

Damian GŁUCHY*
Dariusz KURZ*
Grzegorz TRZMIEL*

BADANIA EFEKTYWNOŚCI PRACY FOTODACHÓWEK UMIESZCZONYCH NA RÓŻNYCH PODŁOŻACH DACHOWYCH

W pracy zwrócono uwagę na problem wpływu temperatury pracy ogniw PV, wchodzących w skład dachówek solarnych, na uzysk mocy. Przedstawiono skonstruowane stanowisko badawcze wraz z systemem pomiarowym, scharakteryzowano jego elementy składowe oraz metodykę prowadzonych badań. Zaprezentowano i skomentowano wstępne wyniki pomiarów. Wskazano możliwe korzyści wynikające z prowadzonych prac dla różnych grup odbiorców.

SŁOWA KLUCZOWE: dachówka fotowoltaiczna, uzysk mocy, sprawność, temperatura ogniw PV, uwarstwienie dachu, podłoże dachowe

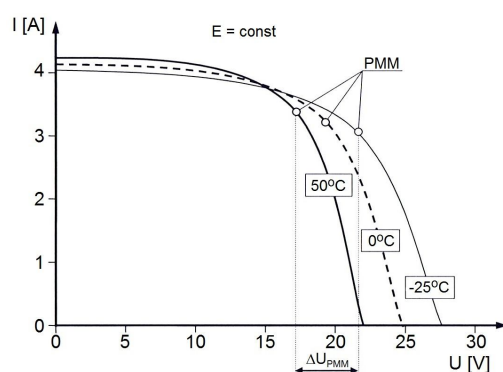
1. WPROWADZENIE

Globalne ocieplenie klimatu, wyczerpywanie się złóż naturalnych paliw kopalnych, ograniczenia w emisji dwutlenku węgla do atmosfery oraz wiele innych czynników zmusza do poszukiwania nowych, zielonych źródeł energii odnawialnej. Niezbędne jest więc prowadzenie badań naukowych dotyczących tych źródeł a w szczególności nad podnoszeniem ich sprawności generacji energii, jej przetwarzaniem, magazynowaniem oraz efektywnym wykorzystywaniem. Na szczególną uwagę zasługuje niewątpliwie energetyka słoneczna, a zwłaszcza jej najnowsza forma, czyli fotowoltaika zintegrowana z budynkiem (ang. BIPV – Building Integrated Photovoltaics). Niektóre elementy budowlane (takie jak pustaki, dachówki, szyby) poprzez ich połączenie z ogniwami fotowoltaicznymi tworzą spójną całość i cechują się własnościami obydwu elementów. Zastępując zwykłą dachówkę ceramiczną dachówką solarną, nie tylko uzyskuje się izolację termiczną czy wodną budynku, ale także możliwość konwersji energii słonecznej w elektryczną. Dodatkowo energia tworzona jest w miejscu jej wykorzystania, co jest szczególnie istotne w obszarach miejskich o gęstej zabudowie oraz na obszarach oddalonych od elektrowni. Elementy te nie zaburzają estetyki krajobrazu

* Politechnika Poznańska.

ani nie wymagają dodatkowej przestrzeni, dlatego też to właśnie ten element systemu BIPV ma największe szanse na szybką popularyzację wśród inwestorów budowlanych i powszechne zastosowanie w budownictwie ekologicznym, wypierając stopniowo tradycyjne panele fotowoltaiczne.

Jak powszechnie wiadomo z literatury przedmiotu, na ilość generowanej energii wpływa temperatura fotoogniw, co pokazano na rysunku 1. Jej wzrost prowadzi do obniżenia wartości uzyskiwanego napięcia, a tym samym do obniżenia sprawności panelu.



Rys. 1. Charakterystyka prądowo – napięciowa fotoogniwa w zależności od temperatury komórki [4]

W przypadku elementów BIPV problem ten staje się o wiele bardziej złożony, niż dla tradycyjnych paneli, montowanych na specjalnej konstrukcji wsporczej nad powierzchnią dachu. Wynika to z samego założenia konstrukcyjnego elementów BIPV, które zastępując materiały budowlane stają się integralną częścią budynku, przez co narażone są na zmienne warunki pracy. Pod powierzchnią dachówek fotowoltaicznych znajduje się o wiele mniejsza masa powietrza, niż pod tradycyjnym panelem, istnieją inne warunki wymiany ciepła z otoczeniem, a także brak jest naturalnego przewietrzania.

