

PRODUKCJA ENERGII ELEKTRYCZNEJ W ELEKTROWNI WIATROWEJ W ZALEŻNOŚCI OD POTENCJAŁU WIATRU NA RÓŻNYCH WYSOKOŚCIACH

Wojciech RADZIEWICZ

Streszczenie: Prędkość wiatru ma kluczowe znaczenie dla podejmowania decyzji o budowie elektrowni wiatrowej w danej lokalizacji. Analiza wykazuje, że prędkość wiatru wzrasta znacząco wraz z wysokością. Przy podejmowaniu decyzji o inwestycji w postaci budowy farmy wiatrowej niezbędnym wydaje się określenie prędkości wiatru na wysokości usytuowania gondoli turbozespołów wiatrowych. Pomocnym narzędziem może być autorskie oprogramowanie PGM 1.0 umożliwiające oszacowanie przebiegu prędkości wiatru na dowolnej wysokości przy posiadanych pomiarach przebiegu prędkości wiatru na niższej wysokości.

Słowa kluczowe: produkcja energii, prędkość wiatru, elektrownia wiatrowa, wspomaganie decyzji, analiza przychodów, wysokość wykonywania pomiarów.

1. Wprowadzenie

Występowanie wiatru ma charakter stochastyczny. Prędkość wiatru natomiast w dużej mierze zależy od ukształtowania terenu (szorstkości) oraz od wysokości nad powierzchnią tego terenu. W literaturze spotkamy różne definicje szorstkości terenu w zależności od jego ukształtowania. Według [3] najczęściej wyróżnia się trzy rodzaje szorstkości terenu:

- Otwarty (z nielicznymi przeszkodami o małej wysokości),
- Wiejski (z zabudową niską lub teren zalesiony),
- Miejski (z zabudową wysoką).

Tab. 1. Charakterystyka klas szorstkości terenu, wysokości wiatru gradientowego H_G oraz wartości wykładnika potęgowego α w zależności od współczynnika szorstkości K [2, 3]

Klasa szorstkości i	Wysokość wiatru gradientowego H_G [m]	Współczynnik szorstkości K	Wykładnik potęgowy α	Opis terenu
0	300	0,005	0,150	Teren płaski otwarty, na którym wysokość nierówności jest mniejsza od 0,5 m
1	330	0,007	0,165	Teren płaski otwarty lub nieznacznie pofalowany. Mogą występować pojedyncze zabudowania lub drzewa w dużych odległościach od siebie

2	360	0,010	0,190	Teren płaski lub pofalowany z otwartymi dużymi przestrzeniami. Mogą występować grupy drzew lub niska zabudowa w znacznej odległości od siebie.
3	400	0,015	0,220	Teren z przeszkodami, tj. tereny zalesione, przedmieścia większych miast oraz małe miasta, tereny przemysłowe luźno zabudowane.
4	440	0,025	0,270	Teren z licznymi przeszkodami w niedużej odległości od siebie, tj. skupiska drzew, budynków w odległości min. 300 m od miejsca obserwacji.
5	500	0,035	0,350	Teren z licznymi dużymi przeszkodami położonymi blisko siebie, obszary leśne, centra dużych miast.

W Europie Zachodniej dominuje cztero- stopniowa skala szorstkości terenu, uwzględniająca wysokości przeszkód, ich przekroje poprzeczne i powierzchnie rzutów poziomych. Dla celów energetyki wiatrowej [1] proponuje bardziej szczegółową- sześć stopniową skalą szorstkości terenu. Klasa szorstkości 0 oznacza teren płaski otwarty, pod względem ukształtowania idealny dla celów energetyki wiatrowej. Klasy szorstkości: 4 i 5 oznaczają teren z wieloma przeszkodami, często wysokimi, które utrudniają dobrą lokalizację elektrowni wiatrowej.

2. Zależność prędkości wiatru od wysokości

Prędkość wiatru rośnie wraz z wysokością. Badania dowiodły, że zmiana prędkości wiatru nad podłożem rośnie tylko do pewnej wysokości określonej mianem wysokości wiatru gradientowego H_G , która zależy od klasy szorstkości terenu [4]. Obecnie nie ma jeszcze na świecie elektrowni wiatrowej, która osiągałaby najniższą wysokość wiatru gradientowego, czyli 300 m. nad poziomem gruntu.

