

Ewa RADZIEMSKA¹, Piotr OSTROWSKI¹ i Katarzyna POLEK-PASTERNAK¹

BADANIA ROZKŁADU TEMPERATURY NA POWIERZCHNI OŚWIETLONEGO I OBCIĄŻONEGO MODUŁU FOTOWOLTAICZNEGO

TEMPERATURE DISTRIBUTION ON THE SURFACE OF ILLUMINATED AND LOADED SOLAR CELL MODULE

Streszczenie: Krystaliczny krzem pozostaje nadal dominującym materiałem do produkcji ogniw fotowoltaicznych na całym świecie. Parametry eksploatacyjne obciążonego modułu ogniw fotowoltaicznych zależą od rezystancji obciążenia, nasłonecznienia i temperatury modułu. Temperatura powierzchni modułu fotowoltaicznego, która stanowi powierzchnię absorbującą promieniowanie słoneczne, wzrasta w efekcie: absorpcji promieniowania słonecznego (nieaktywnej absorpcji fotonów, która nie prowadzi do generowania par nośników ładunku), rekombinacji par elektron-dziura, przepływu fotoprądu (ciepło Joule'a-Lenza generowane jest w efekcie przepływu prądu przez rezystancję szeregową złącza p-n). Badania rozkładu temperatury z użyciem kamery termowizyjnej prowadzono dla 7 modułów PV z krystalicznego krzemu (mono- i polikrystalicznych) różnych producentów oraz układu hybrydowego PV/T, który stanowi moduł ogniw fotowoltaicznych z monokrystalicznego krzemu, połączony z kolektorem słonecznym, tworzącym termostatowany układ chłodzenia modułu. System może być ręcznie ustawiany w dwóch płaszczyznach w kierunku padania promieni słonecznych. Eksperyment prowadzono zarówno dla układów z rezystancją zewnętrzną, jak i bez obciążenia.

Słowa kluczowe: ogniwia fotowoltaiczne, termografia, energia słoneczna, odnawialne źródła energii

Wszystkie ciała stałe w temperaturze wyższej od zera bezwzględnego emitują promieniowanie elektromagnetyczne, nazywane promieniowaniem cieplnym bądź termicznym. Widmo tego promieniowania zależy od wartości temperatury emitera i dla temperatur mniejszych od 700°C mieści się całkowicie w zakresie podczerwieni i mikrofal.

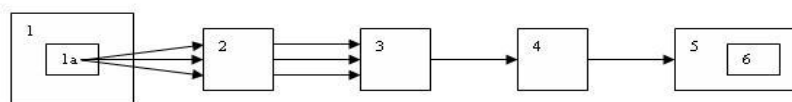
Temperatura pracy modułów fotowoltaicznych, eksploatowanych w warunkach rzeczywistych, zmienia się wraz ze zmianą warunków atmosferycznych, tj.: natężenia promieniowania słonecznego, prędkości wiatru, opadów deszczu czy śniegu.

Uzyskana wizualizacja umożliwia śledzenie efektów termicznych modułów PV pracujących samodzielnie, zintegrowanych z dachem lub fasadą budynku oraz w przypadku zastosowania fotowoltaiczno-termicznego układu hybrydowego PV/T, generującego zarówno energię elektryczną, jak i ciepłą.

Analiza otrzymanych rozkładów temperatury pozwala również na obliczenie współczynników temperaturowych krzemowych ogniw i modułów fotowoltaicznych, które w sposób ilościowy określają wpływ wzrostu temperatury na parametry elektryczne eksploatowanych modułów.

Termowizja jest metodą badawczą, polegającą na zdalnej i bezdotykowej ocenie rozkładu temperatury na powierzchni badanego ciała. Metoda ta polega na obserwacji i zapisie rozkładu promieniowania podczerwonego wysyłanego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego, i przekształceniu tego promieniowania na światło widzialne. Schematycznie zasadę działania urządzenia termowizyjnego przedstawiono na rysunku 1.

