

PRZEDSIĘBIORSTWO REALIZACJI INWESTYCJI  
„KRET”  
dr inż. Jarosław Filipiak  
Skwierzynka 4e, tel. 601-971-848  
75-016 Koszalin

## OPINIA TECHNICZNA

**dotycząca Turbiny Wiatrowej VAWT Vertical Axis Wind Turbine Darrieurs H-type  
posadowionej na stalowej konstrukcji wsporczej usytuowanej na stropodachu  
budynku Przedszkola Miejskiego w Karlinie przy ul. Moniuszki 8**

### Zlecniodawca

***Gmina Karlino ul. Plac Jana Pawła II 6, 78-230 Karlino***

### Autor opracowania

mgr inż. Elektryk, inż. Budownictwa Bogusław Adalbert STASZCZYK  
Absolwent Studiów Podyplomowych na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym  
Politechniki Wrocławskiej w zakresie: Urządzenia i Systemy Energetyki Odnawialnej

Uprawnienia budowlane AB. III. KF-7132-79/01 ZAP/BO/2943/02

Adres: ul. Konstytucji 3 Maja 13 A/5

75-821 KOSZALIN

Tel. (94) 342-07-12; tel. kom. 604-403-400

.....

Koszalin, maj 2015 r.

## **ZAWARTOŚĆ OPRACOWANIA**

1. Podstawa opracowania
2. Cel i zakres opracowania
3. Ogólna charakterystyka Turbiny VAWT
4. Opis konstrukcji, zasada działania oraz ocena przyczyn awarii rotora Turbiny VAWT DARRIEUS Typu H
5. Wyniki badań
6. Wnioski i zalecenia

### **ZAŁĄCZNIKI:**

- Oświadczenie o zgodności wykonywanej ekspertyzy z obowiązującymi przepisami
- Uprawnienia budowlane
- Zaświadczenie o przynależności do Zachodniopomorskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa

### **OŚWIADCZENIE**

Niniejszym oświadczam, że ekspertyzę wykonano zgodnie z obowiązującymi przepisami i najlepszą wiedzą techniczną w zakresie konstrukcji stalowych oraz kinetyki i dynamiki Turbin Wiatrowych. Autor opracowania posiada własne rozwiązania patentowe turbin wiatrowych zatwierdzone przez Urząd Patentowy RP.

.....

## OPINIA TECHNICZNA

**dotycząca Turbiny Wiatrowej VAWT DARRIEURS posadowionej na stropodachu budynku Przedszkola miejskiego w Karlinie, która uległa awarii w grudniu 2013 r.**

### 1. Podstawa opracowania

- 1.1. Zlecenie Gminy Karlino podpisane przez Burmistrza.
- 1.2. Brak projektu konstrukcyjnego Turbiny. Wykonawca a zarazem sprzedający, czyli firma Quanteec Europe Sp. z o.o. Warszawa nie przekazała nabywcy, tj. Gminie Karlino wymaganych dokumentów.
- 1.3. Wizja lokalna, badania i oględziny konstrukcji Turbiny VAWT a w szczególności jej rotora oraz dokumentacja fotograficzna wykonana w dniu 24.04.2015 r.
- 1.4. Literatura Techniczna i normy:
  - 1.4.1. J. Park: The Wind Power Book. Cheshire Book, CA 1981.
  - 1.4.2. E. M. Fatiejew: Wietrodwigatieli i Wietroustanowki. OGIZ, Moskwa 1948.
  - 1.4.3. W. Jagodziński: Silniki Wiatrowe. PWT, Warszawa 1959.
  - 1.4.4. G. Jastrzębska: Odnawialne źródła energii. WNT, Warszawa 2007.
  - 1.4.5. R.A. Duckworth: Mechanika płynów. WNT, Warszawa 1983.
  - 1.4.6. Z. M. Jarzębski: Energia słoneczna Konwersja fotowoltaiczna. PWN, Warszawa 1990.
- 1.5. PN-EN 1991-1:2008 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Obciążenia wiatrem.
- 1.6. PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- 1.7. PN-EN 61400-2:2006 Turbozespoły Wiatrowe – Bezpieczeństwo małych turbin wiatrowych.
- 1.8. PN-IEC 61400-1:2004 Turbozespoły wiatrowe – Wymagania dotyczące bezpieczeństwa.
- 1.9. PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych – nie ma zastosowania ze względu na małą moc mikroelektrowni.

