

## Jerzy CHOJNACKI, Janusz TENETA, Łukasz WIĘCKOWSKI

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I ELEKTRONIKI, KATEDRA AUTOMATYKI

# System pomiaru parametrów środowiskowych na potrzeby monitorowania instalacji fotowoltaicznych

Dr hab. inż. Jerzy CHOJNACKI,

Ukończył AGH w Krakowie (1965). Od 1968 roku pracuje w Katedrze Automatyki. Prof. nazw. AGH. Kieruje Laboratorium Automatyki, Robotyki i Systemów Fotowoltaicznych. Jest autorem ok. 100 prac naukowych. Wypromował dwóch doktorów nauk technicznych. Zajmuje się zagadnieniami sterowania systemami fotowoltaicznymi.



e-mail: jach@ia.agh.edu.pl

Dr inż. Janusz TENETA

Ukończył AGH w Krakowie w 1995 r. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 2003r. W Katedrze Automatyki pracuje do 1995r. Obecnie zatrudniony jest na stanowisku adiunkta. Zajmuje się zagadnieniami modelowania i sterowania systemów fotowoltaicznych. Jest autorem wielu prac badawczych i konstrukcyjnych.



e-mail: romus@agh.edu.pl

Mgr inż. Łukasz WIĘCKOWSKI

Absolwent Wydziału EAIiE AGH specjalność Automatyka i Robotyka. Bezpośrednio po studiach pracował w Dziale Technicznym AGH na stanowisku Specjalisty ds. Automatyki. Od 2006 r. pracuje w Katedrze Automatyki na stanowisku asystenta. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół zagadnień sterowania rozmytego systemów fotowoltaicznych.



e-mail: wieckow@regent.uci.agh.edu.pl

### Streszczenie

W referacie przedstawiono wybrane zagadnienia związane z badaniami i praktyczną eksploatacją wybranych systemów fotowoltaicznych, funkcjonujących w Doświadczalnej Stacji Fotowoltaicznej w Katedrze Automatyki AGH. Szczególna uwaga, zostanie zwrócona na problemy pomiarów meteorologicznych. Jest to niezwykle ważny obszar związany z zagadnieniami komputerowego wspomaganie projektowania systemów fotowoltaicznych. Przedstawione zostaną również przykładowe wyniki niektórych pomiarów zebranych w systemie fotowoltaicznym zintegrowanym z budynkiem.

**Słowa kluczowe:** fotowoltaika, systemy fotowoltaiczne, pomiary

## Environmental parameters measurements in the photovoltaic system monitoring service

### Abstract

In this paper chosen problems of an experimental PV installation monitoring and maintenance will be presented. This mentioned installation is located at The AGH University of Science and Technology, Department of Automatics, Krakow Poland. The result of the environmental parameters measurement is also connected with computer aiding designing area and may be used for creating more accurate photovoltaic systems. Some of the examples of environmental measurement in our PV systems laboratory will be presented.

**Keywords:** photovoltaic, photovoltaic systems, measurement

## 1. Wprowadzenie

Zastosowania systemów fotowoltaicznych (PV), w różnych obszarach ludzkiej aktywności nie budzą dziś żadnego zdziwienia, co najwyższej może budzić uznanie coraz szerszy zakres zastosowań. Postęp w technologii produkcji ogniw fotowoltaicznych przekłada się na coraz wyższe ich sprawności

oraz postępujący spadek cen. Metody projektowania różnych systemów PV wspomagane komputerowo są systematycznie rozwijane i doskonalone. W referacie omówione zostaną wybrane systemy PV oraz ich specyfika w kontekście towarzyszących im pomiarów parametrów środowiska naturalnego.

