

## ANALIZA WPLYWU WYBRANYCH PROFILI ŁOPAT WIRNIKA NA GENEROWANĄ MOC PRZEZ MINI SIŁOWNIĘ WIATROWĄ\*

*Marcin Dębowski, Leszek Romański, Piotr Komarnicki, Jerzy Bieniek*  
*Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu*

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań mocy generowanej przez elektrownię wiatrową wyposażoną zamiennie w trzy różne wirniki. Testowanie przeprowadzono na mini siłowni wiatrowej JSW 750-12 produkowanej przez firmę KOMEL. W trakcie badań przeanalizowano pracę wirnika dostarczanego wraz z siłownią oraz dwóch nowych wirników o łopatach dwu profilowych. Do zaprojektowania łopat pierwszego wirnika zastosowano profile z rodziny NACA a w drugim profile z rodziny GOE. Testowanie przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym, umożliwiającym analizę pracy siłowni wiatrowej w zakresie prędkości od 5 do 16 m·s<sup>-1</sup>. Dodatkowo w trakcie badań zmieniano również kąty zaklinowania łopat wirnika. W efekcie wykreślono 15 charakterystyk mocy (moc generowana przez siłownię wiatrową w funkcji prędkości wiatru). Zastosowanie nowych wirników siłowni umożliwiło generowanie przez mini siłownię wiatrową większych mocy niż przy stosowaniu oryginalnych wirników fabrycznych i to w całym zakresie badanych prędkości wiatru. Efektem dodatkowych badań jest propozycja nowego kierunku badań, który pozwoli usprawnić konstrukcję generatora prądu elektrycznego, a tym samym prowadzić do bezawaryjnej pracy elektrowni wiatrowej.

**Słowa kluczowe:** siłownia wiatrowa, energetyka, profile łopat

### Wstęp

Dwa główne podzespoły elektrowni wiatrowej, które w bardzo istotny sposób wpływają na generowaną przez nie moc to generator prądu elektrycznego oraz wirnik. Element ten w elektrowniach szybkoobrotowych, nazywany często śmigłem, zbudowany jest z kilku łopat. Obecnie najpopularniejszą konstrukcją tak dużych elektrowni, jak i mini elektrowni wiatrowych, są wirniki trzyłopatowe. Proste a więc i zwykle tańsze konstrukcje wyposażane są w łopaty jednoprofilowe. Aby występowała na nich maksymalna siła nośna profile takie powinny być laminarnymi. Warto odnotować, że pierwowzorem takiego profilu był

---

\* Praca naukowa finansowana ze środków NCN w ramach projektu badawczego N313 789940

zaprojektowany przed 80 laty przez Jerzego Dąbrowskiego profil IAW-743 i zastosowany po raz pierwszy na świecie w polskim super nowoczesnym bombowcu Łoś (Cynk, 1990).

Aktualnie w wysokosprawnych siłowniach wiatrowych łopaty o przekroju jednoprofilowym są już rzadko stosowane. Uzasadnienie takiego postępowania można znaleźć w publikacji (Dębowski i in., 2012), w której autorzy porównali konstrukcję elektrowni fabrycznej o łopatach dwuprofilowych z 3 wirnikami o łopatach jednoprofilowych.

Dążąc do jak największego uzysku mocy z danego wirnika, łopaty konstruuje się w ten sposób, aby wraz ze wzrostem długości danej łopaty zmieniał się nie tylko jej przekrój, ale także jej profil. Obecnie na przekroju podłużnym łopat rejestruje się zwykle 2-3 różnych profili. Od tego, jaki profil dobierze się na konkretnej długości łopaty zależy będzie kształt łopaty i jej właściwości aerodynamiczne, ponieważ każdy profil dobrany jest do prędkości strumienia powietrza, która zmienia się wraz z długością wirującej łopaty. Nie zawsze są to duże różnice w geometrii, ale najczęściej bardzo duże w charakterystykach aerodynamicznych, a więc i w opływach profilu przez strugę powietrza. Wiadomo przecież, że każdy profil ma inną opływowość. Poszerzone wiadomości w tym zakresie można znaleźć w publikacjach (Maxwell i in., 2002; Walker i in., 1997). Oprócz odpowiednich konstrukcji łopat wirników elektrowni wiatrowych wymaga się, aby były one wykonane z bardzo wytrzymałych materiałów gwarantujących nieprzerwaną pracę przez co najmniej 20 lat, co oznacza że wytrzymują one więcej niż  $5 \cdot 10^6$  zmiennych cykli obciążeniowych (Spera, 1998).

