

Łukasz KASPEROWICZ\*  
Dariusz KURZ\*

## ZWIĘKSZENIE EFEKTYWNOŚCI TURBINY SAVONIUSA PRACUJĄCEJ W SYSTEMIE HYBRYDOWYM W WYNIKU ZASTOSOWANIA KURTYN

W pracy przedstawiono turbinę Savoniusa oraz wyniki prowadzonych na świecie badań. Dokonano zestawienia najbardziej optymalnych parametrów geometrycznych turbiny oraz przedstawiono sposób zwiększenia efektywności generacji energii bez ingerencji w konstrukcję turbiny, poprzez zastosowanie odpowiednio dobranych kurtyn. Zaproponowano wykorzystanie elementów zabudowy w celu podniesienia efektywności turbiny oraz stworzenia systemu hybrydowego, dołączając panele fotowoltaiczne. Obliczono uzysk energii z całego systemu oraz przedstawiono schemat połączeń instalacji w systemie off-grid.

### 1. WPROWADZENIE

Energetyka odnawialna stanowi jeden z zasadniczych elementów zrównoważonego rozwoju kraju, który chce ograniczać emisję zanieczyszczeń pochodzących z procesu spalania paliw energetycznych oraz poszukującego nowych, alternatywnych źródeł energii. Przyjęta uchwałą Rady Ministrów w dniu 5 września 2000 r. oraz ostatecznie uchwałą Sejmu RP w dniu 23 sierpnia 2001 r. „Strategia rozwoju energetyki odnawialnej” określa ilościowy udział energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych, na lata 2010 oraz 2020, odpowiednio 7,5% i 14% w bilansie energii pierwotnej [10].

Energia wiatru, będąca rozproszonym źródłem energii elektrycznej, niezależna od dostaw i cen paliw kopalnych oraz wpływów politycznych, ma korzystny wpływ na bezpieczeństwo energetyczne kraju. Proces wytwarzania energii ma miejsce blisko jej odbiorców, co zmniejsza potrzeby kosztownych modernizacji czy rozbudowy sieci elektroenergetycznej dla pokrycia rosnącego zapotrzebowania gospodarki na energię elektryczną, zmniejsza straty przesyłowe, a także uniezależnia system energetyczny od skutków awarii w dużych elektrowniach systemowych. Ponadto, przewidywane w przyszłości naturalne rozproszenie inwestycji eliminuje niebezpieczeństwo nagłego

---

\* Politechnika Poznańska.

wyłaczenia całkowitej mocy zainstalowanych elektrowni wiatrowych i związanych z tym uszkodzeń systemu elektroenergetycznego [10].

Najważniejszymi zaletami energetyki wiatrowej w modelu rozproszonym w porównaniu do farm wiatrowych są [16]:

- brak konieczności pozyskiwania dużych obszarów ziemi;
- łatwiejsze negocjacje społeczne a czasem nawet ich brak;
- zwiększone szanse na uzyskanie warunków przyłączenia;
- brak potrzeby budowy abonenckich GPZ-ów i kosztownych przyłączy;
- brak potrzeby budowy linii przyłączeniowej WN 110 kV łączącej farmę z GZP-em;
- niższe koszty przygotowania projektu;
- krótszy czas realizacji;
- łatwiejsze spełnienie warunków środowiskowych.

