczenia ryzyka zasobów energetycznych wyrażonego dla danej wielkości Ψ (średniej gęstości mocy, potencjału energetycznego, AEP) wyliczonej ze wzorów: odpowiednio na wariancję, odchylenie standardowe i semiodchylenie standardowe:

$$s_{\Psi}^2 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (\Psi_j - \Psi_m)^2, \quad (9)$$

$$s_{\Psi} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^J (\Psi_j - \Psi_m)^2}{J}}, \quad (10)$$

$$s_{sem}(\Psi) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^J d_j^2}{J}}, \quad (11)$$

w których: d_j – ujemne odchylenia od wartości średniej Ψ_m określone wzorem:

$$d_j = \begin{cases} 0, & \text{gdy } \Psi_j \geq \Psi_m \\ \Psi_j - \Psi_m, & \text{gdy } \Psi_j < \Psi_m \end{cases}. \quad (12)$$

5. Wnioski

W sektorze energetyki wiatrowej występuje wysokie uzależnienie efektywności energetycznej od zmiennych w czasie zasobów energetycznych wiatru. Opracowana metodyka oceny ryzyka umożliwia m.in.:

- wyznaczenie zmienności zasobów energetycznych w ciągu dłuższego okresu,
- oszacowanie ryzyka zasobów,
- szybkie przeprowadzenie obliczeń porównawczych wielkości energii i związanej z nimi wielkości ryzyka przy zastosowaniu różnych technik/technologii,
- analizę ryzyka w odpowiednich modelach meteorologicznych poprzez adaptację do metod microsite'ingu,
- łatwą implementację do metodyk kwantyfikacji ryzyka inwestycyjnego, dzięki czemu możliwa jest transformacja ryzyka zasobów na ryzyko inwestycyjne.

Literatura

- Fisz M. (1969), *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna*, PWN, Warszawa.
- Gerdes G., Strack M. (1999), *Long-term Correlation of Wind Measurement Data*, „DEWI Magazine” nr 15, August.
- Hau E. (2000), *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application and Economics*, Springer, Berlin.
- Hellwig Z. (1991), *Elementy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej*, PWN, Warszawa.
- Jajuga K., Jajuga T. (1998), *Inwestycje. Instrumenty finansowe, ryzyko finansowe, inżynieria finansowa*, PWN, Warszawa.
- Soliński B. (2004), *Wpływ parametrów energetycznych wiatru i elektrowni wiatrowej na wielkość wytworzonej energii elektrycznej*, materiały Szkoły Gospodarki Odpadami, 15-18 czerwca, Kraków-Rytro.
- Soliński I. (1999), *Efekty energetyczne i ekonomiczne wykorzystania energii wiatrowej*, Wyd. Instytutu GSMiE PAN, Kraków.
- Zeliaś A. i in. (1998), *Statystyczne metody oceny ryzyka w działalności gospodarczej*, AE, Kraków.
- Troen I., Petersen E.L. (1989), *European Wind Atlas*, Risoe National Laboratory, Denmark.

WIND ENERGY RESOURCES RISK EVALUATION METHODOLOGY

Summary

The methodology of wind energy resources risk evaluation presented in the paper was based on the probabilistic distribution function analysis of wind velocity random variable $V - f(v; \Theta^A, \Theta^k)$ – which parameters Θ^A, Θ^k , characterize the amounts of these resources. The estimators of these distribution functions parameters $\hat{\Theta}_1^A, \dots, \hat{\Theta}_t^A$ are being treated as random variables in homogeneous periods because they are changing during following periods of time. Thus, they significantly influence on changeability of these resources amounts. Taking into consideration these parameters changeability $f[v; f(\Theta^A), f(\Theta^k)]$ allows to evaluate the wind energy resources, as well the risk connected with application of resources representative for long period of time.