Obecnie przy wytwarzaniu łopat bazuje się na kompozytach żywicowych (głównie epidian) wzmocnianych włóknem szklanym. Kompozycje takie nazywane są GFRP (glass fiber-reinforced plastic). W przypadku dużych rozmiarów (długości powyżej 40 m) stosuje się kompozyty bazujące na włóknach węglowych tzw. CFRP (carbon fibre-reinforced plastic), gdyż oprócz zwiększenia wytrzymałości łopaty uzyskuje się zmniejszenie jej masy (Thomsen, 2006). Dzięki tym nowym kompozytom w ciągu najbliższych lat, przewiduje się, że konstrukcje wirników osiągną średnice 170-180 m, co umożliwi osiągnięcie mocy znamionowej przez elektrownie wiatrowe rzędu 8-10 MW.

Zwiększenie wytrzymałości łopat uzyskuje się także dzięki temu, że przy większych długościach buduje się je jako konstrukcje wielowarstwowe zwane sandwiczowymi (Kuhmeier, 2006; Overgaard, 2005). W środku przekroju łopat, które przy długościach już powyżej 2m są puste umieszcza się przekładkowe wzmocnienia lub żebra usztywniające. Typowe kształty żeber opisano w publikacji (Fuglsang i in., 1999).

Zarówno w budowie płatowców jak i łopat wirników elektrowni wiatrowych powszechnie stosuje się profile rodziny NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), CLARK Y, Wortmann, Gottingen, S NREL, Drela, Risø i EU o numerach 51-120 (<http://www.ae.uiuc.edu>). Prócz tego wiele firm buduje łopaty z własnymi profilami zaprojektowanymi pod własne konstrukcje elektrowni wiatrowych (<http://www.enercon.de>).

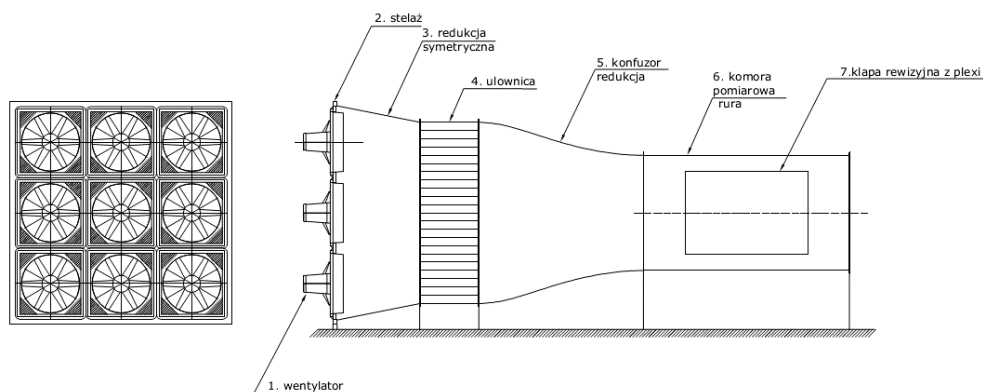
## Cel badań

Celem badań była analiza porównawcza pracy trzech różnych wirników mini elektrowni wiatrowych. Dwa z nich to konstrukcje własne, natomiast trzeci stanowił integralną część urządzenia fabrycznego Komel JSW-750. Dla uzyskania wspólnego poziomu odnie-

sienia wszystkie wirniki współpracowały z tym samym generatorem prądu elektrycznego. Wartością badaną była generowana przez elektrownię moc prądu elektrycznego.