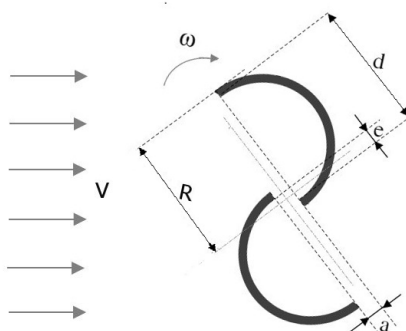
Turbiny wiatrowe można podzielić na dwa podstawowe rodzaje – turbiny o poziomej oraz o pionowej osi obrotu. Ze względu na najwyższą sprawność, najczęściej spotykane są turbiny o poziomej osi pracy, posiadające trzy łopatki. Turbiny o mocy do 50 kW są zazwyczaj wykorzystywane do zasilania gospodarstw domowych. Czasami działają w połączeniu na przykład z systemami fotowoltaicznymi, tworząc tzw. systemy hybrydowe, używane do zasilania urządzeń w miejscu bez dostępnej sieci elektrycznej [15]. Możliwości stosowania turbin wiatrowych w małych przydomowych elektrowniach są jednak ograniczone. Zgodnie z przepisami zawartymi w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 stycznia 2002 r. w sprawie wartości progowych poziomów hałasu (Dz.U. 2002 r., nr 8, poz. 81) obiekty i urządzenia będące źródłem hałasu muszą być zlokalizowane w taki sposób, aby nie naruszały dopuszczalnych poziomów hałasu. Dla terenów zamieszkałych jest to 50 – 60 dB. Urządzeniami generującymi najniższą wartość hałasu są elektrownie o pionowej osi obrotu, jak np. turbina Savoniusa [11, 19].

## 2. CHARAKTERYSTYKA TURBINY SAVONIUSA

Turbina Savoniusa, będąca przykładem turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu typu oporowego, składa się z dwóch pionowych półcyldrów. Przekrój poziomy wirnika tej turbiny przypomina literę „S” a jej podstawowe parametry geometryczne zostały przedstawione na rysunku 1.

Obrót wirnika spowodowany jest różnicą sił oddziaływania wiatru na wklęsłą i wypukłą część łopatek turbiny a jej działanie nie zależy od kierunku przepływu wiatru. Generuje ona duży moment rozruchowy przy niskich prędkościach wiatru oraz charakteryzuje się cichą pracą wynikającą z jej małej prędkości obrotowej, zdecydowanie mniejszej niż w przypadku turbiny o poziomej osi obrotu [1, 7]. Dobór odpowiedniego generatora wolnoobrotowego stanowi istotny problem, ze

względu na tak małe prędkości obrotowe. Jednakże, w stosunku do turbin o pionowej osi obrotu, możliwe jest umieszczenie ciężkiego generatora na ziemi (zamiast na gondoli), powodującego duże obciążenia dla mechanizmu obracania się łopatek w kierunku przepływu wiatru. Turbina Savoniusa jest także dużo bardziej odporna na naprężenia mechaniczne niż jakakolwiek inna turbina, zarówno o pionowej jak i o poziomej osi obrotu. W wyniku tego energia wiatru jest znacznie lepiej dostarczana na łopatki turbiny przy tych samych naprężeniach mechanicznych niż w pozostałych konstrukcjach turbin wiatrowych. Biorąc pod uwagę kryterium  $L-\sigma$  (wytrzymałości), turbina ta jest najlepszą z różnych typów konstrukcji [8, 9]. Jednak odznacza się ona dość niskim współczynnikiem efektywności przepływu wiatru  $c_p$  (współczynnikiem mocy), co jest widoczne na rysunku 2.

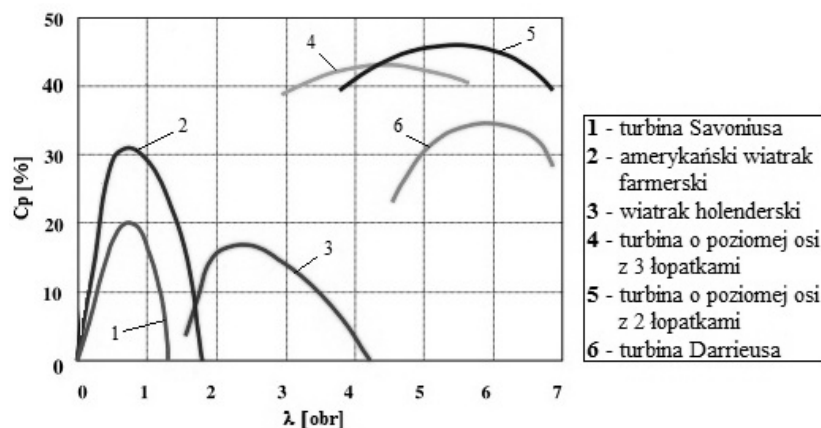


Rys. 1. Schemat turbiny Savoniusa [7]