Prędkości wiatru w funkcji wysokości określa wyznaczona doświadczalnie zależność [4]:

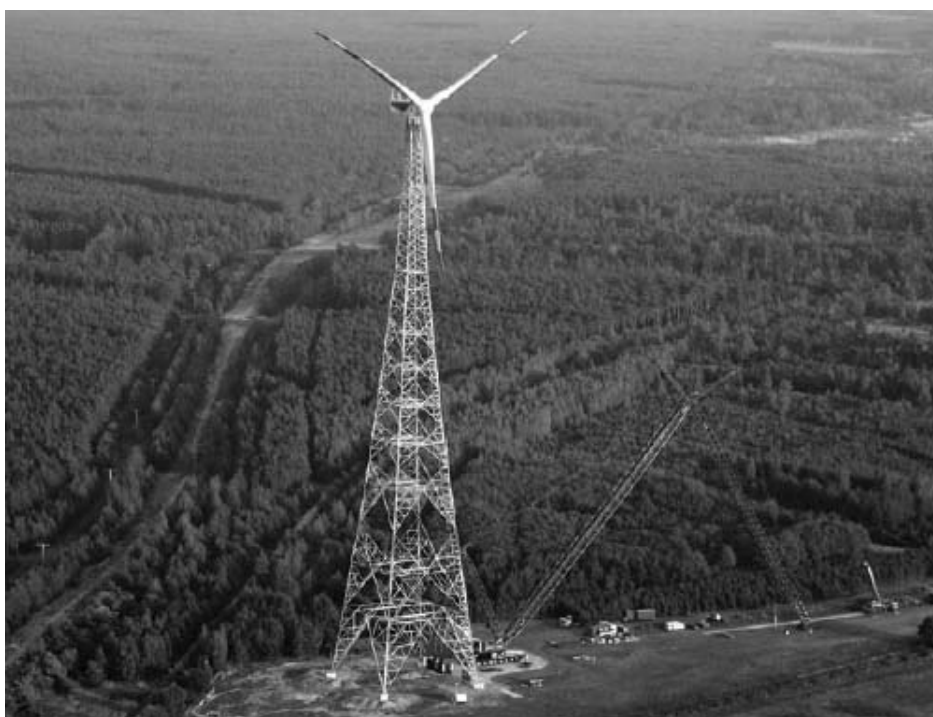
$$V_h = V_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad (1)$$

gdzie:

- V_h - prędkość wiatru obliczona na wysokości h ,
- V_o - prędkość wiatru zmierzona na wysokości h_o ,
- h_o - wysokość usytuowania wiatromierza dla pomiarów prędkości wiatru V_o ,
- h - wysokość, dla której oblicza się prędkość wiatru V_h ,
- α - wykładnik potęgowej zależny od klasy szorstkości terenu, określony na drodze doświadczalnej.

Na podstawie powyższej funkcji potęgowej można wyznaczyć prędkość wiatru na dowolnej wysokości mając dane pomiary prędkości wiatru na wysokości niższej. Należy zwrócić uwagę, że wykładnik potęgowej α został wyznaczony w sposób doświadczalny

i zależy on od współczynnika szorstkości terenu K . Dlatego otrzymane wyniki prędkości wiatru powinny być traktowane jako przybliżone. Wyniki badań prowadzonych przez H. Lorenca i opisane w [2] potwierdzają dużą zgodność obliczeń z rzeczywistymi pomiarami. Jednak pewność (obarczona jedynie błędami pomiaru) przebiegu prędkości wiatru w funkcji wysokości daje zainstalowanie wiatromierza na oczekiwanej wysokości gondoli turbozespołu wiatrowego. Jest to jednak przedsięwzięcie kosztowne ze względu na wysokość najnowszych elektrowni wiatrowych. Obecnie najwyższą na świecie elektrownią wiatrową jest usytuowana w Laasow, 20 km od Cottbus (Niemcy), mierząca 160 metrów wysokości elektrownia o mocy zainstalowanej 2,5 MW.



Rys. 1. Najwyższa na świecie elektrownia wiatrowa zbudowana w 2007 roku w Laasow (Niemcy) [5]

3. Potencjał energetyczny wiatru na różnych wysokościach

Wzrost prędkości wiatru V związany ze wzrostem wysokości powoduje również znaczny przyrost energii wiatru, która zależy od prędkości V w trzeciej potęgze. Wielkość energii wiatru w funkcji wysokości określa funkcja potęgowa [140]:

$$E_h = E_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^{3\alpha} \quad (2)$$

gdzie:

- E_h - energia wiatru obliczona dla wysokości h ,
- E_o - energia wiatru na wysokości h_o ,

- h_o - wysokość usytuowania wiatromierza dla pomiarów prędkości wiatru V_o ,
- h - wysokość, dla której oblicza się energię wiatru E_h ,
- α - wykładnik potęgowy zależny od klasy szorstkości terenu, określony na drodze doświadczalnej.