## 2. Wpływ warunków środowiskowych na pracę instalacji fotowoltaicznych

Efektywność działania instalacji fotowoltaicznych zależy w głównej mierze od warunków oświetleniowych i temperaturowych w jakich one pracują. Warunki te zaś są pochodną geograficznej lokalizacji instalacji, sposobu montażu baterii słonecznych (kąty ustawienia, jakość wentylacji) oraz lokalnych warunków pogodowych. O ile do prognozowania rocznej produkcji energii w elektrowniach fotowoltaicznych współpracujących z publiczną siecią energetyczną wystarczają uśrednione miesięczne dane o nasłonecznieniu i temperaturze, to w przypadku autonomicznych systemów PV niezbędne staje się posiadanie szczegółowych danych godzinowych. Ponieważ większość zjawisk pogodowych mających istotny wpływ na pracę systemów fotowoltaicznych ma charakter lokalny, zaleca się prowadzenie pomiarów pogodowych jak najbliżej miejsca pracy instalacji PV, a jeśli jest to niemożliwe – prowadzenie pomiarów w dużej ilości stacji pogodowych na rozległym obszarze klimatycznym a następnie odpowiednie statystyczne opracowanie uzyskanych w ten sposób danych. Przykładem takich działań są tworzone przez DWD (Niemiecka Służba Pogodowa) referencyjne zestawy całorocznych danych meteo (TRY), dla których podstawą były pomiary dokonywane w 600-set stacjach pomiarowych w latach 1961-1990 [1][2].

Standardowe pomiary nasłonecznienia globalnego wykonywane są czujnikiem umieszczonym w płaszczyźnie horyzontalnej, przy zapewnieniu odpowiednio „czystego” horyzontu (brak elementów zacieniających czujnik). O wiele lepsze dane pomiarowe (przydatne do analizy pracy systemu PV) uzyskuje się jednak umieszczając czujnik w płaszczyźnie badanych baterii słonecznych. Czujnikiem może być np. krzemowe fotoogniwo wzorcowe (ESTI Sensor[3]), jednak ze względu na dokładność pomiarów częściej stosuje się pyranometry renomowanych producentów (np. KIPP&ZONEN CM-21).

Wzrost temperatury pracy powoduje zmniejszenie sprawności baterii słonecznych. Temperaturę można szacować na podstawie pomiarów pośrednich: nasłonecznienia, temperatury otoczenia oraz prędkości wiatru lub mierzyć z wystarczającą dokładnością czujnikiem (np. PT100) umieszczonym na spodzie modułu PV. Zasadą jest tu umieszczanie czujnika pod

elementarnym fotoogniwem, znajdującym się w środkowej części modułu PV, którego usytuowanie jest reprezentatywne dla całej monitorowanej instalacji PV.

Dokładne wymagania stawiane czujnikom, torom pomiarowym oraz urządzeniom przetwarzającym i gromadzącym dane pomiarowe określone są w odpowiednich normach [4].

Warto zauważyć, że w przypadku braku pomiaru nasłonecznienia w płaszczyźnie baterii słonecznych, bardzo istotne jest posiadanie oprócz informacji o wartości całkowitego (globalnego) promieniowania słonecznego, również danych o poszczególnych składowych tego promieniowania: bezpośredniej i rozproszonej. Tego typu pomiary wykonuje się przy pomocy specjalistycznych urządzeń (pyrheliometr, aktynometr), lub pyranometrów z odpowiednimi elementami przesłonowymi. Informacja o składowych promieniowania słonecznego staje się wręcz niezbędna do symulacji i analizy fotowoltaicznych systemów orientowanych (nadażnych).

Pomiary innych parametrów środowiskowych takich jak ciśnienie atmosferyczne i wilgotność – choć z pozoru nie związane z procesem produkcji energii elektrycznej w bateriach słonecznych – również są przydatne np. do odtwarzania kształtu pełnego widma promieniowania słonecznego. Jest to tańszy sposób uzyskiwania danych o widmie słonecznym (niezbędnych przy analizie widmowej sprawności modułów PV) niż stosowanie specjalistycznych spektrofotometrów.