## Przedmiot i metodyka badań

Badania nowych profili wymagają sprawdzenia ich działania w szerokim zakresie prędkości. Z faktu tego wynika trudność przeprowadzania badań w środowisku naturalnym. W celu wykreślenia charakterystyk mocy profili w porównywalnych warunkach umieszczano je w zbudowanym w tym celu tunelu aerodynamicznym. Schemat tunelu aerodynamicznego, który był elementem stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1. Przepływ strumienia powietrza w tunelu można było zmieniać w zakresie  $5-18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Rysunek 1. Schemat tunelu aerodynamicznego  
Figure 1. Schematic representation of the aerodynamic tunnel

Konstrukcja tunelu składa się ze stelaża utrzymującego wentylatory, redukcji symetrycznie zmniejszającej przekrój tunelu, ulownicy odpowiedzialnej za wyprostowanie strugi powietrza, kolejnej redukcji w postaci konfuzora o specjalnym profilu oraz komory pomiarowej, w której mocowany jest badany obiekt. Komora pomiarowa ma przekrój kołowy o średnicy 1,4 m, co po uwzględnieniu aerodynamiki strugi powietrza umożliwia pomiar siłowni wiatrowych do 1,15 m średnicy wirnika.

Strumień powietrza wytwarzany jest przez dziewięć wentylatorów silnikami elektrycznymi o mocy 2,2 kW każdy, rozłożonych w trzech pionowych rzędach i kolumnach (rys. 1). Silniki zasilane są poprzez falowniki, które dzięki możliwości regulacji częstotliwości zasilania, umożliwiają zmianę prędkości obrotowej wentylatorów, a tym samym regulację prędkości strugi powietrza. Ze względów bezpieczeństwa oraz zgodnie z zaleceniami producenta wentylatorów, zakres regulacji został ograniczony. Jako dolną granicę przyjęto 15 Hz ze względu na ograniczenia termiczne silników, natomiast jako górną 52 Hz ze względu na ograniczenia mechaniczne silników.

Do badań wykorzystano elektrownię wiatrową JSW 750-12 firmy KOMEL. Jest to klasyczna konstrukcja wyposażona w trójłopatowy wirnik o średnicy 0,75 m. Oprócz wirnika drugim głównym elementem budowy elektrowni był generator synchroniczny z magnesami trwałymi. Z siłownią zintegrowany był trójfazowy mostek prostowniczy, za sprawą którego na zaciskach siłowni uzyskiwano napięcie stałe generowanego prądu elektrycznego. Charakterystykę siłowni wiatrowej przedstawiono w tabeli 1, natomiast na rysunku 2 i 3 zdjęcie siłowni wraz z fabrycznymi łopatom.

Tabela 1.  
Charakterystyka siłowni wiatrowej Komel JSW 750-12  
Table 1.  
Characteristic of a wind power plant Komel JSW 750-12

Nazwa parametru	Wartość
Typ generatora	Synchroniczny z magnesami trwałymi
Znamionowa moc elektryczna (W)	150
Znamionowa prędkość wiatru ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	12
Maksymalna prędkość wiatru ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	30
Minimalna prędkość wiatru ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	2,5
Średnica pędnika (m)	0,75
Ilość łopat pędnika (szt.)	3
Układ regulacji napięcia	brak
Napięcia na wyjściu siłowni	stałe

Źródło: Tomaszkiwicz, 2009



Rysunek 2. Siłownia wiatrowa Firmy Komel JSW 750-12

Figure 2. A wind power plant Komel JSW 750-12

Przedmiotem badań były 3 trójłopatowe wirniki o różnych profilach łopat. Punktem odniesienia był wirnik instalowany przez producenta, w dalszej części nazywany fabrycznym (rys. 3). Kolejna dwa zostały zaprojektowane i wykonane we własnym zakresie na podstawie studiów literaturowych (Lee, 2000) oraz doświadczeń z poprzednich badań (Dębowski i in., 2012).