Według [5] usytuowanie gondoli turbosespołu wiatrowego na wysokości 160 m. nad poziomem gruntu umożliwi zwiększenie energii wiatru od 35% do 45% w odniesieniu do takiego samego turbosespołu umieszczonego na wysokości 100 m.

4. Produkcja energii elektrycznej w elektrowni wiatrowej w zależności od prędkości wiatru i wysokości usytuowania gondoli

Produkcja energii elektrycznej w elektrowni wiatrowej uzależniona jest od wielu czynników, takich jak: konstrukcja wirnika, powierzchnia omiatania wirnika, sprawność elektryczna i mechaniczna turbiny. Jednak największe znaczenie mają warunki atmosferyczne, głównie prędkość wiatru V , która zależy także od wysokości usytuowania gondoli turbosespołu wiatrowego.

Rzeczywistą ilość energii produkowanej przez turbosespół wiatrowy określić można jako następującą funkcję warunkową [7]:

$$E_R = \begin{cases} \frac{1}{2} \int_0^t C_e \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot s \, dt & \text{dla } V \in [V_a, V_b) \\ \int_0^t P_{\max} \cdot s \, dt & \text{dla } V \in [V_b, V_c) \\ 0 & \text{dla } V \in [0, V_a) \cup [V_c, \infty) \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

- C_e - sprawność elektryczna turbosespołu wiatrowego (%) uwzględniająca sprawność aerodynamiczną turbosespołu oraz sprawność generatora,
- ρ - gęstość powietrza zależna od ciśnienia powietrza i jego temperatury,
- A - powierzchnia omiatana wirnikiem turbosespołu wiatrowego,
- V - prędkość wiatru,
- P_{\max} - wyjściowa moc maksymalna turbosespołu wiatrowego dla nominalnej prędkości wiatru,
- s - współczynnik strat,
- V_a - minimalna początkowa prędkość wiatru potrzebna do uruchomienia turbiny,
- V_b - nominalna prędkość wiatru umożliwiająca uzyskanie mocy maksymalnej,
- V_c - graniczna prędkość wiatru powodująca zatrzymanie turbiny (funkcja stop),
- t - czas pracy turbosespołu wiatrowego.

Pomiary wiatru na dużych wysokościach są kosztowne ponieważ wymagają solidnej konstrukcji masztu. Dlatego często zdarza się, że roczne przebiegi prędkości wiatru rejestrowane są na wysokości dużo niższej niż planowana wysokość usytuowania gondoli turbosespołu wiatrowego. Można oszacować rzeczywistą ilość energii, która może być wyprodukowana w elektrowni wiatrowej mając pomiary prędkości wiatru na dowolnej wysokości.

Jeżeli zostanie uwzględniona zmienność prędkości wiatru V w zależności od wysokości nad poziomem gruntu, ale poniżej wysokości wiatru gradientowego H_G , to wówczas rzeczywistą ilość produkowanej energii w elektrowni wiatrowej E_R określa następująca zależność:

$$E_R = \begin{cases} \frac{1}{2} \int_0^t C_e \cdot \rho \cdot A \cdot V_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^{3\alpha} \cdot s \, dt & \text{dla } V \in [V_a, V_b) \\ \int_0^t P_{\max} \cdot s \, dt & \text{dla } V \in [V_b, V_c) \\ 0 & \text{dla } V \in [0, V_a) \cup [V_c, \infty) \end{cases} \quad (4)$$

gdzie:

- V_o - prędkość wiatru zmierzona na wysokości h_o ,
- h_o - wysokość usytuowania wiatromierza dla pomiarów prędkości wiatru V_o ,
- h - wysokość, dla której oblicza się rzeczywistą ilość produkowanej energii E_R ,
- α - wykładnik potęgowy zależny od klasy szorstkości terenu, określony na drodze doświadczalnej.