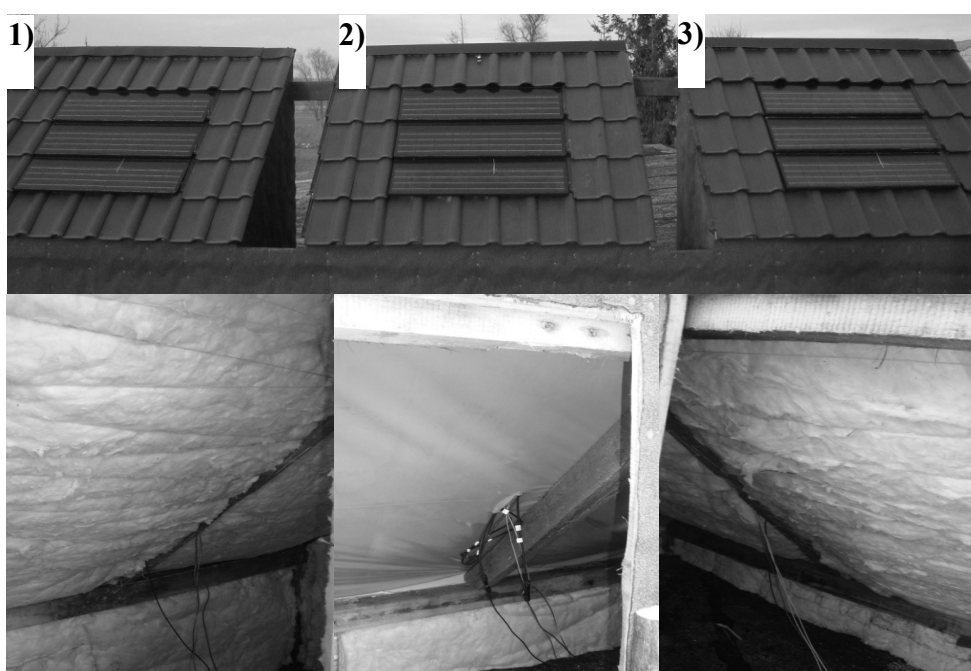
Istotną rolę odgrywa również materiał konstrukcyjny podłoża dachowego, a w szczególności jego właściwości termiczne, współczynnik wymiany ciepła z otoczeniem, izolacja termiczna itp. Wstępne badania pozwoliły na postawienie hipotez badawczych, które planuje się dowieść poprzez przeprowadzenie równoległych, całorocznych badań wpływu rodzaju podłoża na ilość generowanej energii elektrycznej.

2. STANOWISKO BADAWCZE

Prowadzone badania mają na celu wyznaczenie wpływu rodzaju materiału konstrukcyjnego podłoża dachowego na ilość generowanej energii elektrycznej, przy identycznych warunkach pogodowych. W tym celu została wzniesiona

specjalna konstrukcja dachowa (na płaskim dachu istniejącego budynku) złożona z identycznymi dachówek fotowoltaicznych umieszczonych na różnych podłożach. Widoczne na rysunku 2 fragmenty dachów składają się z następujących materiałów (odpowiednio od lewej):

- 1) folii dachowej z ociepleniem wełną mineralną (dach 1),
- 2) folii dachowej bez ocieplenia (dach 2),
- 3) desek pokrytych papą z ociepleniem wełną mineralną (dach 3).



Rys. 2. Stanowisko badawcze – konstrukcje dachowej z różnymi podłożami

W celu odzwierciedlenia warunków pracy najczęściej spotykanych w rzeczywistości wybrano przedstawione materiały (deski, folia) oraz wykonano bądź nie ocieplenie dachu wełną mineralną. W celu zapewnienia identycznych warunków otoczenia (temperatury otoczenia, nasłonecznienia) badania prowadzone są jednocześnie na wszystkich trzech instalacjach, przez okres całego roku w wybrane dni każdego miesiąca. Dzięki temu zostanie także wyznaczony wpływ warunków pogodowych na badane parametry. W celu zapewnienia najbardziej optymalnych warunków pracy systemu przez cały rok, ogniwa zostały skierowane na południe i nachylone pod kątem 37° do powierzchni ziemi [1 - 4].