¹ Wydział Chemiczny, Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, tel. 058 347 18 74, email: ewarad@chem.pg.gda.pl



Rys. 1. Schemat blokowy urządzenia termowizyjnego: 1 - przedmiot obserwowany, 2 - układy optyczne, 3 - detektor promieniowania, 4 - układy elektronicznej obróbki sygnału, 5 - układy odwzorowania, 6 - odwzorowanie termiczne, 1a - obszar odwzorowany w danej chwili

Fig. 1. Block diagram of thermovision device: 1 - observed object, 2 - optical system, 3 - radiation detector, 4 - electronic signal processing, 5 - mapping system, 6 - thermal mapping, 1a - currently mapped area

Promieniowanie podczerwone wysyłane przez obserwowany obiekt (1) pada na obiekt (2) i otrzymuje się obraz obiektu w płaszczyźnie elementu czułego (3) kamery termowizyjnej (detektora), analogicznie jak to ma miejsce w kamerze telewizyjnej. Element czuły przetwarza padające promieniowanie podczerwone na proporcjonalne do mocy promieniowania sygnały elektryczne. Następnie sygnały elektryczne z detektora są przekazywane do odpowiednich układów obróbki elektronicznej (4) i dalej do układów odtwarzania obrazu (np. kineskopu) lub układów rejestracji (5).

Pomiar termowizyjny badanego obiektu zależy od wielu czynników. Praktycznie nie można w sposób jednoznaczny określić rozkładu temperatury na badanej powierzchni za pomocą jedynie obrazu termowizyjnego. Wynika to z faktu, że detektory promieniowania reagują na dochodzącą do nich efektywną moc promieniowania. Moc promieniowania zależy bowiem nie tylko od temperatury obiektu, ale również od jego emisyjności, kształtu, wymiarów i stanu atmosfery. Dokładne określenie rozkładów temperatury jest możliwe tylko wtedy, gdy znamy emisyjność badanego obiektu.

Idealnym emiterym promieniowania jest ciało doskonale czarne, którego emisja jest zgodna z prawem Plancka. Kamera umożliwia wybór współczynnika emisyjności w zakresie od 0,01 do 1,0. Wartość współczynnika emisji, a więc i absorpcji zależy od struktury powierzchni emitującej i jest niewielka w przypadku powierzchni gładkich i polerowanych, natomiast jest znacznie większa dla powierzchni porowatych o strukturze złożonej, przy czym współczynnik absorpcji zmienia się wraz ze zmianą długości fali.

W tej pracy do pomiarów temperatury modułów użyto kamery termowizyjnej Fluke IR FlexCam Ti-35 o rozdzielczości $< 0,01^{\circ}\text{C}$ i zakresie pomiarowym od -20 do 350°C .

Wzrost temperatury modułów fotowoltaicznych i jego wpływ na sprawność

Zagadnienia fizyczne wzrostu temperatury i mechanizmu transportu ciepła w instalacjach fotowoltaicznych są ważne ze względu na otrzymywane parametry elektryczne tych układów. Absorpcja promieniowania słonecznego powoduje znaczny wzrost temperatury krzemowych ogniw fotowoltaicznych w wyniku następujących procesów [2]:

- 1) nieaktywnej absorpcji fotonów (niegenerujących par elektron-dziura),
- 2) rekombinacji nośników ładunku poza obszarem złącza p-n,
- 3) ciepła Joule'a-Lenza, wydzielanego na rezystancji szeregowej.

Podczas pracy temperatura ogniwa wzrasta z czasem od temperatury otoczenia t_{amb} w momencie wystawienia na działanie promieniowania słonecznego do wartości zależnej bezpośrednio od natężenia padającego promieniowania i warunków chłodzenia. Ogniwa

słoneczne i moduły fotowoltaiczne pracują najlepiej w określonej temperaturze, charakterystycznej dla materiału, z którego są wykonane.

Wraz ze zmianą temperatury ulegają zmianie właściwości fizyczne materiału półprzewodnikowego (krzemu), z którego ogniwo jest wykonane: współczynnik absorpcji promieniowania, ruchliwość ładunków (zależna również od poziomu domieszkowania), szerokość przerwy energetycznej, koncentracja samoistna nośników ładunku, rezystywność półprzewodnika. Stąd pośrednio ulegają zmianie odpowiednie parametry elektryczne ogniw i modułów PV: napięcie otwartego obwodu, prąd zwarcia, moc maksymalna, współczynnik wypełnienia charakterystyki, a co za tym idzie - sprawność konwersji fotowoltaicznej. Współczynnik temperaturowy sprawności dla krzemu β zawiera się w zakresie od $-8 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ do $-4,7 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ [3, 4].