5. Symulacje produkcji energii elektrycznej w elektrowni wiatrowej w zależności od wysokości usytuowania gondoli

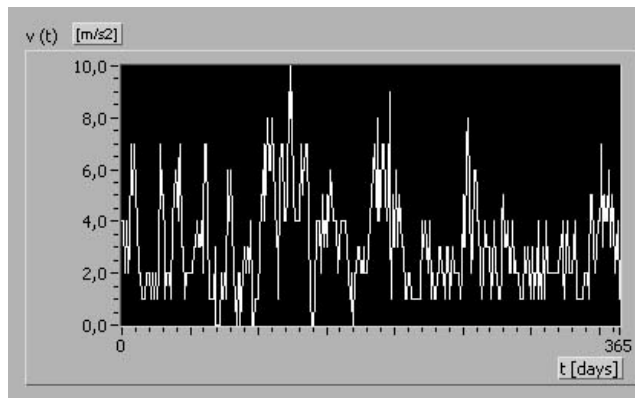
W celu oszacowania produkcji energii elektrycznej w elektrowni wiatrowej autor opracował model techniczno- ekonomiczny farmy wiatrowej [6], na podstawie, którego zaimplementowano narzędzie w postaci oprogramowania PGM 1.0 [7] i przeprowadzono symulacje produkcji energii elektrycznej w funkcji prędkości wiatru zależnej od wysokości usytuowania gondoli.

Analizę przeprowadzono dzięki opublikowanym pomiarom atmosferycznym [9], w oparciu o roczny przebieg prędkości wiatru w roku 2006 zmierzony na wysokości 10 m. nad powierzchnią gruntu na terenie Aeroklubu Ziemi Lubuskiej. Do celów analizy określono przebieg zmienności powierzchniowej gęstości mocy P_A . Powierzchniowa gęstość mocy w elektrowni wiatrowej, jest parametrem określającym teoretyczny potencjał mocy możliwy do wytworzenia na jednostkę powierzchni omiatanej wirnikiem turbozespołu wiatrowego. Jednostką powierzchniowej gęstości mocy jest W/m^2 . Powierzchniową gęstość mocy dla elektrowni wiatrowej określamy zależnością [7]:

$$P_A = \frac{1}{2} C_e \cdot \rho \cdot V^3 \quad (5)$$

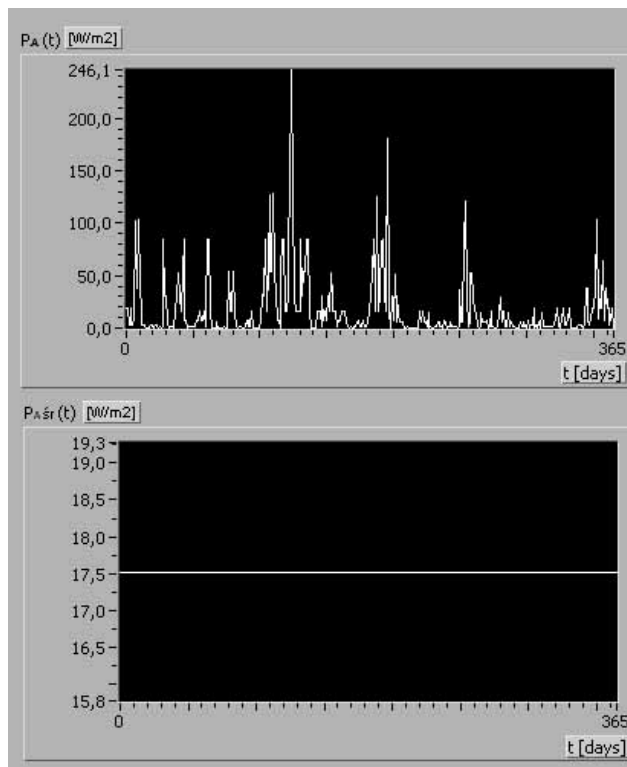
gdzie:

- C_e - sprawność elektryczna turbozespołu wiatrowego (według [8] C_e wynosi od 42% do 46%),
- ρ - gęstość powietrza,
- V - prędkość wiatru.



Rys. 2. Przebieg zmienności prędkości wiatru na wysokości 10 m. w roku 2006 na terenie Aeroklubu Ziemi Lubuskiej.