### 3. Instalacje badawcze w laboratorium systemów fotowoltaicznych

Laboratorium Systemów Fotowoltaicznych przy Katedrze Automatyki na Wydziale EAIiE AGH w Krakowie posiada obecnie jedną z największych w Polsce (pod względem zainstalowanej mocy i różnorodności zastosowanych rozwiązań technologicznych) fotowoltaiczną instalację badawczą. W jej skład wchodzi podsystemy stacjonarne i nadażne o łącznej mocy ponad 4kWp. Baterie słoneczne zainstalowane są na dachu i południowej fasadzie budynku C-3 oraz w tzw. „ogródku słonecznym”. W większości są to autonomiczne systemy PV stacjonarne i nadażne, posiadające magazyn energii elektrycznej w postaci akumulatorów żelowych o odpowiednio dużej pojemności. Wyjątkiem jest instalacja fasadowa stanowiąca elektrownię słoneczną (moc znamionowa 2kWp), podpiętą do uczelnianej sieci energetycznej za pośrednictwem falownika (inwertera) posiadającego galwaniczną separację obwodów wejściowych i wyjściowych.



Rys. 1. Fasadowa elektrownia słoneczna 2kWp i ogródek fotowoltaiczny.  
Fig. 1. 2kWp BIPV- facade and the „solar garden”.

Do monitorowania pracy wyżej wymienionych systemów fotowoltaicznych na dachu budynku C3 zbudowano własną stację meteorologiczną. Dzięki zastosowaniu czujników i rejestratora danych (COMBILOG1020) firmy Theodor Friedrichs, uzyskano pełny monitoring i rejestrację następujących parametrów środowiskowych: całkowite natężenie promieniowania słonecznego w płaszczyźnie horyzontalnej;

pyranometr K&Z CM21 zakres: 0÷1400 W/m<sup>2</sup> przy widmie 335÷2200 nm, kierunek wiatru: zakres 360° i rozdzielczość 2,5°, prędkość wiatru: 0÷60 m/s z dokładnością ±0,3 m/s, ciśnienie atmosferyczne: 700÷1050 hPa ±1 hPa, temperatura zewnętrzna w zakresie: -40÷85°C, wilgotność powietrza: 0÷100 %Rh ±1,5%. Sygnały ze wszystkich czujników przekazywane są poprzez pętle prądowe, a następnie przetwarzane w rejestratorze danych wyposażonym w 16-bitowy przetwornik A/C. Pomiary dokonywane są co 1 sekundę, a następnie uśredniane i zapisywane co 5 minut. Pojemność pamięci urządzenia pozwala przechowywać pomiary z okresu ok. 3 tygodni – później najstarsze dane zastępowane są nowymi. Należy, więc pamiętać o okresowym przenoszeniu informacji z rejestratora danych do komputera stacjonarnego. Realizowane jest to poprzez magistralę szeregową RS485 o długości ok. 50m (rejestrator znajduje się na dachu, a laboratorium na parterze budynku C3). Warto w tym miejscu wspomnieć o problemach z zasilaniem i komunikacją przy takiej konfiguracji. Projektując opisywaną stację zakładano zasilanie jej z posiadanych systemów fotowoltaicznych o napięciu 12V. Niestety zastosowane czujniki wymagały kilku różnych napięć zasilających. Spowodowało to konieczność zbudowania odpowiedniej przetwornicy DC/DC, umieszczonej na dachu i zasilanej napięciem 12V. Pierwsze miesiące eksploatacji stacji przyniosły niemiłe doświadczenia. Okazało się że jest ona bardzo podatna na uszkodzenia wywołane wyładowaniami atmosferycznymi. Mimo zastosowania połączeń wg. zaleceń producenta uszkodzeniu uległy dwa czujniki. Po ich wymianie i założeniu na wszystkich liniach zasilających i sygnałowych zabezpieczeń odgromowych (diody transil i warystory) nie zarejestrowano więcej uszkodzeń. Osobnym zagadnieniem była również stabilna komunikacja na magistrali RS485. Po wielu próbach zakładania terminatorów i rezystorów podciągających na liniach transmisyjnych okazało się, że jedynym rozwiązaniem jest zastosowanie optoizolatora. Od tej pory magistrala (podpięta przez inteligentną bramę do internetu) pracuje pewnie i bezawaryjnie.