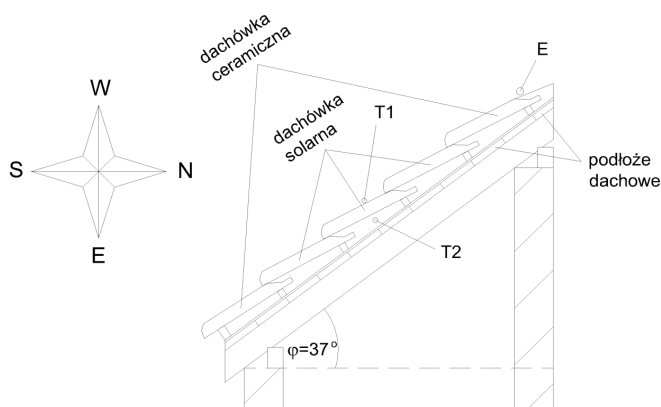
Za pomocą zautomatyzowanego systemu pomiarowego, z każdego zestawu badanych fotodachówek zbierane są informacje o wartości chwilowej prądu, napięcia i mocy, jakie—uzyskane są w procesie konwersji fotowoltaicznej.

Pomiarom podlega także gęstość mocy promieniowania słonecznego (E [W/m^2]) oraz temperatura powierzchni roboczej dachówki ($T1$ [$^{\circ}\text{C}$]) i przestrzeni powietrznej pomiędzy dachówką a konstrukcją dachową ($T2$ [$^{\circ}\text{C}$]). Dodatkowo mierzona jest temperatura oraz wilgotność powietrza.

W skład systemu pomiarowego wchodzi:

- dachówki fotowoltaiczne FOTTON 52 W (3 dachówki połączone szeregowo na każdej instalacji) [5],
- rejestrator dwudziesto kanałowy,
- czujniki temperatury PT100,
- cęgi prądowe,
- rezystory stanowiące obciążenie (niezbędne do zdjęcia charakterystyki prądowo-napięciowej dachówki solarnej i wyznaczenia parametrów w punkcie maksymalnej mocy PMM),
- komputer PC.

System pomiarowy został wykonany zgodnie z odpowiednimi wymaganiami pracy w terenie otwartym, takimi jak np. opady czy temperatura.



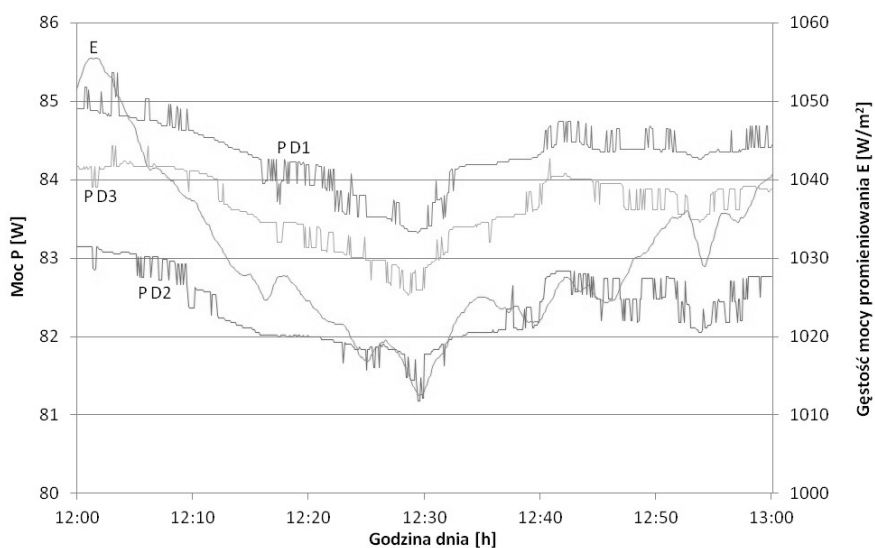
Rys. 3. Schemat rozmieszczenia elementów składowych dachu oraz czujników

Rozmieszczenie czujników oraz elementów składowych jednego z trzech dachów (z deskami, papą oraz wełną) przedstawiono na rys. 3. Dla pozostałych dwóch rodzajów podłoża umiejscowienie elementów pomiarowych jest identyczne.