Źródło: wizualizacja- program autorski PGM 1.0



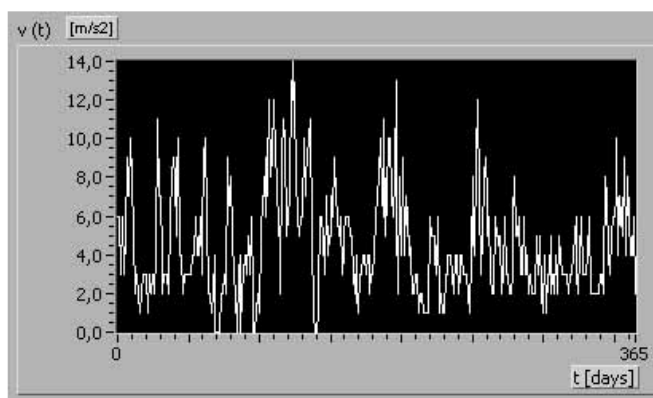
Rys. 3. Przebieg zmienności i wartość średnia powierzchniowej gęstości mocy dla prędkości wiatru na wysokości 10 m. w roku 2006 na terenie Aeroklubu Ziemi Lubuskiej.

Źródło: opracowanie własne- program autorski PGM 1.0

Należy zwrócić uwagę, że średnioroczna gęstość mocy na tym terenie określona dla sprawności elektrycznej C_e wynoszącej 44% i przebiegu prędkości wiatru zmierzonej

na wysokości 10 m. w 2006 roku wyniosła jedynie $17,5 \text{ W/m}^2$. Dla turbiny o mocy 2 MW i powierzchni wirnika wynoszącej 5027 m^2 daje to możliwość wyprodukowania około 770 MWh energii elektrycznej rocznie, co jest wynikiem bardzo słabym.

Przy założeniu, że teren ten jest płaski otwarty lub nieznacznie pofalowany należy przyjąć, że współczynnik szorstkości terenu K wynosi 0,007, a wykładnik potęgowy α równa się 0,165. Wówczas analiza przebiegu prędkości wiatru obliczona na podstawie zależności (1) dla wysokości 80 m. nad powierzchnią gruntu wykazuje ponad 40% wzrost prędkości wiatru w odniesieniu do pomiarów prędkości wiatru wykonanych na wysokości 10 m.

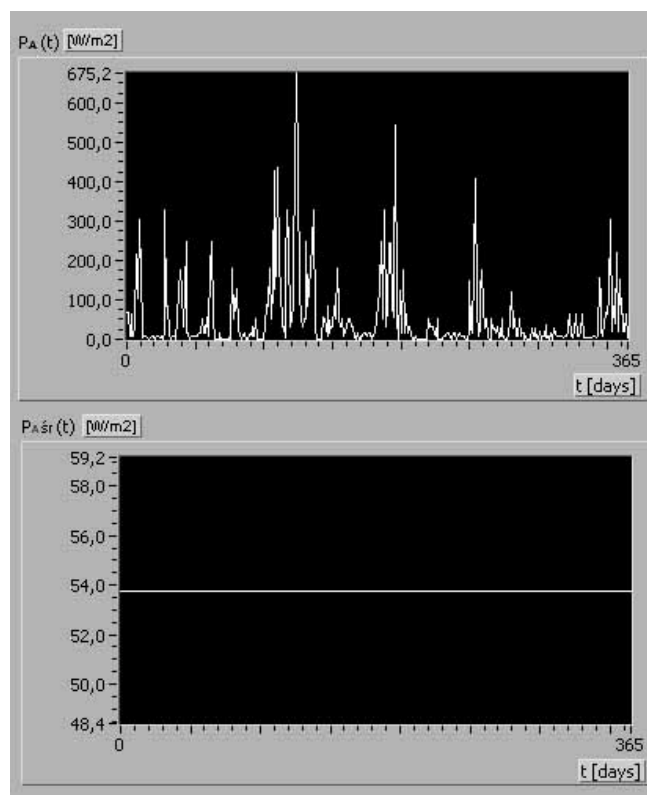


Rys. 4. Przebieg zmienności prędkości wiatru w roku 2006 na terenie Aeroklubu Ziemi Lubuskiej obliczony dla wysokości 80 m.

Źródło: opracowanie własne- program autorski PGM 1.0

Ponieważ w funkcji opisującej powierzchniową gęstość mocy P_A dla elektrowni wiatrowej, prędkość wiatru występuje w trzeciej potęgze, to P_A obliczona dla wysokości 80 m. wzrosła blisko trzykrotnie w odniesieniu do P_A obliczonej dla wysokości 10 m. Zatem analogicznie dla turbiny o mocy 2 MW daje to możliwość wyprodukowania około 2730 MWh energii elektrycznej rocznie.