Rys. 2. Dachowe instalacje fotowoltaiczne (moduły krzemowe w różnych technologiach) oraz stacja meteorologiczna.  
Fig. 2. PV installations (different Si-technologies) and meteo station on the roof.

W najbliższym czasie planuje się rozbudowę systemu pomiarowego stacji o pomiary struktury i widma promieniowania słonecznego. Odpowiednie urządzenia (sun tracker i fotospektrometr) zakupione zostaną w ramach Grantu PL0081 ”Fotowoltaika i sensory w proekologicznym rozwoju Małopolski”[9]. Nie czekając na zakup profesjonalnych urządzeń, w laboratorium zrealizowano pracę dyplomową[6], której efektem jest autonomiczny system przesłonowy, pozwalający na pomiar słonecznego promieniowania rozproszonego. Pokazane na rysunku 3 urządzenie posiada wbudowany mikrokontroler, sterujący wg algorytmu zegarowego niezależnymi silnikami osi azymutu i elewacji. Uzyskana dokładność pozycjonowania (rzucania cienia na kopułkę pyranometru) wynosi 2 stopnie (uwzględniając luzy mechanizmów i niedokładność algorytmu obliczeniowego).

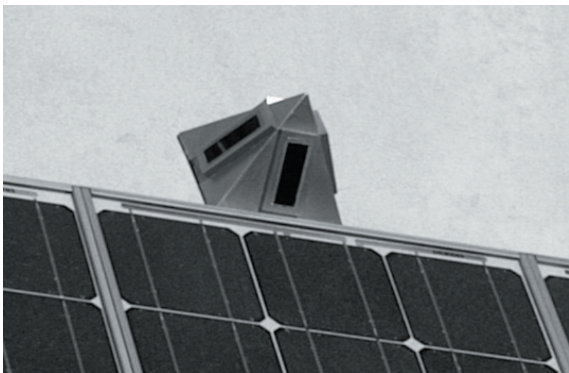


Rys.3 Zbudowany w laboratorium układ śledzący z przesłoną pyrometru do pomiaru globalnego i rozproszonego promieniowania.

Fig. 3. Our construction of sun tracker with shadowing element for measurement of global and diffuse irradiation.

Obecnie trwają długoterminowe testy funkcjonalne urządzenia, oraz próby poprawienia dokładności pozycjonowania (należy znaleźć kompromis pomiędzy złożonością wzorów matematycznych a mocą obliczeniową mikrokontrolera). Niepodważalną zaletą opisanego urządzenia jest niewątpliwie cena – 20-stokrotnie niższa niż w przypadku produktów komercyjnych.

Pomiar struktury oraz kierunkowości promieniowania słonecznego ma bardzo istotne znaczenie dla symulacji, działania i dla poprawnej pracy fotowoltaicznych systemów orientowanych (nadażnych). Optymalizacja algorytmów sterowania w tego typu układach jest jednym z głównych działań podejmowanych w naszym laboratorium. Wieloletnie badania pozwoliły na opracowanie prostego i niezawodnego czujnika kierunkowości oświetlenia, na którego wskazaniach bazują zawansowane, decyzyjne algorytmy sterowania [6]. Czujnik taki został pokazany na rysunku 4.



Rys. 4. Kierunkowy czujnik oświetlenia słonecznego.

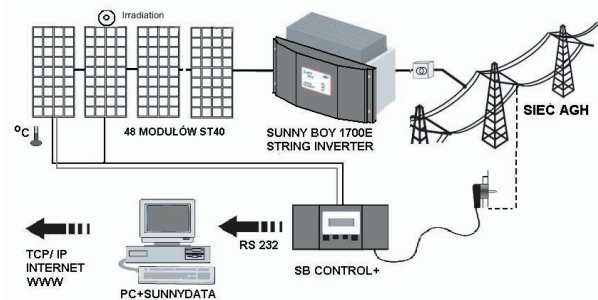
Fig. 4. The directional solar light sensor.