Współczynnik  $c_p$  jest definiowany jako stosunek mocy turbiny  $P$  do mocy całkowitej strumienia powietrza przepływającego przez powierzchnię turbiny. Przedstawione charakterystyki podawane są zazwyczaj w funkcji tzw. współczynnika szybkobieżności  $\lambda$ , będącego stosunkiem prędkości obwodowej końcowego elementu płata turbiny do prędkości wiatru [14].

W literaturze tematu można znaleźć opis różnych badań dotyczących poprawy efektywności turbiny, wyznaczanej zarówno eksperymentalnie jak i analitycznie, wykorzystując metody numeryczne. W pracy [7] przedstawione zostały najbardziej optymalne parametry geometryczne turbiny, dające największy współczynnik  $c_p$ . Zostały one zestawione w tabeli 1.

Wirnik można podzielić na części a każda z nich będzie przesunięta względem siebie o  $90^\circ$ . Stosuje się to w celu zwiększenia momentu rozruchowego w przypadku przepływu wiatru z różnych kierunków. Wystarczającą stabilność momentu obrotowego zapewniają 2 pary łopatek i większa ich liczba nie jest potrzebna [7]. Autor pracy [7], wykorzystując metody numeryczne wykazał, że najbardziej optymalna, pod względem współczynnika momentu obrotowego  $c_m$ , długość przerwy  $e$  wynosi  $0,242d$ .



Rys. 2. Zależność współczynnika  $c_p$  od współczynnika lambda dla różnych turbin wiatrowych [7]

Tabela 1. Zestawienie parametrów geometrycznych pozwalających na uzyskanie najlepszej wartości współczynnika  $c_p$  [7]

Wysokość turbiny H	Szczelina e	Szczelina a	Liczba łopatek	Liczba par łopatek przesuniętych o 90°	Promień płyt na końcach turbiny
4R	0,15d – 0,3d	0	≥2	≥2	1,1 R

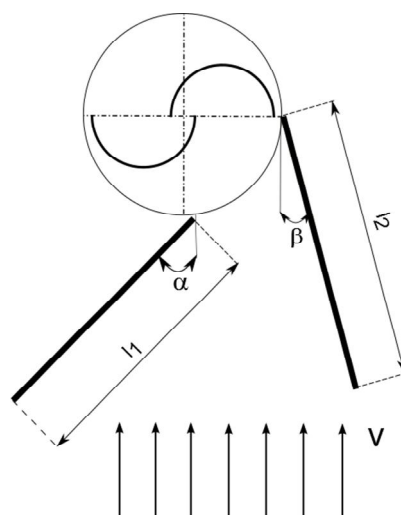
### 3. ZASTOSOWANIE KURTYNY W CELU ZWIĘKSZENIA EFEKTYWNOŚCI TURBINY

Zwiększenie efektywności turbiny Savoniusa możliwe jest nie tylko poprzez zmianę jej parametrów konstrukcyjnych. W celu wyeliminowania ujemnego momentu obrotowego, powstającego na wypukłej części turbiny, można zastosować kurtyny kierunkujące strumień wiatru, jak w układzie przedstawionym na rysunku 3.

Autor pracy [1] przeprowadził badania na turbinie o wysokości równej jej średnicy ( $H = D$ ) dla 3 różnych zestawów kurtyń. Wymiary  $l_1$  i  $l_2$  kurtyń, zależne od średnicy turbiny, zostały zestawione w tabeli 2.