Jeżeli maszt turbozespołu miałby wysokość 160 m., to elektrownia wiatrowa o mocy zainstalowanej 2 MW mogłaby w ciągu roku wyprodukować ponad 3400 MWh energii elektrycznej, co daje potencjalny przychód około 1 275 000 zł. Jest on ponad czterokrotnie większym przychodem w stosunku do szacunkowego przychodu ze sprzedaży energii elektrycznej w oparciu o pomiary prędkości wiatru na wysokości 10 m. nad powierzchnią terenu.



Rys. 5. Przebieg zmienności i wartość średnia powierzchniowej gęstości mocy obliczonej dla wysokości 80 m. i wykładnika potęgowego $\alpha=0,165$, dla prędkości wiatru zmierzonej na wysokości 10 m. w roku 2006 na terenie Aeroklubu Ziemi Lubuskiej.

Źródło: opracowanie własne- program autorski PGM 1.0

6. Podsumowanie

Dla najlepszej lokalizacji elektrowni wiatrowej kluczowe znaczenie mają warunki meteorologiczne, a w szczególności prędkość wiatru. Mapa stref energetycznych Polski obejmuje 5 stref [10], które zostały wyznaczone na podstawie średniorocznych prędkości wiatru zmierzonych na wysokości 30 m. Przeprowadzona analiza wykazuje, że prędkość wiatru wzrasta znacząco wraz z wysokością. Daje to potencjalnie dużo większe możliwości produkcji energii elektrycznej oraz zwiększenia przychodu z jej sprzedaży.

Obecnie nowoczesne elektrownie wiatrowe osiągają wysokość od 60 m. do 160 m. W celu określenia optymalnej lokalizacji dla budowy elektrowni wiatrowej należy przeprowadzić pomiary przebiegu prędkości wiatru w tym przedziale wysokości. Często jest to niemożliwe lub jest zbyt kosztowne. Dlatego pomocnym może być określenie prędkości wiatru na właściwej wysokości przy posiadanych pomiarach przebiegu prędkości wiatru na dowolnie niższej wysokości.

Autor opracował narzędzie w postaci oprogramowania PGM 1.0, które może być pomocne w określaniu potencjału energetycznego elektrowni wiatrowej w zależności

od wysokości usytuowania gondoli turbozespołów.

Budowa wyższych masztów dla farmy wiatrowej wiąże się także ze zwiększeniem kosztów. Dlatego każdy projekt budowy elektrowni wiatrowej wymaga oddzielnej kalkulacji kosztów, zoptymalizowania wysokości masztów w zależności od potencjału wiatru na różnych wysokościach i oszacowania potencjalnych przychodów.

Literatura

1. Żurański J.: Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1978,
2. Lorenc H.: *Zasoby wiatru w Polsce*, Materiały badawcze IGIMW, Seria Meteorologia 18, Warszawa 1992,
3. Gumuła S., Knap T., Strzelczyk P., Szczerba Z.: *Energetyka wiatrowa*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo- Dydaktyczne, AGH, Kraków 2006,
4. Soliński I: *Energetyczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania energii wiatrowej*, Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 1999,
5. Pauwels, *Slim transformer inside the world's highest wind turbine*, Prospekt firmy Pauwels, 2008,
6. Radziejewicz W., Tomaszewski M. *Techniczno- ekonomiczny model farmy wiatrowej*, XI Konferencja Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie, Zakopane, 2008,
7. Radziejewicz W. *Powierzchniowa gęstość mocy w elektrowni wiatrowej*, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Elektryka nr 326/2008, z 61, II Środowiskowe Warsztaty Doktorantów Politechniki Opolskiej, Jarnołtówek 2008,
8. Wien F.: *Generacja rozproszona i odnawialne źródła energii. Energetyka wiatrowa*, Jakość Zasilania Inicjatywa Leonardo (LPQI), Listopad 2006,
9. www.azl.pl, Aeroklub Ziemi Lubuskiej, 2007,
10. <http://www.elektrownie.tanio.net>, Elektrownie Wiatrowe, 2008,

Mgr inż. Wojciech RADZIEWICZ
Instytut Elektrowni i Systemów Pomiarowych
Politechnika Opolska
ul. K. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole
tel. (077) 4006215
email: radziejewicz@po.opole.pl



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego