

Wpływ temperatury na sprawność baterii słonecznych

Streszczenie. Dzięki coraz powszechniejszemu stosowaniu baterii PV do zasilania obiektów mieszkalnych istotnym czynnikiem, który często jest pomijany przy projektowaniu układów fotowoltaicznych jest wpływ zróżnicowanych temperatur zewnętrznych na funkcjonowanie paneli PV. Często zauważamy jak wyświetlacz LCD kalkulatora lub ekranu telefonu komórkowego zmienia szybkość wyświetlania po wystawieniu na działanie skrajnych temperatur. Temperatura wpływa na prąd płynący w obwodzie elektrycznym, zmieniając szybkość przemieszczania elektronów. Zjawisko to zachodzi przez wzrost oporności obwodu powstałego w wyniku wzrostu temperatury. Odwrotne zjawisko dzieje się gdy oporność jest obniżona przez malejącą temperaturę. W artykule opiszemy wpływ temperatury otoczenia oraz pracy generatora PV mający istotny wpływ na sprawność fotoogniwi, która szczególnie w naszych warunkach klimatycznych jest bardzo zróżnicowana. Oczywiście temperatury otoczenia fotoogniwi uzależnione będą od charakterystyki meteorologicznej danego terenu oraz jej zmienności w czasie. W artykule opieramy się na badaniach które prowadzimy na terenie województwa lubelskiego w budynku mieszkalnym wolnostojącym.

Abstract. Photovoltaic cells are becoming more and more popular in the field of power supply systems for residential buildings. However very important factor which is often neglected in the process of photovoltaic systems designing is the influence of ambient temperature changes on the operating parameters of PV panels. It is easy to notice that calculator or mobile phone LCD display changes its response time after exposure to extreme operating temperatures. The reason of such situation is the fact, that temperature affects the current in the electric circuit, changing the mobility of electric charge carriers. This phenomenon is the result of progressive increase in the value of electric circuit resistance along with ambient temperature rise. Inverted dependence is noticeable when temperature decreases. This article outlines the influence of the ambient temperature and PV generator operating conditions on the photovoltaic cells efficiency. The importance of the conducted research is determined by the fact that local climatic conditions vary in a wide range. During performing the experiment we have also taken into account time dependence of the research area meteorological characteristics. Experiment were conducted in detached residential building. Results described in this article were collected within Lublin voivodeship. (**The temperature influence on the solar cells efficiency**).

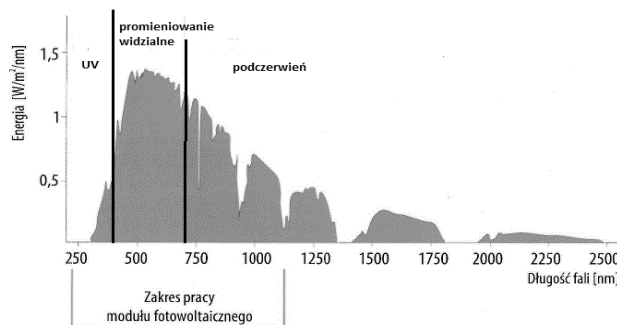
Słowa kluczowe: bateria PV, ogniwa fotowoltaiczne, inwerter, energia słoneczna.

Keywords: PV cell, photovoltaic cells, inverter, solar energy.