Wyniki badań

Badania prowadzono w warunkach naturalnego oświetlenia w Gdańsku w miesiącach od kwietnia do lipca. Badano 7 modułów fotowoltaicznych, złożonych z ogniw z krystalicznego krzemu, różnych producentów. Parametry badanych modułów w warunkach standardowych STC zamieszczono w tabeli 1.

Spośród wszystkich otrzymanych danych do dalszego opracowania wybrano te wyniki, dla których wartość natężenia promieniowania słonecznego wynosiło 715 W/m^2 .

Tabela 1

Zestawienie parametrów badanych modułów w warunkach STC (1000 W/m^2 , 25°C , AM 1.5)

Table 1

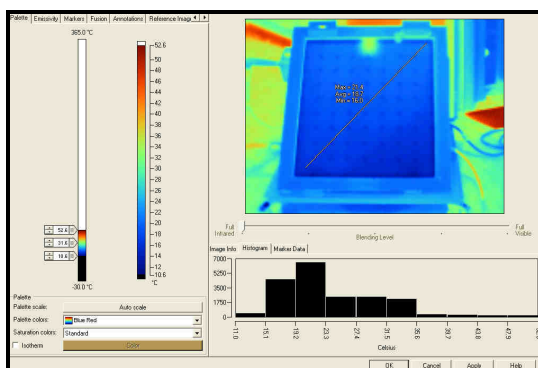
Parameters of tested modules in STC conditions (1000 W/m^2 , 25°C , AM 1.5)

| Lp. | Producent/ symbol | Wymiary wysokość/ szerokość [mm] | Typ/liczba ogniw | Moc max P_{max} [W] | Prąd I_{max} [A] | Napięcie U_{max} [V] | Prąd zwarcia I_{sc} [A] | Napięcie otwartego obwodu U_{oc} [V] |
|-----|--------------------------------|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|--|--|
| A | Solar-Fabrik SF 115/2 | 1485/663 | m-Si/36 square 160x160 mm | 110 | 6,62 | 16,61 | 7,55 | 21,3 |
| B | Photowatt PWX500 | 1042/462 | p-Si/36, square 101,5x101,5 mm | 50 | 2,9 | 17,2 | 3,2 | 21,6 |
| C | niefabryczny | 650/300 | p-Si/36, square 64x64 mm | 15 | 1,1 | 13,6 | 1,3 | 15,3 |
| D | Soltec SLE-5S | 275/267 | m-Si/36 rectangular 51,45x17 mm | 5 | 0,29 | 17,5 | 0,32 | 21,5 |
| E | SOLARWATT ASE-100DGL- SM | 1000/880 | m-Si/72 square 105x105 mm | 100 | 2,85 | 35,2 | 3,17 | 42,9 |
| F | Photowatt PWX850 | 1272/556 | p-Si/36, square 125x125 mm | 75 | 4,4 | 17 | 4,7 | 21,5 |
| G | Atersa AP- 7105/A-75 | 1200/527 | m-Si/36 square 130x130 mm | 75 | 4,4 | 17 | 4,8 | 21,0 |

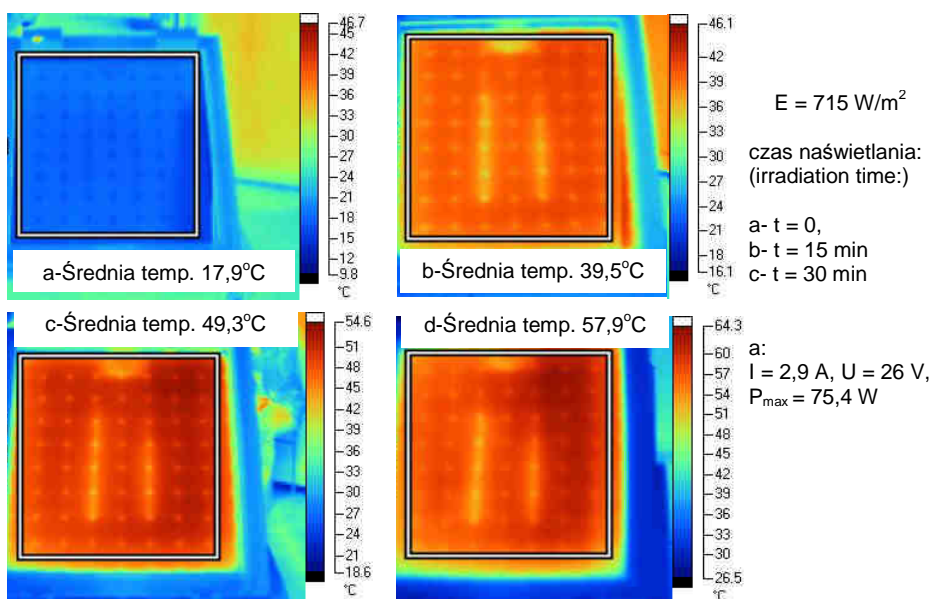
Podczas prowadzenia pomiarów w sposób ciągły monitorowano poziom nasłonecznienia z wykorzystaniem piranometru, umieszczonego w płaszczyźnie modułu, oraz mierzono