W czujniku zastosowano cztery detektory promieniowania słonecznego (miniaturowe fotoogniwa). Ich sygnałem wyjściowym jest prąd zwarcia, proporcjonalny do oświetlenia padającego na poszczególne ogniwa. Sensory pracują parami w układzie przeciwsobnym – pozwalając odrębnie wygenerować sygnał błędu ustawienia dla każdej osi (azymutu i elewacji). W położeniu optymalnym (bezpośrednie promieniowanie słoneczne jest prostopadłe do podstawy „piramidy” czujnika) wskazania wszystkich sensorów są równe. Poprzez odpowiednią, numeryczną obróbkę sygnałów z sensorów otrzymuje się informację nie tylko o kierunku odchylenia od położenia optymalnego w każdej osi, ale również o jego katowej wartości (w zakresie kątów  $\pm 30^\circ$ ). Jesteśmy w posiadaniu trzech układów orientowanych, pracujących w obu osiach, na których realizowane są algorytmy decyzyjne. Dwa układy pracują w sposób ciągły z regulatorami ładowania a jeden laboratoryjny

jest wykorzystywany jako pomoc dydaktyczna w prowadzonych ze studentami zajęciach.

#### 4. System pomiarowy dla potrzeb instalacji fotowoltaicznej zintegrowanej z budynkiem

Jednym z ostatnio uruchomionych systemów PV jest siłownia zintegrowana z fasadą budynku i podłączona z siecią NN, zasilającą laboratoria Aparatury Automatykacji oraz Systemów Fotowoltaicznych. Fasadowa elektrownia fotowoltaiczna została zbudowana w oparciu o inwerter Sunny Boy 1700E niemieckiej firmy SMA. Firma ta ma w swojej ofercie wiele różnych urządzeń ułatwiających budowę i nadzór eksploatacyjny nad elektrowniami słonecznymi, wiatrowymi i wodnymi. Instalacja ta jest najprostszym przykładem instalacji fotowoltaicznej, w której całość wyprodukowanej energii elektrycznej jest oddawana do sieci energetycznej. Dane o pracy elektrowni gromadzone są w rejestratorze danych SunnyBoy Control Plus. Urządzenie to gromadzi i uśrednia informacje o elektrycznych parametrach pracy elektrowni, uzyskiwane bezpośrednio z inwertera. Dodatkowo posiada własne analogowe kanały pomiarowe, wykorzystywane przez nas do pomiaru poziomu oświetlenia i temperatury modułów PV. Uproszczony schemat elektrowni pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Uproszczony schemat elektrowni fasadowej o mocy 2kWp.

Fig. 5. Simplified schema of the BIPV facade 2kWp grid connected plant.

Pyranometr (K&Z CM6B) umieszczony w płaszczyźnie baterii słonecznych mierzy całkowite promieniowanie słoneczne podlegające fotokonwersji, a 7 czujników temperatury typu PT100, rozmieszczonych pod każdym z pięciu segmentów zbiorczych modułów PV przekazuje dokładną informację o temperaturze modułów wzdłuż całej fasady. Dla celów porównawczych wszystkie czujniki PT100 zdublowane są tanimi analogowymi sensorami półprzewodnikowymi LM335 (sygnałem wyjściowym jest napięcie stałe, proporcjonalne do temperatury). Planuje się długoterminowe porównywanie wyników pomiarów z tych dwóch typów czujników.