Przy średniej prędkości wiatru 7 m/s uzyskano najlepsze rezultaty dla kurtyńy 1. Badania kątów  $\alpha$  i  $\beta$ , pod jakimi należy je ustawić, pozwoliły na wyznaczenie ich wartości na poziomie  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta = 15^\circ$ . Dla takich parametrów, wartość współczynnika  $c_p$  wyniosła 0,38, natomiast dla kurtyńy 2 i 3, współczynnik ten wynosił odpowiednio 0,34 i 0,26 [1]. Zarówno ten model badanej turbiny bez zastosowania kurtyń oraz model konwencjonalnej turbiny Savoniusa przedstawionej

w pozycjach [2, 3, 4], wykazał współczynnik efektywności przepływu wiatru  $c_p$  w przedziale 0,16 - 0,17. Zastosowanie odpowiednio dobranych kurtyn, powodujących największe wykorzystanie strumienia powietrza przekazywanego do wirnika, pozwoliło na ponad dwukrotne zwiększenie wartości  $c_p$ .



Rys. 3. Schemat zastosowania kurtyn wraz z ich parametrami [1]

Tabela 2. Wymiary różnych typów kurtyn względem średnicy turbiny [1]

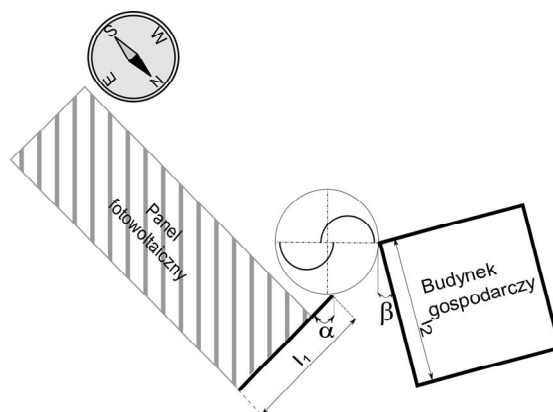
Nazwa	Długość $l_1$	Długość i $l_2$
Kurtyna 1	$1,41 \cdot D$	$1,63 \cdot D$
Kurtyna 2	$1,06 \cdot D$	$1,22 \cdot D$
Kurtyna 3	$0,69 \cdot D$	$0,81 \cdot D$

#### 4. PRZYKŁAD REALIZACJI HYBRYDOWEGO SYSTEMU GENERACJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ Z WYKORZYSTANIEM ELEMENTÓW OTOCZENIA

Wykorzystanie turbiny Savoniusa do generacji prądu elektrycznego może znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie ważna jest jak najmniejsza głośność pracy turbiny, czyli np. w środowisku mieszkalnym. Ponadto, jako kurtyny, wspomagające zwiększenie efektywności wykorzystania wiatru, mogą posłużyć istniejące elementy zabudowy (tj. budynki, płoty, mury, itd.), co nie zaburzy w znaczący sposób krajobrazu.

Przykładowym rozwiązaniem może być umieszczenie turbiny wiatrowej w ogrodzie za domkiem jednorodzinny. Jedną kurtynę może stanowić tylna ściana

budynku gospodarczego o odpowiednich wymiarach. Drugą natomiast wykorzystamy do zbudowania stelażu dla ogniw fotowoltaicznych skierowanych na południe, w celu uzyskania jak najlepszych warunków oświetleniowych paneli. Dzięki takiemu rozwiązaniu uzyskamy system hybrydowy, w którym turbina wiatrowa i ogniwa fotowoltaiczne będą ładowały wspólny akumulator. Energia elektryczna zgromadzona w akumulatorze może posłużyć do zasilania np. oświetlenia ogrodu czy elewacji domu, pompy wodnej do nawadniania ogrodu czy nawet oddzielnego obwodu w budynku mieszkalnym. Aby uzyskać największe uzyski energii należy rozmieścić wszystkie elementy składowe systemu zgodnie z warunkami opisanymi we wcześniejszych punktach pracy. Propozycja rozmieszczenia została zaprezentowana na rysunku 4.