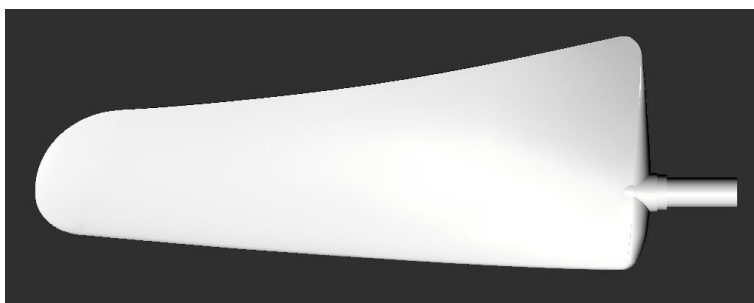


Rysunek 3. Łopata o profilu fabrycznym elektrowni Komel JSW 750-12

Figure 3. Factory profile blade of a power plant Komel JSW 750-12

Oba nowe wirniki elektrowni zbudowano z łopat na które składały się w każdym przypadku dwa różne profile o znanych markach.

Łopaty pierwszego wirnika powstały z połączenia profili NACA 63-415 oraz NACA 63-210. Profilem początkowym był profil NACA 63-415 przy kącie początkowym zaklinowania wynoszącym  $38,3^\circ$ , natomiast kończącym NACA 63-210 przy kącie kończącym wynoszącym  $11,8^\circ$ . Fotografiją łopaty o tym profilu przedstawiono na rysunku 4.



*Rysunek 4. Łopata o profilu NACA 63-415 przechodzącym w NACA 63-210*  
*Figure 4. NACA 63-415 profile blade passing into NACA 63-210*

Łopaty wirnika drugiego powstały z połączenia profili GOE – 448 oraz GOE – 439. Profilem początkowym był GOE- 448 przy kącie początkowym  $40,6^\circ$ , natomiast kończącym GOE – 439 przy kącie kończącym wynoszącym  $9,4^\circ$  (rys.5).



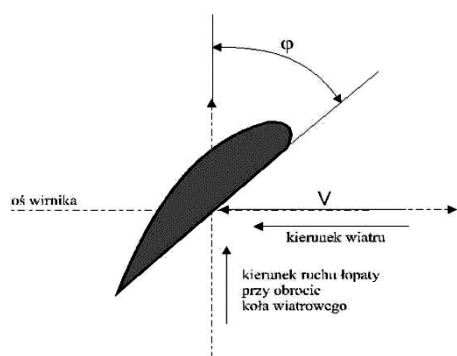
*Rysunek 5. Łopata o profilu GOE – 448 przechodzącym w GOE – 439*  
*Figure 5. GOE – 448 profile blade passing into GOE – 439*

Wszystkie badane wirniki, po zamocowaniu na piaście siłowni wiatrowej, miały tę samą średnicę i wynosiła ona 0,75 m.

Dodatkowym czynnikiem, uwzględnionym podczas badań, był kąt zaklinowania łopat. Każda z łopat była analizowana dla 5 kątów: kąta bazowego (obliczeniowego), dla którego teoretycznie powinien generować maksymalną moc, dwóch kątów  $+5^\circ$  oraz  $+10^\circ$  względem kąta bazowego oraz  $-5^\circ$  i  $-10^\circ$  względem kąta bazowego. Pomiar kąta zaklinowania został ustawiony przy użyciu kątomierza zintegrowanego z łopatami, zgodnie z rysunkiem 6. Kąt zaklinowania wyznaczany jest pomiędzy płaszczyzną piasty wirnika, a najdłuższą cięciwą profilu początkowego łopaty.