### 2. Cel i zakres opracowania

Celem niniejszego opracowania jest określenie przyczyn powstania awarii Turbiny Wiatrowej VAWT posadowionej na budynku Przedszkola Miejskiego w Karlinie przy ul. Moniuszki 8.

Zakresem opracowania objęto:

- ogólny opis konstrukcji turbiny,
- ocenę przyczyn awarii turbiny,
- wnioski i zalecenia.

### 3. Ogólna charakterystyka Turbiny VAWT w Karlinie

Przedmiotowa Turbina wiatrowa VAWT posadowiona została na stalowej konstrukcji wsporczej usytuowanej na stropodachu Przedszkola Miejskiego w Karlinie. Łączna wysokość od poziomu zerowego to  $H = \text{ok. } 8 \text{ m}$ .





**Fot. 3.1.** Usytuowanie turbiny wiatrowej na stropodachu budynku Przedszkola

Konstrukcję wsporczą turbiny wiatrowej stanowi rama stalowa wykonana z dwuteowników I 200 wraz z wieżą utwierdzoną w ramie stalowej poprzez skręcenie śrubami podstawy wieży do ramy stalowej. Utwierdzenie wieży wzmocnione jest zastrzałami zabezpieczającymi przed momentem zginającym wywołanym parciem wiatru na wirnik (rotor) turbiny wiatrowej. Takie rozwiązanie zapewnia sztywność konstrukcji ale wnosi też niedogodność aerodynamiczną w postaci zawirowań i turbulencji pomiędzy rotorem i attyką szczytową oraz zastrzałami i resztą konstrukcji wsporczej ze względu na zbyt małą wysokość wieży. Zatem wysokość wieży należy zwiększyć minimum o 1,5 m.

#### **4. Ogólny opis konstrukcji, zasada działania Turbiny**

Ocena awarii rotora turbiny VAWT oraz uzasadnienie przyczyn powstałej awarii

- ogólny opis konstrukcji:
- zasada działania Turbiny
- ocena awarii rotora turbiny
- uzasadnienie przyczyn powstałej awarii

##### **4.1. Ogólny opis konstrukcji Turbiny VAWT Typ H**

Turbina Wiatrowa Darrieusa Typ H to konstrukcja jednego z dwóch rodzajów turbin wiatrowych o pionowej osi obrotów niezależnych od kierunku wiania wiatru. Siłownia ta służy do zamiany energii kinetycznej wiatru na energię mechaniczną ruchu obrotowego rotora osiowo sprzężonego z generatorem prądotwórczym w którym następuje zamiana energii mechanicznej w elektryczną.

$$P = F \times V \quad \rightarrow \quad M \times \omega \quad \rightarrow \quad P = U \times I \text{ [W]}$$

{moc strugi wiatru}                      {moc mechaniczna rotora}                      {moc elektryczna wyprodukowana przez generator prądowórczy}

gdzie  $P$  – moc niesiona przez strugę wiatru,  
 $F$  – siła wynikająca z parcia strugi wiatru na daną powierzchnię,  
 $M$  – moment obrotowy,  
 $\omega$  – prędkość obrotowa,  
 $U$  – napięcie [V],  
 $I$  – prąd [A].