Rys. 4. Warunki lokalizacji poszczególnych elementów systemu hybrydowego

Zakładamy wysokość turbiny  $H = 2$  m. Jej promień  $R$ , zgodnie z informacjami zawartymi w tabeli 1, powinien być 4 razy mniejszy od wysokości, czyli  $R = 0,5$  m. Przyjmijmy także długości i kąty umiejscowienia kurtyń takie, jak wyznaczono w poprzednim punkcie, czyli  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta = 15^\circ$ ,  $l_1 = 1,4$  m,  $l_2 = 1,6$  m. Wysokość kurtyń równa jest wysokości turbiny. Takie wartości poszczególnych wielkości pozwolą na uzyskanie optymalnego współczynnika efektywności wykorzystania przepływu wiatru –  $c_p$  [7].

Moc mechaniczną turbiny Savoniusa można obliczyć ze wzoru [7]:

$$P = c_p \cdot \rho \cdot R \cdot H \cdot v^3 \quad [W] \quad (1)$$

gdzie:  $v$  – prędkość wiatru [m/s],  $H$  – wysokość turbiny [m],  $R$  – promień turbiny [m],  $\rho$  – gęstość powietrza [ $\text{kg/m}^3$ ],  $c_p$  – współczynnik efektywności wykorzystania wiatru [–].

Moc znamionowa obecnie stosowanych turbin o osi poziomej obliczana jest dla prędkości wiatru w zakresie 10–11 m/s [5]. Podobne wartości prędkości

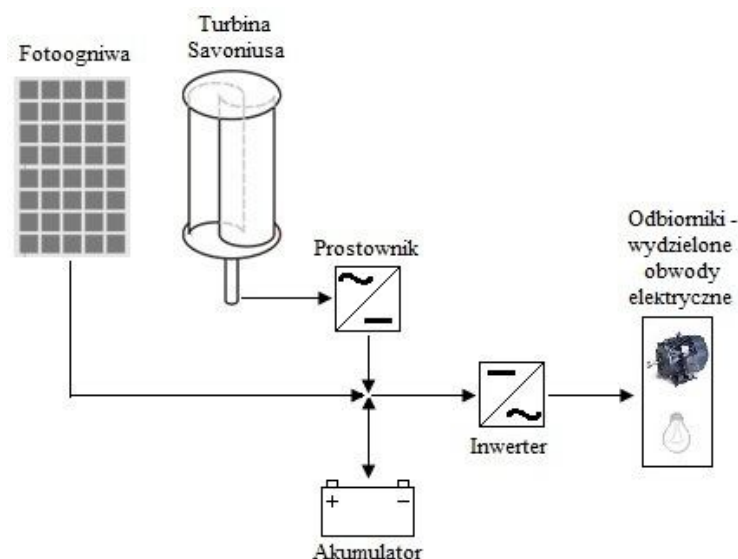
przyjmuje się do obliczeń mocy wiatraków o pionowej osi obrotu a mianowicie ok. 10–12 m/s [13]. Przyjmijmy więc do rozważań prędkość wiatru  $v = 10$  m/s.

Gęstość powietrza w standardowych warunkach meteorologicznych (czyli przy ciśnieniu atmosferycznym  $p = 111,3$  hPa oraz temperaturze  $t = 15^{\circ}\text{C}$ ) wynosi  $\rho = 1,225$  kg/m<sup>3</sup> [22].

Dla odpowiednio dobranej i usytuowanej kurtyny oraz kierunku wiatru zgodnego z położeniem kurtyny uzyskamy współczynnik  $c_p = 0,38$ . Podstawiając powyższe dane do wzoru (1) otrzymujemy moc mechaniczną turbiny  $P = 465,5$  W.