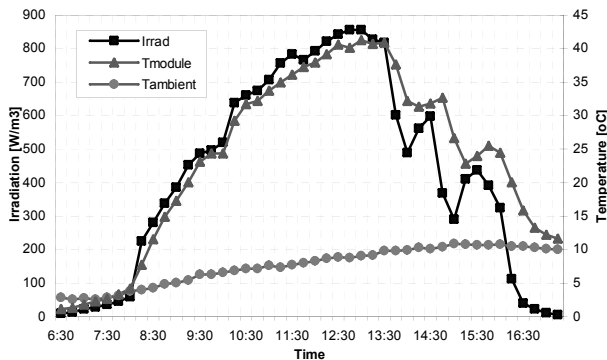


Rys. 6. Czujnik temperatury zamontowany na tylnej ścianie modułu PV oraz czujnik promieniowania słonecznego w płaszczyźnie modułów PV.

Fig. 6. Temperature sensor mounted on the backside of PV module and solar irradiation sensor in the plane of PV array.

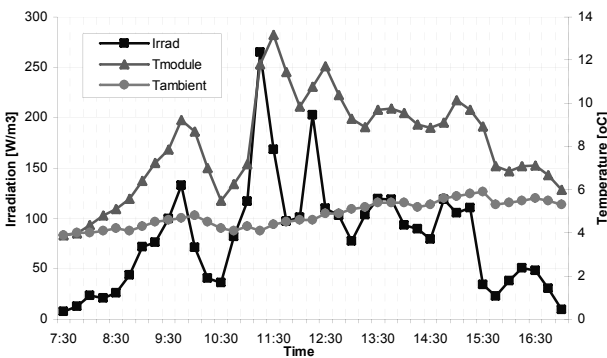
Układ pomiaru temperatury jest cały czas rozbudowywany i niebawem będzie uzupełniony o kamerę termowizyjną zakupioną ze środków Grantu PL0081. Ponieważ temperatura jest jednym z głównych czynników obniżających sprawność baterii słonecznych, a jej wartości zależą od wielu czynników, dlatego też tak wiele uwagi poświęcamy jej w naszych badaniach. Dotychczasowe pomiary wykazywały np. różnice dochodzące do 10°C w obrębie jednego modułu (górną część, bliższą ścianie znajduje się w gorszych warunkach wentylacyjnych i uzyskuje większą temperaturę). O tym jak złożone procesy termiczne zachodzą w pracującej elektrowni fotowoltaicznej (moduły PV obciążone cały czas w punkcie MPP), można się przekonać analizując poniższe przebiegi.

Na rysunkach 7 i 8, zbiorczo przedstawiono poziom oświetlenia, temperaturę otoczenia oraz temperaturę modułu, zarejestrowane odpowiednio dla słonecznego oraz pochmurnego dnia. Poza wyraźnym wpływem oświetlenia na wartość temperatury modułu, warto zwrócić uwagę na różnicę pomiędzy wartością temperatury otoczenia a temperatury pracy modułów. Przy najwyższym poziomie oświetlenia różnica ta wynosi ponad 30°C. Jak widać, już przy temperaturze zewnętrznej poniżej 10°C, moduły potrafią osiągać temperatury pracy przekraczające warunki STC (Standard Test Conditions), które zmniejszają sprawność konwersji i determinują ilość wyprodukowanej w systemie energii.



Rys. 7. Wartości oświetlenia, temp. zewnętrznej oraz temp. modułu dla dnia słonecznego.

Fig. 7. Example of a sunny day - solar irradiation, ambient temperature, PV module as a function of daytime



Rys. 8. Wartości oświetlenia, temp. zewnętrznej oraz temp. modułu dla dnia o dużym zachmurzeniu.