kierunek i prędkość wiatru z wykorzystaniem anemometru (zmiana nasłonecznienia nie wahała się więcej niż o 5%, prędkość wiatru zmieniała się w zakresie $0,2 \div 0,5$ m/s przy stałym jego kierunku).

W pierwszej kolejności badano rozkład temperatury modułów bez obciążenia. Po 30 min ekspozycji moduły były obciążone optymalną rezystancją tak, aby pracowały w punkcie mocy maksymalnej. Po kolejnych 30 min następowała stabilizacja temperatury i wykonywano kolejne pomiary. Pomiary prowadzono w odległości $1 \div 2$ m od badanego obiektu. Obróbki uzyskanych termogramów dokonano z wykorzystaniem programu SmartView (rys. 2). Przykładowe wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 3.

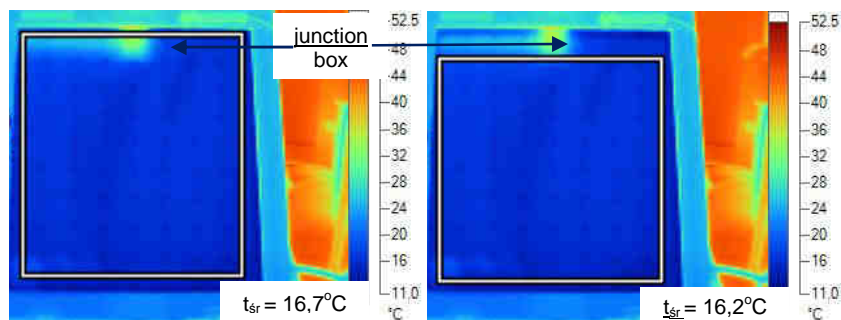


Rys. 2. Widok okna programu SmartView, wersja - 1.8.0.6 z widocznym histogramem
Fig. 2. View of the SmartView window, version - 1.8.0.6 with the histogram



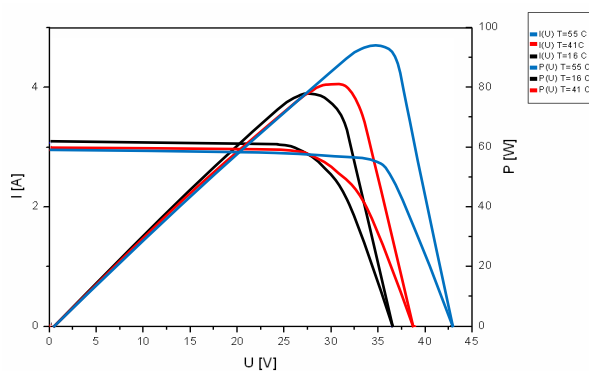
Rys. 3. Obrazy termowizyjne, moduł (E) bez obciążenia (a, b, c) oraz moduł obciążony (d)
Fig. 3. Thermographic images: module (E) without load (a, b, c) and loaded module (d)

Następnie dołączono chłodzenie wodne układu. Natężenie przyprływu czynnika chłodzącego regulowano w zakresie $0,1 \div 0,5 \text{ dm}^3/\text{s}$. Otrzymane wyniki badań termowizyjnych przedstawiono na rysunku 4. Widoczny obszar o podwyższonej temperaturze w otoczeniu skrzynki przyłączeniowej (*junction box*) z oczywistych względów nie jest chłodzony. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki badanego modułu (E), otrzymane dla jednakowego poziomu natężenia promieniowania słonecznego, pracującego w trzech różnych temperaturach: 16, 41 i 55°C .