Przy założeniu średniego czasu pracy turbiny dającej moc znamionową jako 20 % dni w roku (zgodnie z informacjami podawanymi przez dystrybutorów [17, 18]), uzyskujemy z projektowanej turbiny 815,56 kWh wyprodukowanej energii elektrycznej rocznie.

Przyjmując najlepszy kąt nachylenia ogniw fotowoltaicznych względem Ziemi, czyli  $\varphi = 30^{\circ}$  oraz wysokość stelaża 2 m, jego szerokość musi wynosić 3,46 m. Na takim stelażu uzyskamy powierzchnię o wymiarach 4 x 1,2 m, na której będzie zamontowane 7 paneli o mocy znamionowej 80 W o wymiarach 1,2 x 0,54 m. Powołując się na informacje zawarte w pracy [6], dotyczące ilości promieniowania słonecznego docierającego do ziemi oraz sposobu obliczania uzysku energii z fotoogniw, możemy oszacować roczną ilość energii z proponowanej instalacji fotowoltaicznej. Dla miasta Poznania, gdzie roczne nasłonecznienie wynosi ok. 1050 kWh/m<sup>2</sup> przy ekspozycji południowej, z 1 m<sup>2</sup> ogniw uzyskamy 84,05 kWh energii elektrycznej rocznie, co dla całej instalacji o powierzchni 4,47 m<sup>2</sup> otrzymamy uzysk energii równy 375,7 kWh rocznie.



Rys. 5. Schemat połączenia instalacji hybrydowej w systemie off-grid [21]

Całkowita wyprodukowana energia elektryczna z zaproponowanego rozwiązania hybrydowego może wynieść ok. 1,19 MWh rocznie. Zakładając straty energii na poszczególnych elementach systemu, którego schemat przedstawiono na rysunku 5, na poziomie 20% otrzymamy ok. 953 kWh energii, czyli ponad połowę rocznego zapotrzebowania średniego gospodarstwa domowego, którego całkowite zużycie oszacowała Fundacja na rzecz Efektywnego Wykorzystania Energii na poziomie ok. 1,66 MWh/rok (jest to wartość uśredniona uwzględniająca różne typy modelu mieszkania) [12].

## 5. WNIOSKI

Konwencjonalna turbina Savoniusa charakteryzuje się niskim współczynnikiem efektywności wykorzystania przepływu wiatru. Istnieją jednak sposoby na podniesienie wartości tego parametru. Zastosowanie dodatkowych kurtyn może podnieść efektywność generacji energii ponad dwukrotnie, co zostało przedstawione w punkcie 3. Jest to duża wartość, biorąc pod uwagę fakt niezmienności jej wielkości a dodatkowo, jako kurtyny mogą posłużyć elementy zabudowy. W warunkach mieszkalnych kryterium hałasu, którego źródłem jest turbina wiatrowa, nabiera dużego znaczenia, dlatego też rozwiązanie przedstawione w powyższym artykule może być dobrą alternatywą na terenach o gęstej zabudowie. Rozwiązanie hybrydowe sprawia, że energię elektryczną możemy uzyskać w różnych warunkach pogodowych. Odpowiednio usytuowane elementy, składające się na hybrydowy system generacji energii elektrycznej z energii wiatru i promieni słonecznych, umożliwiają zwiększenie efektywności i zapewniają działanie podłączonych obwodów elektrycznych przez długi okres czasu w ciągu całego roku.