Zaimplementowany system pomiarowy pozwala na zapis próbek danych, zmianę parametrów pomiarowych oraz obliczanie i przechowywanie rezultatów badań. Efektem kalkulacji będą docelowo zestawienia tabelaryczne i graficzne otrzymanych wyników w celu dokonania analizy uzysków energii na różnych podłożach dachowych w tej samej lokalizacji geograficznej i przy tych samych warunkach pracy. Poprawność danych pochodzących z systemu pomiarowego będzie okresowo weryfikowana przy użyciu tradycyjnych mierników wartości gęstości mocy promieniowania, temperatury, prądu i napięcia.

3. POMIARY WSTĘPNE

Analiza przykładowych pomiarów i wykonanych charakterystyk z dnia 29.06.2013 w godzinach 12-13 przy pewnym obciążeniu modułów PV (rys. 4, rys. 5 i rys. 6) pozwala wyciągnąć pierwsze wnioski dotyczące wpływu podłoża na pracę instalacji fotowoltaicznej.



Rys. 4. Charakterystyka uzyskanej mocy oraz gęstości mocy promieniowania w zależności od godziny dnia: E – gęstość mocy promieniowania słonecznego, P D1 – uzysk mocy na dachu 1 (z folią i wełną), P D2 – uzysk mocy na dachu 2 (z folią), P D3 – uzysk mocy na dachu 3 (z deskami, papą i wełną)

Z zamieszczonych charakterystyk jednoznacznie można zauważyć nagłe zmiany uzyskiwanej mocy w zależności od gęstości mocy promieniowania słonecznego (rys. 4). Największa moc uzyskiwana jest z instalacji położonej na folii i wełnie mineralnej, nieco mniejsza na dachu z deskami i papą, natomiast najniższa na samej folii dachowej. Różnica mocy w tym przypadku wynosi ok. 2,3 %, czyli ok. 2 W. Należy jeszcze zauważyć, że badana instalacja miała moc znamionową równą tylko 156 W (3 fotodachówki po 52 W każda). Zakładając rzeczywistą instalację, o zainstalowanej mocy np. 2 kW, różnica wynosiłaby już niecałe 50 W, czyli tyle co wartość mocy z jednej fotodachówki. Dodatkowo przy gęstości mocy promieniowania ok. 1030 W/m² moc otrzymana z instalacji w punkcie mocy maksymalnej o godzinie 12 wynosiła odpowiednio 122,8 W na dachu 1, 119 W na dachu 2 oraz 113,2 W na dachu 3, czyli maksymalna różnica mocy wyniosła już ok. 8,4 %. Można przypuszczać, że właściwie obciążenie ogniw PV wpłynie również na powstające różnice uzyskiwanej mocy.

W celu wyznaczenia charakterystycznych parametrów elektrycznych, decydujących o własnościach ogniwa (takich jak moc P , moc maksymalna P_{\max} , sprawność η , współczynnik wypełnienia FF) posłużono się wartościami z przeprowadzonych na stanowisku badawczym pomiarami i użyto następujących wzorów [3, 4]:

$$P = UI \quad [\text{W}] \quad (1)$$

$$P_{\max} = U_M I_M \quad [\text{W}] \quad (2)$$

$$\eta = \frac{U_M I_M}{ES} 100 \quad [\%] \quad (3)$$

$$FF = \frac{U_M I_M}{U_{oc} I_{sc}} \quad [-] \quad (4)$$

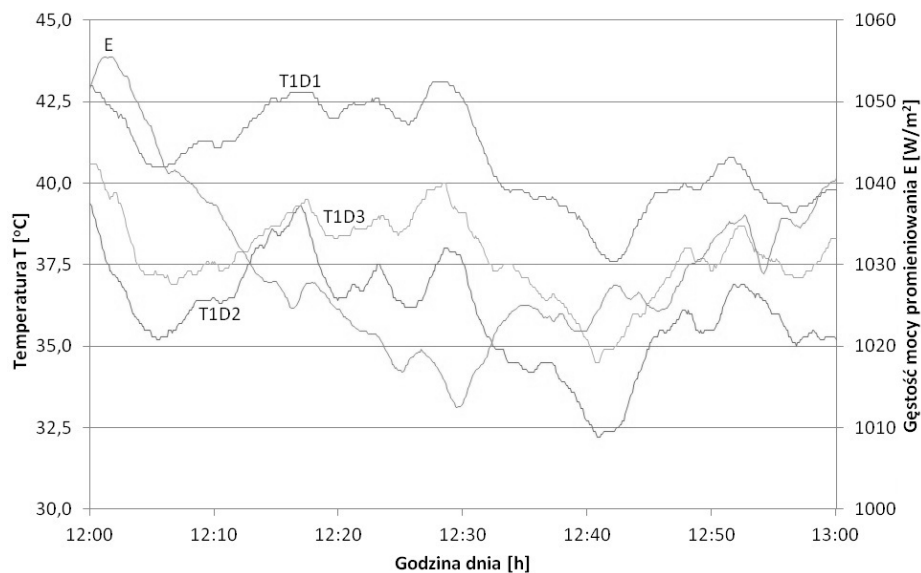
Wyznaczone wartości powyższych parametrów na trzech badanych dachach w przytoczonym dniu o godzinie 12-ej przy optymalnym obciążeniu instalacji PV oraz dla wartości średnich w godzinnym przedziale czasowym 12 – 13 zestawiono w tabeli 1.