Wstęp

W artykule staraliśmy się opisać wpływ temperatury na pewne określone stany pracy baterii fotowoltaicznej. Kupując panel fotowoltaiczny dostajemy dokumentację dotyczącą parametrów pracy ogniwa w standardowych warunkach laboratoryjnych STC: 1000W/m² 25°C. Graniczną mocą jaką można uzyskać bezpośrednio z energii słonecznej na jednym metrze kwadratowym jest tzw. stała słoneczna, która wynosi średnio 1 367 W/m² i jest mocą promieniowania słonecznego docierającą do zewnętrznej warstwy atmosfery [1,2,5]. Część tej energii jest odbijana lub pochłaniana przez atmosferę, więc efektywnie wykorzystać przy powierzchni Ziemi możemy tylko 1000 W/m². Jak wiemy warunki w jakich pracują generatory PV mogą być bardzo ekstremalne, dlatego parametry elektro-fizyczne będą się znacznie różniły w zależności od temperatury pracy. Na wstępie kilka słów dotyczących systemów PV. Fotowoltaiczne generatory PV składają się z połączonych ze sobą elementów półprzewodnikowych. Ogniwo fotowoltaiczne, które jest głównym elementem modułu fotowoltaicznego składa się z płytki z półprzewodnika posiadającego złącze P-N (positive – negative). Występuje tutaj pole elektryczne (bariera potencjału). W momencie kiedy na ogniwo pada światło słoneczne powstaje para nośników o przeciwnych ładunkach elektrycznych elektron oraz dziura, które zostają rozdzielone przez to pole elektryczne. To właśnie rozdzielanie ładunków w ogniwie fotowoltaicznym powoduje powstanie napięcia elektrycznego. Fotoogniwa słoneczne są produkowane z materiałów półprzewodnikowych, najczęściej z krzemu (Si), germanu (Ge) oraz selenu (Se). Zwykle ogniwo słoneczne z krystalicznego krzemu ma nominalne napięcie wynoszące 0,5 wolta. Poprzez odpowiednie połączenie ogniwi słonecznych można otrzymać baterie słoneczne o napięciach 12 lub 24 V. Po podłączeniu urządzenia pobierającego energię powstaje przepływ prądu elektrycznego. Jedną z głównych zalet systemów PV jest ich modułowość. W miarę wzrostu potrzeb, poszczególne elementy mogą być zastąpione lub

dodane w celu zapewnienia zwiększonej mocy lub wydajności układu. Panele słoneczne składają się z jednego lub więcej modułów fotowoltaicznych, które przetwarzają światło słoneczne w energię elektryczną. Moduły są połączone szeregowo lub równolegle, tak aby zapewnić odpowiedni poziom napięcia i prądu do oczekiwanych potrzeb. Jednym z elementów systemu PV są kontrolery ładowania, które można nabyć z wieloma dodatkowymi opcjami np. wyświetlanie danych, rejestracja wartości, itp. Jednak ich główną funkcją jest utrzymanie baterii na odpowiednim poziomie naładowania, i chronić je przed przeładowaniem oraz głębokim rozładowaniem. Kolejnym elementem systemu jest bank baterii, który zawiera jedną lub więcej baterii połączonych szeregowo lub równolegle w zależności od napięcia i prądu potrzebnego w układzie. Baterie gromadzą energię wytwarzaną przez panele fotowoltaiczne. Następnym urządzeniem które konwertuje nam napięcie stałe na przemienne jest inwerter, stosujemy go gdy chcemy zasilac urządzenia AC. Inwerter zamienia napięcie stałe DC z baterii PV lub akumulatorów na przemienne.



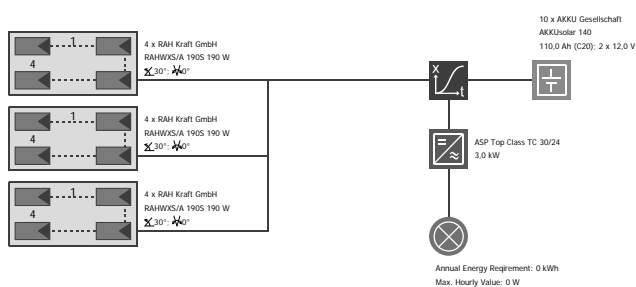
Rys.1. Zakres pracy modułu fotowoltaicznego na tle spektrum promieniowania słonecznego.

Zgodnie z rysunkiem 1 można zauważyć, że ogniwa fotowoltaiczne są w stanie zaabsorbować jedynie część

docierającego do ziemi widma. Widmo promieniowania Słońca przypomina rozkład ciała doskonale czarnego o temperaturze 5800 K [6], największe natężenie promieniowania (maksimum rozkładu) przypada dla fali o długości ok. 500 nm, co odpowiada barwie zielonożółtej [3,6]. Jednym z czynników mającym wpływ na sprawność fotoogniwa jest temperatura otoczenia. Większość podawanych przez producentów parametrów technicznych fotoogniwa odnosi się do temperatury koloru 2800 K, natężenia promieniowania w warunkach bezchmurnego nieba z prostopadle padającymi promieniami słonecznymi oraz temperaturze otoczenia wynoszącej w warunkach laboratoryjnych 25°C [6].