## LITERATURA

- [1] Altan B. D., Atılgan M., Ozdamar A., An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining, *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2008), 1673–1678.
- [2] Fujisawa N., On the torque mechanism of Savonius rotors *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 40 (1992), 277–292.
- [3] Fujisawa N., Gotoh F., Experimental study on the aerodynamic performance of a Savonius rotor, *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME* 116 (1994), 148-152.
- [4] Fujisawa N., Gotoh F., Pressure measurements and flow visualization study of Savonius rotor, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 39 (1992), 51–60.
- [5] Jastrzębska G., *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
- [6] Kurz D., Trzmiel G., „Analyzing the method of determining the energy output of photovoltaic roof tiles”, X AMTEE –Advanced Methods in the Theory of Electrical Engineering, 6 – 9 wrzesień 2011, Klatovy, Czechy, str. V7 – V8.



- [7] Menet J. L., Bourabaa N., Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation, Ecole nationale superieure d'ingenieurs en informatique automatique mecanique énergetique électronique de valenciennes (ensiam) - Université de Valenciennes - Le Mont Houy, F-59313, Valenciennes, Cedex 9, Francja, European Wind Energy Conference and Exhibition, 22-23 November 2004, London, U.K.
- [8] Menet, J. L., Ménart B., Une procédure de comparaison de quelques éoliennes classiques basée sur l'utilisation du critère L-sigma, Actes du 15<sup>e</sup> Congrès Français de Mécanique; 2001.
- [9] Menet J. L., Ménart B., Valdès L.-C., A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the L- $\sigma$  criterion, Renewable Energy 2001; 22: 491-506.
- [10] Ministerstwo Środowiska, Program Rozwoju Energetyki Wiatrowej w Polsce na lata 2002-2005, opracowane przez Europejskie Centrum Energii Odnawialnej - EC BREC, Warszawa 2001.
- [11] Ministerstwo Środowiska, Załącznik do rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 9 stycznia 2002 r. (poz. 81), Wartości Progowe Poziomów Hałasu w Środowisku.
- [12] Osicki A., Pasierb S., Wojtulewicz J., Oszacowanie potencjału zmniejszenia zużycia energii elektrycznej w gospodarstwach domowych w Polsce, Fundacja na rzecz Efektywnego Wykorzystania Energii, Katowice 2006.
- [13] Tytko R., Małe elektrownie wiatrowe (MEW), „Czysta energia” - 2/2010.
- [14] Uracz P., Karolewski B., Modelowanie turbin wiatrowych z wykorzystaniem charakterystyk współczynnika mocy, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Nr 59 Politechniki Wrocławskiej, 2006.
- [15] <http://www.bbizeneris.pl/pl/rynek/energia-wiatru.html>, dn. 10.01.2012 r., godz. 20.00.
- [16] <http://www.energiazwiatru.com.pl/>, dn. 10.01.2012 r., godz. 20.00.
- [17] <http://www.enorgroup.pl>, dn. 10.01.2012 r., godz. 22.10.
- [18] <http://www.miramare.pl/swind/aspekty.html>, dn. 10.01.2012 r., godz. 22.10.
- [19] <http://ogrzewnictwo.pl/artykuly/sposob-na-wlasny-prad-elektrownia-wiatrowa>, dn. 12.01.2012 r., godz. 17.00.
- [20] <http://www.pse.com.pl/pdf/4.pdf>, dn. 14.01.2012, godz. 19.30.
- [21] <http://postcarbon.pl/2009/11/male-elektrownie-wiatrowe/>, dn. 14.01.2012 r., godz. 20.00.
- [22] <http://www.klonu.pl/wiatraki/1.1/1.html>, dn. 19.01.2012, godz. 22.30.

#### **INCREASING THE EFFECTIVENESS OF SAVONIUS TURBINE WORKING IN A HYBRID SYSTEM THROUGH THE APPLICATION OF CURTAIN**

The paper presents Savonius turbine and the results of worldwide research. Statement was made the most optimal geometric parameters and shows how increase a turbine efficiency of energy generation without interfering with the turbine structures, through the use of appropriately selected curtains. Proposed use of building elements to improve the efficiency of the turbine and to create a hybrid system, attaching photovoltaic panels. Calculated energy yield of the entire system and installation diagram is shown in off-grid system.