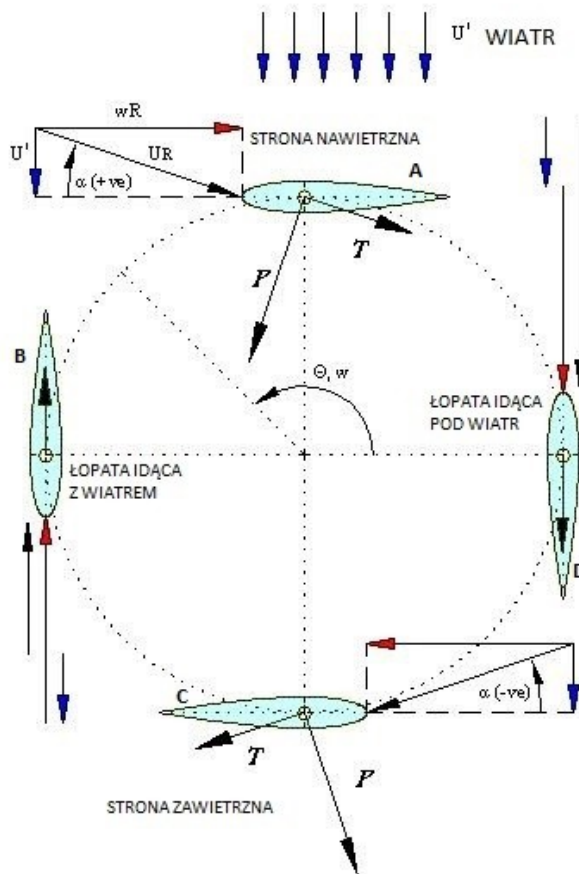
**Tab. 4.1. Parametry techniczne Turbiny VAWT 6 kW**

Moc nominalna	6000W
Moc maksymalna	6500W
Typ generatora	PMG
Średnica wirnika	2,5 m
Liczba obrotów	100 obr/min
Napięcie nominalne	220V
Nominalna prędkość wiatru	10m/s
Zakres prędkości wiatru	2-18 m/s
Liczba łopat	5
Typ rotora	DARRIEUS H-type
Długość łopat	2500 mm
Materiał łopat	FRP <sup>*)</sup>
Wysokość wieży	8 m
Waga generatora	250 kg

<sup>\*)</sup> FRP → Łopaty robocze rotora wykonane są z materiału o nazwie FRP (Fiber Reinforced Plastics) co oznacza włókno wzmacniane plastikiem a dosłownie włókno węglowe wzmacniane poliestrem.

#### 4.2. Zasada działania Turbiny Wiatrowej Darrieusa Typ H

$F$  – siła nośna wytworzona na profilu aerodynamicznym wskutek opływu strugi wiatru zgodnie z prawem Bernoullego,  
 $T$  – siła oporu profilu aerodynamicznego w strudze wiejącego wiatru,  
 $U'$  – prędkość strugi wiatru.



**Rys. 4.1.** Ogólny przykład Turbiny Wiatrowej Darrieusa oraz rozkład sił na profilach aerodynamicznych powstałych wskutek oddziaływania strugi wiatru na wirujące łopaty rotora

Łopata **A** strona nawietrzna

Łopata **B** idąca z wiatrem

Łopata **C** strona zawietrzna

Łopata **D** idąca pod wiatr

$$V \times w_1 = V - u$$

$$V \times w_2 = V - u$$

gdzie:  $V$  – prędkość wiatru,

$V_w$  – prędkość wypadkowa,

$u$  – prędkość styczna do obwodu rotora Turbiny Wiatrowej.

Na łopaty nawietrzne i zawietrzne działają siły z racji parcia wiatru wywołując różne energie kinetyczne:

Łopaty nawietrzne:

$$E_{kn} = \frac{mV^2}{2}$$

$$E_{kn} = \frac{\gamma AVV^2}{2}$$

$$E_{kn} = \frac{\gamma AV^3}{2}$$

$$m = \gamma A V$$

przy czym

$$E_{kn} > E_{kz}$$

Łopaty zawietrzne:

$$E_{kz} = \frac{mV^2}{2}$$

$$E_{kz} = \frac{\gamma AVV^2}{2}$$

$$E_{kz} = \frac{\gamma AV^3}{2}$$

Energia kinetyczna wiatru

$$E_{kv} = \frac{mV^2}{2} \quad \text{gdzie } m = \gamma A V$$

powoduje powstanie siły nośnej na profilach łopat i wirnik zaczyna się obracać przeciwnie do ruchu wskazówek zegara

W czasie obrotu wirnika (rotora) Turbiny Darrieusa wypadkowe opływu profilów łopat wynikają z sumowania prędkości wiatru i prędkości stycznej do obwodu rotora oraz położenia kąтового łopat względem kierunku wiejącego wiatru, który napływa na łopaty nawietrzne pod dodatnim kątem natarcia. Łopaty zamocowane na obwodzie walca rotora posiadające profil aerodynamiczny taki aby kąt natarcia powodował powstanie siły „nośnej”. Siła ta powoduje wykonanie pracy przez rotor turbiny zamocowany bezpośrednio na piaście sprzężonej z wałem wirnika generatora prądotwórczego. Turbina ta posiada stosunkowo mały moment rozruchowy dla prędkości wiatru z otoczenia zera, który gwałtownie rośnie wraz z narastającą prędkością wiatru.