Porównanie pracy wirników składających się z łopatek o różnych profilach zostało oparte na zestawieniu wykreślonych charakterystyk mocy elektrycznej mini elektrowni wiatrowej, w której wymieniano badane wirniki. Taki sposób pomiaru podyktowany jest faktem, że wprowadzenie dodatkowych urządzeń, umożliwiających bezpośredni pomiar prędkości obrotowej wirnika oraz momentu obrotowego, jest kosztowne i kłopotliwe.

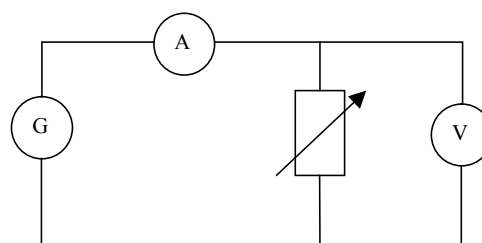
Punktem pomiaru mocy, generowanej przez siłownię wiatrową, było jej wyjście, tj. za zintegrowanym mostkiem prostowniczym, po stronie napięcia stałego. W rozważaniach pominięto straty prostownika, ze względu na fakt, że celem pracy jest porównanie poszczególnych łopatek, a nie analiza pracy samego mostka. W trakcie pomiarów stosowano schemat elektryczny (Nalepa i in., 2008; Parchański, 1995) zaprezentowany na rysunku 7. Dzięki regulowanemu obciążeniu możliwe było znalezienie, dla każdej prędkości wiatru, punktu mocy maksymalnej.



Rysunek 6. Określanie kąta zaklinowania łopaty

Figure 6. Determination of the wedge angle of blades

Źródło: Tomaszewicz, 2009



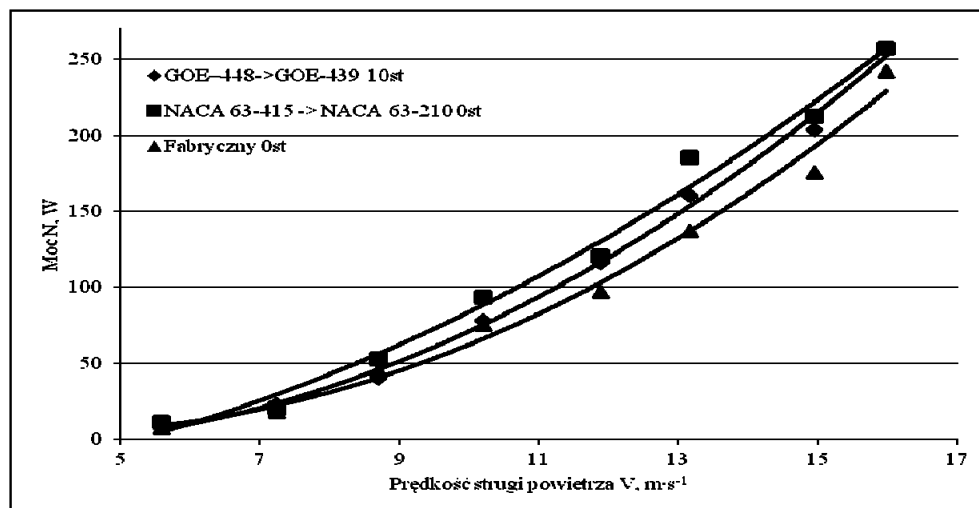
Rysunek 7. Schemat układu pomiarowego: G – generator synchroniczny z magnesami trwałymi, A – amperomierz, V – woltomierz, R – opornica suwakowa

Fig. 7. Schematic representation of the measurement system: G – a synchronous generator with stable magnets, A – ammeter, V – voltmeter, R – slide stock rail

Do pomiaru napięcia zastosowano multimetr Metex M-3630D, natomiast do pomiaru prądu służył multimetr Metex M-4660M.