Charakterystyka i właściwości elektryczne baterii słonecznych.

W naszym artykule skupimy się na wpływie temperatury otoczenia oraz pracy fotoogniwa na parametry elektryczne. Teoretyczne graniczne wartości pracy paneli PV może zawierać się w granicach -70°C do 120°C. Oczywiście najbardziej optymalną temperaturą pracy jest przedział 20-25°C. Wraz ze wzrostem temperatury rośnie prąd zwarcia ze względu na wzrost rezystancji, a napięcie obwodu otwartego maleje [3]. Podobnie jak wszystkie inne urządzenia półprzewodnikowe, ogniwa słoneczne są wrażliwe na temperaturę.



Rys.2. Schemat ideowy zastosowanego systemu PV.

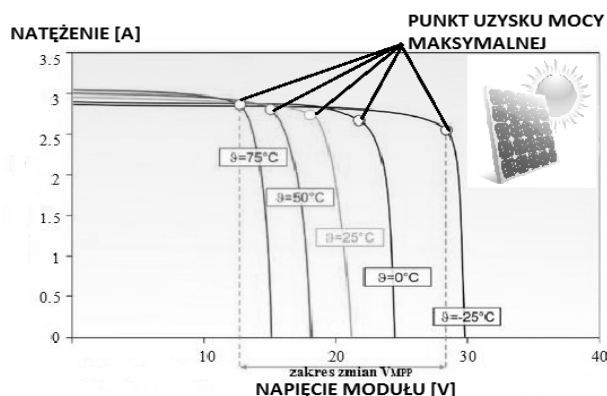
Charakterystyka prądowo napięciowa baterii słonecznej pozwala określić podstawowe parametry jak moc, napięcie i natężenie prądu. Większość producentów paneli fotowoltaicznych prezentuje w dokumentacji charakterystykę prądowo napięciową podobną do tej zaprezentowanej poniżej. Z charakterystyki baterii słonecznej można odczytać prąd zwarcia I_{sc} po lewej stronie oraz napięcie obwodu otwartego V_{oc} a po prawej stronie na dole. Parametry te wyznaczane są dla danych wartości natężenia promieniowania słonecznego. Należy zauważyć, że przy zmieniającym się natężeniu promieniowania słonecznego największym zmianom będzie ulegać wartość natężenia prądu produkowanego przez panel fotowoltaiczny. Zmiany te są prawie wprost proporcjonalne, co oznacza, że np. 2-krotny wzrost natężenia promieniowania słonecznego będzie przekładał się na 2-krotny wzrost natężenia prądu. Z kolei wartość napięcia będzie podlegać niewielkim wahaniom w szerokim przedziale natężenia promieniowania słonecznego. Zaznaczone na rysunku 3 punkty to miejsca mocy maksymalnej MPP (*Maximum Power Point*), czyli w miejsca, w których iloczyn napięcia i natężenia prądu jest największy. Z tego też powodu na module fotowoltaicznym możemy znaleźć oznaczenia typu VMPP (*Voltage at Maximum Power*) napięcie w punkcie mocy maksymalnej oraz IMPP (*Current at Maximum Power*) natężenie prądu w punkcie mocy maksymalnej. Producent zawsze podaje te wartości dla warunków laboratoryjnych STC [3,4],

renomowani producenci podają także często te parametry dla warunków NOCT, co bardziej realnie oddaje rzeczywiste wartości napięcia i natężenia prądu, jakie można uzyskać z danego panelu fotowoltaicznego.