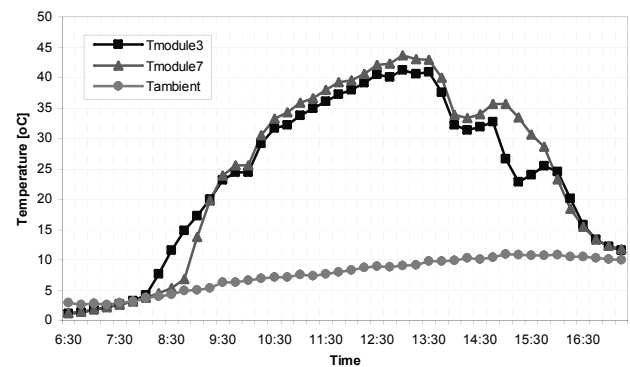
Fig. 8. Example of a cloudy day - solar irradiation, ambient temperature, PV module as a function of daytime

Elektrownię fotowoltaiczną monitoruje szereg czujników temperatury równomiernie rozłożonych na pięciu zestawach modułów. Rysunek 9 prezentuje przykładowy przebieg dzienny, zarejestrowanych wartości temperatur pracy dla dwóch skrajnych modułów w instalacji. Widoczne miejscami duże różnice temperatur, można tłumaczyć wpływem okresowego, lokalnego zacienienia modułów, powodowanego przez elementy architektoniczne, roślinność oraz inne przedmioty znajdujące się w najbliższym otoczeniu instalacji. Natomiast stała różnica temperatur na poziomie 2-3°C, wynika z różnych warunków

wentylacji – zachodnia część fasady jest bardziej wyeksponowana na działanie wiatru.

Wpływu tych czynników w procesie projektowania instalacji fotowoltaicznych, szczególnie elektrowni PV podpiętych do sieci energetycznej, gdzie moduły fotowoltaiczne łączy się szeregowo, nie można zaniedbać. Przed podjęciem decyzji o lokalizacji projektowanej elektrowni PV, zaleca się symulacyjne badanie m.in. wpływu czynnika lokalnego zacienienia, za pomocą dostępnych na rynku komputerowych środowisk symulacyjnych, np. programu PVSYST [8]. Zastosowanie specjalizowanych pakietów nie zwalnia jednak projektanta od niezbędnej ostrożności i dokładnej analizy uzyskanych rezultatów. Trzeba, bowiem pamiętać, że do symulacji przyjmowane są wyidealizowane parametry niektórych elementów.

Dopiero dogłębna analiza wpływu rzeczywistych czynników środowiskowych uzyskanych w wyniku długookresowych pomiarów pozwala na dokładniejsze poznanie zachowania instalacji PV w zmiennych i trudnych do przewidzenia warunkach środowiskowych.



Rys. 9. Temperatury skrajnych modułów PV na fasadzie.

Fig. 9. Temperatures of two PV modules localized on the opposite façade's borders.

## 5. Literatura

- [1] Blümel et al., Bundesministerium für Forschung und Technologie, "Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland", scientific report of the Institute for Geophysical Sciences Technical University Berlin (1986)
- [2] M. Webs, T. Deutschländer, J. Christoffer „Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY“
- [3] [http://www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/KSB/ksb04/30\\_testreferenzjahre.pdf](http://www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/KSB/ksb04/30_testreferenzjahre.pdf)
- [4] H.Ossenbrink "The ESTI sensor – A New Reference Cell for Monitoring of PV Plant Performance " 11<sup>TH</sup> Photovoltaic Solar Energy Conference, 12-16 October 1992 Montreux, Switzerland.
- [5] PN-EN 61724:2002 Monitorowanie własności systemu fotowoltaicznego - Wytyczne pomiaru, wymiany danych i analizy.
- [6] Tataro W., Plachta K. „System pomiaru struktury promieniowania słonecznego” , Praca Magisterska, AGH w Krakowie, Wydział EAIiE, Katedra Automatyki 2006.
- [7] Teneta J. "Algorytmy sterowania orientowanymi systemami fotowoltaicznymi", Rozprawa Doktorska, AGH w Krakowie, Wydział EAIiE, Katedra Automatyki 2003.
- [8] PV Syst <http://www.pvsyst.com/>
- [9] Grant PL0081 „Fotowoltaika i sensory w proekologicznym rozwoju Małopolski” finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Mechanizm Finansowy Europejskiego Obszaru Gospodarczego.