## Wyniki badań i ich analiza

Na rysunku 8 przedstawiono charakterystyki mocy w funkcji prędkości wiatru trzech badanych wirników. Pomimo dokonania badań dla 5 różnych kątów zaklinowania dla każdej z łopatek, zaprezentowano tylko wyniki przy ustawieniu kąta przy którym dany wirnik uzyskał najlepszą charakterystykę mocy.



Rysunek 8. Charakterystyki mocy w funkcji prędkości wiatru trzech profili łopatek wirnika  
 Figure 8. Power characteristics as a function of wind speed of three profiles of propeller blades

Ze względu na ograniczenia techniczne, opisane w metodyce badań, nie było możliwe określenie prędkości startowych poszczególnych wirników. Znana jest tylko teoretyczna prędkość startowa dla konstrukcji firmy KOMEL, która zgodnie z dokumentacją techniczną wynosi  $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Tomaszkiewicz, 2009).

Zgodnie z zapewnieniami producenta (Tomaszkiewicz, 2009), siłownia wiatrowa JSW 750-12, z zamontowanym wirnikiem fabrycznym, dla kąta zaklinowania łopatek wynoszącego  $30^\circ$ , powinna wygenerować 150 W mocy elektrycznej. Z wykonanych badań wynika, że siłownia osiąga moc 97 W, natomiast w celu osiągnięcia deklarowanych 150 W wymagana jest prędkość wiatru około  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Obydwie nowe konstrukcje okazały się wydajniejsze od wirnika fabrycznego. Porównując osiągnięcia łopatek dla  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , czyli prędkości wiatru uznawanej jako znamionową, można zauważyć, że obydwie nowe konstrukcje generują 19,5% oraz 23,7% więcej energii elektrycznej, odpowiednio dla łopatek o profilu GOE – 448 przechodzącego w GOE – 439, oraz NACA 63-415 przechodzącego w NACA 63-210. Nowe łopaty charakteryzują się wyższą generowaną mocą w całym zakresie badanych prędkości.

W trakcie badań zauważono, że najbardziej awaryjnym elementem całej siłowni wiatrowej jest trójfazowy mostek prostowniczy. Układ ten wykonany jest w postaci układu scalonego. Pomimo umiejscowienia w tylnej części korpusu turbiny, który spełnia również rolę radiatora, układ ulega częstemu przegrzaniu. W wyniku jego awarii na wyjściu z turbiny pojawia się napięcie sinusoidalnie zmienne, zamiast stałego. Poprawność pracy tego układu była monitorowana z pomocą oscyloskopu, przy użyciu którego obserwowane było napięcie wyjściowe. Niewątpliwie dalszej analizie należy poddać strukturę temperatur w siłowni wiatrowej, aby móc określić bardziej optymalne pod względem termicznym miejsce dla mostka prostowniczego.

## Wnioski

1. Zamiana wirnika fabrycznego mini elektrowni JSW 750 na wirnik z łopatom o profilu GOE-448 -> GOE-439 umożliwiła wygenerowanie mocy znamionowej wyższej o 19,5% ( $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), w przypadku wirnika z łopatom o profilu NACA 63-415 -> NACA 63-210 moc wzrasta o 23,7%.
2. Elektrownia JSW 750, pracująca przy warunkach znamionowych, generuje 97 W mocy elektrycznej, zamiast deklarowanych 150 W.
3. Dla łopat o profilu fabrycznym i NACA 63-415 -> NACA 63-210 najbardziej optymalny kąt zaklinowania wynosi  $0^\circ$ , natomiast dla łopat o profilu GOE - 448 -> GOE - 439  $10^\circ$ .
4. Newralgicznym punktem siłowni wiatrowej JSW 750-12 jest układ prostowniczy, którego umiejscowienie należy przeanalizować w dalszych badaniach.