Analizując wartości sprawności otrzymane na poszczególnych instalacjach można zauważyć analogiczne zależności jak przytoczone wcześniej, dotyczące uzyskiwanej mocy. Ze względu na niemożność wyznaczenia wartości prądu zwarcia i napięcia stanu jałowego dla przedziału czasowego 12 – 13 przyjęto ich wartości empirycznie na podstawie archiwalnych pomiarów wykonywanych w analogicznych warunkach.

Wartości współczynników wypełnienia FF potwierdzają także przypuszczenie, że właściwe obciążenie ogniw PV wpływa również na wartości mocy. Gdy ogniwa nie są właściwie obciążone (jak w przypadku przedziału czasowego 12 – 13) współczynnik ten wynosi ok. 0,5, natomiast o godzinie 12-ej (przy optymalnym obciążeniu) otrzymano wartość ok. 0,7.

Tabela 1. Wartości parametrów elektrycznych instalacji badanych na poszczególnych dachach

Godz.	Dach	S	E	I_M	U_M	P_{\max}	I_{sc}	U_{oc}	η	FF
		[m ²]	[W/m ²]	[A]	[V]	[W]	[A]	[V]	[%]	[-]
12	dach 1	1,2	979,4	4,88	25,16	122,78	5,37	31,74	9,93	0,72
	dach 2			4,82	24,68	119,0	5,40	31,39	9,63	0,70
	dach 3			4,74	23,89	113,2	5,15	30,80	9,16	0,72
12-13	dach 1		1030,2	3,09	26,67	82,36	5,37	31,74	6,67	0,49
	dach 2			3,10	27,21	84,31	5,40	31,39	6,82	0,49
	dach 3			3,21	26,04	83,64	5,15	30,80	6,76	0,53



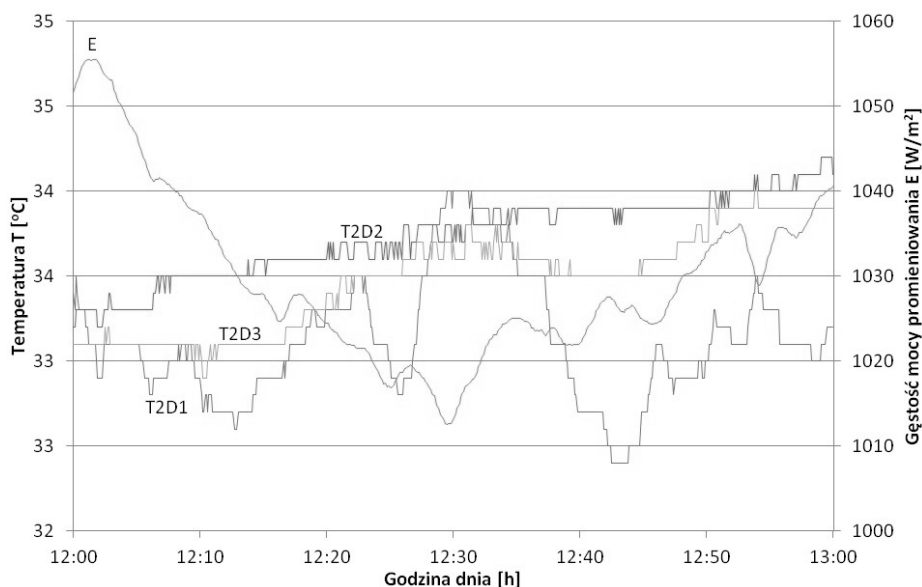
Rys. 5. Charakterystyka temperatury ogniw PV oraz gęstości mocy promieniowania w zależności od godziny dnia: E – gęstość mocy promieniowania słonecznego, T1D1 – temperatura ogniw PV na dachu 1 (z folią i wełną), T1D2 – temperatura ogniw PV na dachu 2 (z folią), T1D3 – temperatura ogniw PV na dachu 3 (z deskami, papą i wełną)