Siła nośna wirujących łopat narasta wraz z rosnącą prędkością wiatru oraz rosnącą prędkością obrotową wirnika (rotora) Turbiny VAWT. Wirnik wiruje z prędkością styczną do obwodu większą od prędkości wiatru i wprost proporcjonalną do niej. Ma zatem tendencje do rozbiegania się. Stabilizacja prędkości obrotowej wykonywana jest przez kontroler gdzie wytworzona energia elektryczna tracona jest na trzech rezystorach (po jednym na fazę A, B, C) po przekroczeniu wartości nominalnej napięcia generowanego w generatorze prądotwórczym wprost proporcjonalnym do prędkości wiejącego wiatru.

#### 4.3. Ocena awarii rotora turbiny

Turbina Wiatrowa VAWT Darrieusa jest poważnie narażona na uszkodzenia mechaniczne rotora z powodu bardzo dużych sił odśrodkowych spowodowanych nagłą porywistością wiatru przekraczającą prędkości normatywne co w naszym regionie zdarza się dość często oraz asymetrycznością sił na łopatach idących pod wiatr i z wiatrem, jak też po stronie nawietrznej i zawietrznej (Rys 4.1)

Awaria rotora nastąpiła wskutek dużej prędkości i porywistości wiatru oraz z braku skutecznego hamowania, co świadczy o zaniku lub pulsacji napięcia elektrycznego w sieci elektroenergetycznej. Przy zaniku napięcia nie zadziała hamowanie generatorem prądotwórczym co spowodowane jest brakiem składowej stałej napięcia wystawianej przez kontroler inwertera; po prostu brak hamowania stałym polem magnetycznym. Widoczne odkształcenia wspornika wskazują że zadziałał moment prawoskrętny (zgodny z ruchem wskazówek zegara). Jest on ściśle związany z asymetrią zamocowania łopat roboczych co daje duży moment bezwładności górnej części łopat w przeciwieństwie do mniejszego momentu bezwładności dolnej części łopat. Oddziaływanie dużych momentów skręcających i momentów gnących wpłynęło deformująco również na piastę rotora. O błędach inwertera można wiążąco się wypowiedzieć przy prawidłowo pracującej Turbinie Wiatrowej. Inwertery są przetwornicami elektronicznymi i rzadko ulegają awarii.

#### 4.4. Uzasadnienie przyczyn powstałej awarii Turbiny Wiatrowej VAWT Darrieusa Typ H

Awaria Turbiny została spowodowana następującymi przyczynami:

- nagłą porywistością i dużą prędkością wiatru – znacznie większą od nominalnej,
- zanikiem napięcia w sieci – wówczas hamowanie elektryczne przestaje działać,
- pracą START-STOP przy dużych prędkościach wiatru,
- brakiem mechanicznego hamulca ciernego uruchamianego elektrycznie przez kontroler po przekroczeniu maksymalnej prędkości wiatru,
- brakiem hamulca ręcznego – stosuje się go w okresie burzowym oraz w czasie przeprowadzanego remontu turbiny,
- niewłaściwą konstrukcją rotora – to złe profile wsporników, asymetria mocowania łopat do wsporników, wsporniki powinny być mocowane prostopadle do osi obrotu rotora,
- asymetria mocowania łopat roboczych – łopaty mocowane są z piastą turbiny za pomocą stalowych wsporników, wsporniki górne spięte są z łopatami nieco poniżej połowy ich wysokości, natomiast dolne wsporniki w jednej trzeciej wysokości łopat, drugie końce wsporników zamocowane są do piasty osadzonej na wale generatora prądotwórczego przy pomocy czterech śrub każdy stanowiąc wierzchołek trójkąta. Takie zamocowanie nie zapewnia odpowiedniej sztywności i jest bardzo podatne na działanie momentów skręcających i momentów zginających przenoszonych na piastę zamocowaną bezpośrednio na wale wirnika generatora prądotwórczego. To wszystko spowodowało brak stateczności elementów konstrukcyjnych takich jak: odkształcenie łączników oraz piasty.
- wsporniki łączące łopaty z piastą wykonane z blachy ze wspawanym wzdłużnie żebrzem to elementy niewłaściwe, nie zapewniają dostatecznej sztywności, na nich w czasie wirowania rotora powstają zawirowania i turbulencje wpływając hamująco na rotor, ponadto wywołują drgania mechaniczne. Przedmiotowe łączniki powinny być wykonane z rur o zamkniętym przekroju eliptycznym i zamocowane prostopadle do łopat oraz osi obrotu. Taka konstrukcja zapewnia odpowiednią sztywność wirującemu rotorowi.