## Literatura

- Cynk, J. (1990). *Samolot bombowy PZL P-37 Łoś*. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, ISBN 83-206-0836-8.
- Dębowski, M.; Romański, L.; Bieniek, J. (2012). Analiza pracy różnych profili łopat pędnika siłowni wiatrowej. *Inżynieria Rolnicza*, 2(137), 29-34.
- Fuglsang, P.; Dahl, K. S.; Antonion, J. (1999). *Wind Tunnel Tests of the Risø-A1-18, Risø-A1-21 and Risø-A1-24 Airfoils*. Risø National Laboratory, Denmark.
- Kuhmeier, L. (2006) *Buckling of Wind Turbine Rotor Blades: Analysis, Design and Experimental Validation*. Ph.D. Thesis. Aalborg University and Vestas Wind Systems A/S.
- Lee, E. (2000). *Optimization of Turbomachinery Airfoil Shapes in Viscous Unsteady Compressible Flows*. Pennsylvania State University, 20-41.
- Maxwell, J.; Mc Gowana, J.; Rogers, A. (2002). *Wind Energy Explained. Theory, Design and Application*. John Wiley and Sons. Ltd.
- Nalepa, K.; Neugebauer, M.; Sołowiej, P. (2008). Metodyka badań małych siłowni wiatrowych. *Inżynieria Rolnicza*, 2(100), 209-214.
- Overgaard, L.C. (2005). On the Structural Assessment of Failure Mechanisms and Instability Phenomena in the V52 Turbine Blade Static Test Performed within the EFP2003 Programme. Technical Report, Department of Mechanical Engineering, Aalborg University, Denmark.
- Parchański, J. (1995). *Miernictwo elektryczne i elektroniczne*. WSiP, Warszawa, 179-200
- Spera, S.A. (1998). *Fatigue Design in Wind Turbines. Wind Turbine Technology-Fundamental Concepts in Wind turbine Engineering*. ASME Press.
- Thomsen, T. (2006). *Sandwich materials for wind turbine blades*. 27-th Riso International Symposium on Materials Science: Polymer Composite Materials for Wind Power Turbines. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Tomaszkiewicz, W. (red.). (2009). *Instrukcja obsługi siłowni wiatrowej typu: JSW 750-12*. Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych „KOMEL”, Sosnowiec
- Walker, J.; Jenkins, N. (1997). *Wind Energy Technology*. John Wiley and Sons. Ltd.
- Witryny internetowe:  
[http://www.ae.uiuc.edu/m-selig/ads/coord\\_database.html#F](http://www.ae.uiuc.edu/m-selig/ads/coord_database.html#F)  
<http://www.enercon.de/>



## **ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE SELECTED PROFILES OF ROTOR BLADES ON THE POWER GENERATED BY MINI POWER WIND PLANT**

**Abstract.** The article presents the research results of the power generated by the wind power plant equipped interchangeably with three different rotors. Testing was carried out on the mini power wind plant JSW 750-12 produced by KOMEL company. Operation of the rotor provided with the power plant and two new rotors of two-profile blades were analysed during the research. Profiles of NACA family were used for design of the first rotor's blades and GOE family profiles were used for designing the second rotor's blades. Testing was carried out in the aerodynamic tunnel, enabling the wind power plant analysis within the speed of 5 to 16 m·s<sup>-1</sup>. Additionally, during the research, wedge angles of rotor blades were modified. As a result, 15 characteristics of power were determined (power generated by the wind power plant as a function of wind speed). The use of new rotors of the power plant, enabled wind power plant to generate higher power than at the use of original factory rotors in the whole scope of wind speed. Suggestion of a new research direction, which would allow improvement of electric current generator structure and therefore lead failure-free operation of the electric power plant, is an additional effect.

**Key words:** wind power plant, the power industry, blades profiles

**Adres do korespondencji:**

Leszek Romański; e-mail: leszek.romanski@up.wroc.pl  
Instytut Inżynierii Rolniczej  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu  
ul. Chelmońskiego 37/41  
51-630 Wrocław