Temperatura ogniw PV zmienia się także wraz ze zmianą nasłonecznienia, jednak zmiana ta zachodzi oczywiście dopiero po pewnym czasie (rys. 5). Dużo bardziej stabilna jest temperatura powietrza znajdującego się w szczelinie pomiędzy dachówką a podłożem, która rośnie wraz z upływem czasu podczas pracy instalacji (rys. 6).

Folia dachowa w kolorze żółtym odbija ciepło w szczelinie dachowej i dodatkowo podgrzewa ogniwa PV od spodu (a nie tylko od góry przez promienie słoneczne). Czarna papa i deski pochłania pewną część ciepła z powietrza. Wełna mineralna izoluje dach i nie pozwala na swobodną wymianę ciepła z powietrzem znajdującym się pod dachem na poddaszu.

Pomimo, że największą moc uzyskano na podłożu z folii i wełny, to tylko nieznacznie niższą wartość uzysku mocy obserwuje się na deskach z papą. To podłoże wydaje się być najodpowiedniejsze, gdyż jako jedyne z badanych charakteryzuje się dużą stabilnością mocy i temperatur, co w dłuższej perspektywie pracy może być najistotniejsze.

Dokładne wnioski będzie można wyciągnąć po przeanalizowaniu wszystkich pomiarów z całego roku w różnych warunkach. Wtedy będzie można określić, które podłoże lepiej sprawdzi się na przestrzeni wszystkich pór roku oraz odnieść to do właściwości termicznych poszczególnych materiałów.



Rys. 6. Charakterystyka temperatury powietrza w szczelinie dachowej oraz gęstości mocy promieniowania w zależności od godziny dnia: E – gęstość mocy promieniowania słonecznego, T2D1 – temperatura powietrza w szczelinie na dachu 1 (z folią i wełną), T2D2 – temperatura powietrza w szczelinie na dachu 2 (z folią), T2D3 – temperatura powietrza w szczelinie na dachu 3 (z deskami, papą i wełną)

5. WNIOSKI

Wyniki prowadzonych badań powinny w przyszłości wskazać rodzaj podłoża dachowego pozwalającego na uzyskanie najlepszych parametrów pracy dachówek fotowoltaicznych oraz maksymalizację uzysków mocy z instalacji PV. Dodatkowo planowana szczegółowa analiza rezultatów w ujęciu czasowym ma dostarczyć wskazówki, co do opłacalności i zwrotu kosztów inwestycyjnych potencjalnych nowoczesnych rozwiązań z obszaru technologii BIPV. Celem pracy ma być zebranie jak największej ilości wiarygodnych informacji eksploatacyjnych, wpływających na parametry pracy i opłacalności fotodachówek różnym grupom osób, takim jak: producentom, konstruktorom, naukowcom, inwestorom oraz użytkownikom końcowym.

Wiedza na temat wpływu podłoża na temperaturę ogniw wskaże dalsze kierunki badań zmierzających do poprawy przewodności cieplnej materiałów konstrukcyjnych podłoży dachowych.

LITERATURA

- [1] Głuchy D., Kurz D., Trzmiel G., Studying the impact of orientation and roof pitch on the operation of photovoltaic roof tiles, *Przegląd Elektrotechniczny*, 06/2013.
- [2] Haberlin H., *Photovoltaics. System Designed and Practice*, John Wiley & Sons Ltd., 2012.
- [3] Jastrzębska G., *Ogniwa słoneczne*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2013.
- [4] Sarnik M. T., *Podstawy Fotowoltaiki*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2008.
- [5] http://www.fotton.eu/dachowka_solarna.php, dn. 23.01.14 r.

RESEARCH THE EFFECTIVENESS OF WORK PHOTOVOLTAIC ROOF TILES PLACED ON DIFFERENT ROOF SURFACES

In this paper the issue of the impact of the operating temperature of PV cells, comprising the solar roof tiles on the yield power. The paper presents constructed a research position with the measuring system, characterized its components and methodology of the research. Paper presents and comments on the preliminary results of the measurements. Indicated possible benefits from ongoing work for various audiences.