Rys. 4. Obrazy termowizyjne, moduł (E) z chłodzeniem, obciążony w punkcie maksymalnej mocy: $I = 2,7 \text{ A}$, $U = 35 \text{ V}$, $P_{\text{max}} = 93 \text{ W}$, $E = 715 \text{ W/m}^2$

Fig. 4. Thermographic images: loaded module (E) with cooling, in maximum power point: $I = 2.7 \text{ A}$, $U = 35 \text{ V}$, $P_{\text{max}} = 93 \text{ W}$, $E = 715 \text{ W/m}^2$ (irradiation)



Rys. 5. Charakterystyki prądowo-napięciowe i krzywe mocy dla modułu badanego w układzie PV/T w trzech temperaturach przy stałym natężeniu promieniowania $E = 715 \text{ W/m}^2$

Fig. 5. Current-voltage characteristics and power curves for module tested in the PV/T system in three values of temperature and constant irradiation $E = 715 \text{ W/m}^2$

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i badań termowizyjnych obliczono, że wzrost temperatury modułu w wyniku nasłonecznienia oraz obciążenia prądowego o 71% powoduje spadek sprawności o 26%.

Współczynnik temperaturowy sprawności wynosi: $\frac{\Delta\eta_{\text{PV}}}{\Delta T} = -0,08 \frac{\%}{\text{K}}$. Współczynnik względnych zmian temperaturowych sprawności, obliczony na podstawie analizy otrzyma-

nych termogramów, wynosi dla badanych modułów: $\beta = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{d\eta}{dT} = -6,4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, współczynnik temperaturowy napięcia otwartego obwodu: $\frac{dU_{oc}}{dT} = -155 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$, współczynnik temperaturowy prądu zwarcia: $\frac{dI_{sc}}{dT} = 2,2 \frac{\text{mA}}{\text{K}}$, współczynnik temperaturowy maksymalnej mocy wyjściowej: $\frac{1}{P_{max}} \cdot \frac{dP_{max}}{dT} = -0,55 \frac{\%}{\text{K}}$.

Wnioski

Przeprowadzono badania eksploatacyjne modułów ogniw fotowoltaicznych z krystalicznego krzemu różnych producentów. Zastosowanie układu PV/T, w którym moduł PV jest chłodzony termostatowaną wodą, pozwoliło przeprowadzić pomiary parametrów elektrycznych obciążonych modułów dla różnych wartości temperatury ogniw.

Do pomiaru temperatury wykorzystano technikę termowizji, dzięki czemu można było bezstykowo określić temperaturę w każdym punkcie modułu. Na podstawie przeprowadzonych badań obliczono współczynnik względnych zmian temperaturowych sprawności konwersji fotowoltaicznej oraz współczynniki temperaturowe napięcia otwartego obwodu, prądu zwarcia i mocy maksymalnej.

Literatura

- [1] Rudowski G.: Termowizja i jej zastosowanie. WKiŁ, Warszawa 1978.
- [2] Radziemska E.: *Thermal performance of Si and GaAs based solar cells and modules: a review*. Progr. Energy Combust. Sci., 2003, **29**, 407-424.
- [3] Jarzębski Z.M.: Energia słoneczna, konwersja fotowoltaiczna. PWN, Warszawa 1990.
- [4] Radziemska E.: *The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells*. Renewable Energy, 2003, **28**(1), 1-9.

TEMPERATURE DISTRIBUTION ON THE SURFACE OF ILLUMINATED AND LOADED SOLAR CELL MODULE

Summary: Crystalline silicon continues to be the dominant material for PV production worldwide. In operation with a small load resistance, the photocell (solarcell) represents a photoelectric current source, whereas in operation with a great load resistance, the photocell represents a voltage source - electromotive force. Thus the PV power generator (a circuit powered by PV the cell) is affected by the load, illumination and temperature. The temperature of the surface of photovoltaic module, which makes the absorption surface, increase mainly as a result of: absorption of the solar irradiation (non-active absorption of photons, which do not generate electron-hole pairs), recombination of electron - hole pairs, photocurrent (Joule's heat generated during the current flow in the series resistance of the p-n junction) and parasitic currents. The temperature distribution on the upper surface of a number of mono- and polycrystalline PV modules and PV/T hybrid system as well was examined with the use of thermovision infrared camera. The experiments were conducted in the systems with and without external load.

Keywords: solar energy, photovoltaic solar cells, thermography, renewable energy