#### 5. Wyniki badań

W dniu 24.04.2015 r. przeprowadzono wizję lokalną uszkodzonej turbiny wiatrowej posadowionej na konstrukcji wsporczej usytuowanej na budynku Przedszkola Miejskiego w Karlinie przy ulicy Moniuszki 8. W czasie wizji lokalnej przeprowadzono szczegółowe oględziny rotora Turbiny VAWT Darrieusa typ H i sporządzono dokumentację fotograficzną. Podczas oględzin stwierdzono znaczne odkształcenia wsporników umocowanych w piaście, do których zamocowano w sposób niesymetryczny łopaty robocze rotora turbiny (Fot. 5.2 ÷ 5.13). Stwierdzono również deformacje piasty, do której zamocowane są wsporniki. Odkształcenia wsporników i deformacja piasty to efekt negatywny oddziaływania momentów zginających i skręcających pochodzących od wirujących mas łopat roboczych i ponadnormatywnego parcia wiatru na łopaty robocze oraz sił odśrodkowych rosnących wprost proporcjonalnie z prędkością obrotową wzmiankowanego rotora Turbiny VAWT. Deformacja wsporników spowodowana jest brakiem ciągłości spoiny blachy z żebrzem wspornika (Fot. 5.10).



*Fot. 5.1. Usytuowanie turbiny wiatrowej na stropodachu budynku Przedszkola*



*Fot. 5.2. Widok turbiny posadowionej na konstrukcji wsporczej*





*Fot. 5.3. Widok Turbiny z wzajemnymi przemieszczeniami i asymetrią zamocowań łopat*



*Fot. 5.4. Widok Turbiny z wzajemnymi przemieszczeniami i asymetrią zamocowań łopat*



*Fot. 5.5. Widok Turbiny z wzajemnymi przemieszczeniami i asymetrią zamocowań łopat*



*Fot. 5.6. Odształcenia wsporników*





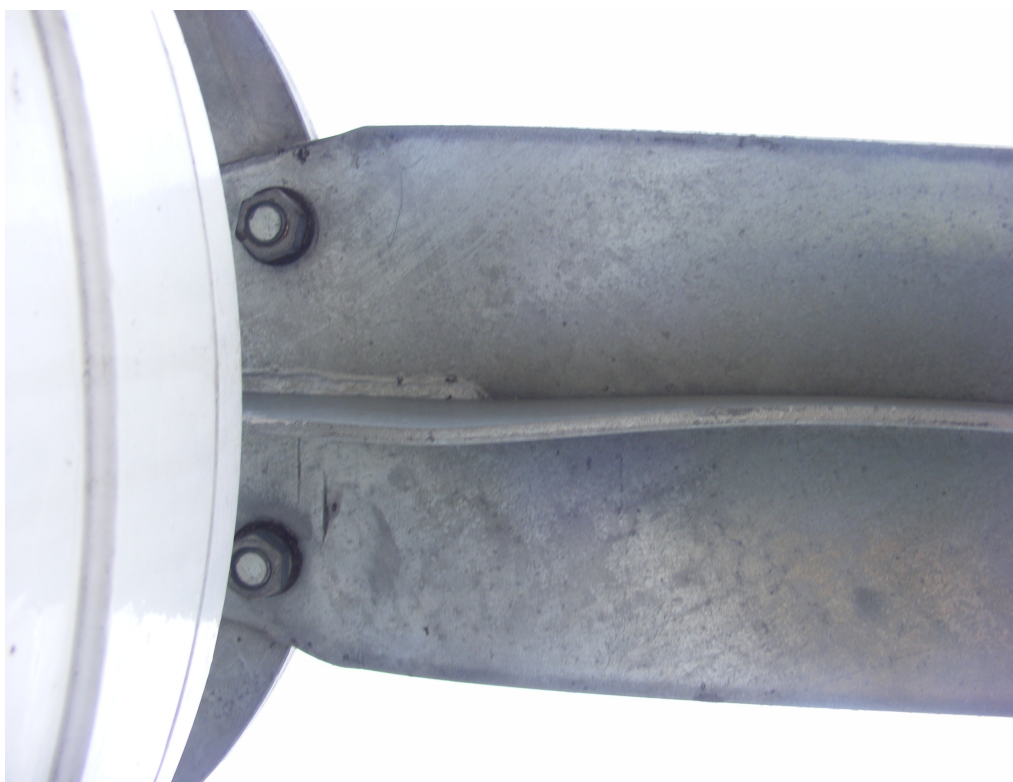
*Fot. 5.7. Odkształcenia wsporników*



*Fot. 5.8. Odkształcenia wsporników*



*Fot. 5.9. Odształcenia wsporników*



*Fot. 5.10. Odształcony wspornik, na który działały momenty skręcające oraz momenty zginające. Odształcenie spowodowane brakiem ciągłości spoiny blachy z żebrzem wspornika.*





*Fot. 5.11. Odkształcenia wsporników*



*Fot. 5.12. Odkształcenia wsporników*



*Fot. 5.13. Odkształcenia wsporników*



*Fot. 5.14. Inwerter*

## **6. Wnioski i zalecenia**

### **6.1. Wnioski**

Z analizy przeprowadzonych oględzin popartych dokumentacją fotograficzną jasno wynika, że awaria rotora nastąpiła wskutek dużej prędkości i porywistości wiatru oraz z braku skutecznego hamowania, co świadczy o zaniku lub pulsacji napięcia elektrycznego w sieci elektroenergetycznej. Przy zaniku napięcia nie zadziała hamowanie generatorem prądotwórczym co spowodowane jest brakiem składowej stałej wystawianej przez kontroler inwertera, po prostu brak hamowania stałym polem magnetycznym. Natomiast przy pulsacji (zanik i pojawianie się napięcia w sieci elektroenergetycznej) – wystąpi praca START – STOP rotora, co jest szczególnie groźne dla Turbiny VAWT. Praca STOP – START powoduje odkształcenie wspornika co widać wyraźnie, że zadziałał moment prawoskrętny (zgodny z ruchem wskazówek zegara). Jest on ściśle związany z asymetrią zamocowania łopat roboczych co daje duży moment bezwładności górnej części łopat w przeciwieństwie do mniejszego momentu bezwładności dolnej części łopat. Oddziaływanie dużych momentów gnących i momentów skręcających wpłynęło deformująco również na piastę rotora. O błędach inwertera można wiążąco się wypowiedzieć przy prawidłowo pracującej Turbinie Wiatrowej. Inwertery są przetwornicami elektronicznymi i rzadko ulegają awarii.

### **6.2. Zalecenia**

Jeżeli turbina VAWT posadowiona na stropodachu budynku Przedszkola Miejskiego w Karlinie ma być dalej eksploatowana, to należy ją przekonstruować. Wsporniki łopat roboczych należy wykonać z rur stalowych o przekroju eliptycznym zamkniętym lub z rur stalowych o przekroju prostokątnym zamkniętym. Wsporniki należy zamontować prostopadle do wału obrotowego rotora turbiny. Zamocowanie łopat do wsporników musi być w pełni symetryczne. Należy również zwiększyć wysokość wieży o (1.5÷2.0) m aby uniknąć zawirowań i turbulencji pomiędzy dolną częścią rotora a attyką szczytową oraz zastrzałami konstrukcji wsporczej co wiąże się ze znacznymi kosztami. Lepiej zainwestować w fotowoltaikę. To znacznie tańsze i bez porównania bezpieczniejsze rozwiązanie konwersji energii słonecznej bezpośrednio w energię elektryczną. Koszt systemu fotowoltaicznego o mocy 6 kW to wydatek około 35 000 zł. wraz z inwerterem.