Oczywiście na sprawność elektryczną ogniwa wpływają również inne istotne czynniki, (np. odbicia wewnętrzne, sprawność kwantowa czy temperatura). Biorąc pod uwagę wszystkie parametry pracy ogniwa zarówno te wymienione jak i niewymienione w naszej publikacji obecnie ogniwa mono i polikrystaliczne, które są najpowszechniej stosowane, mają sprawność na poziomie 14-25% czyli taki procent energii możemy uzyskać z docierającego do nas światła słonecznego przy wykorzystaniu generatora fotowoltaicznego. Biorąc pod uwagę negatywny wpływ wzrostu temperatury ogniwa na sprawność, należy zapewnić odpowiednie chłodzenie, wentylację dla modułów. Zadanie to realizowane przez odpowiedni montaż modułów, zapewniający swobodny przepływ powietrza przy instalacji lub w połączeniu z systemem hybrydowym czyli z kolektorami słonecznymi, dzięki którym ciepło generowane przez generator PV jest wykorzystywane do konwersji na ciepło użytkowe w instalacjach ciepłej wody i centralnego ogrzewania. Dzięki zastosowaniu kontrolerów PV zwiększyliśmy o kilkanaście procent zysk energetyczny w porównaniu z systemem z bezpośrednio przyłączonym do baterii chemicznej. Dzięki zastosowaniu kontrolera pracującego impulsowo jako łącznik elektroniczny minimalizuje on straty mocy w części silnoprądowej układu optymalizującego energetycznie pracę baterii PV. Dzięki temu wartość średnia napięcia panującego w każdej chwili pracy będąca jednocześnie wartością napięcia wyjściowego baterii PV, odpowiada pracy baterii w punkcie maksymalnej mocy przez nią oddawanej (MPP- maximum power point). Fotoprąd zmieniający się zależnie od nasświetlenia i temperatury, które są odniesione do warunków standardowych, możemy przedstawić w postaci wyrażenia:

$$(1) \quad I_L = \left(\frac{\Phi}{\Phi_{ref}} \right) \cdot \left[I_{Lref} + \mu_{ISC} \cdot (T_c - T_{Cref}) \right]$$

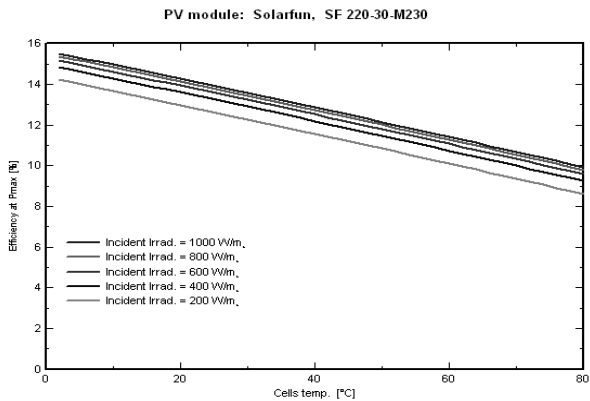
gdzie: Φ – efektywne natężenie promieniowania słonecznego, $[W/m^2]$; Φ_{ref} – standardowe natężenie promieniowania słonecznego, $[W/m^2]$; T_c – efektywna temperatura celki; T_{Cref} – standardowa temperatura celki; μ_{ISC} – temperaturowy współczynnik fotoprądu.



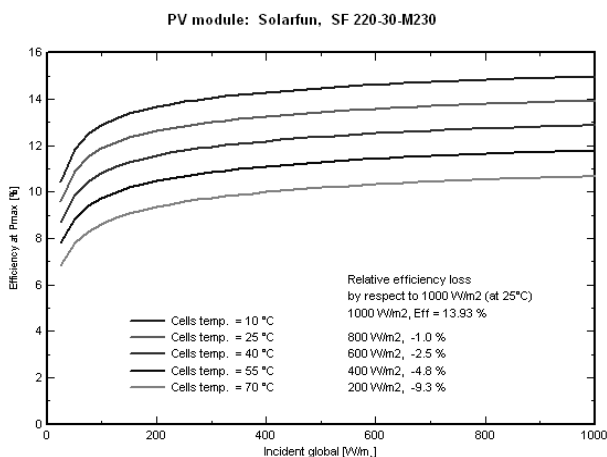
Rys.3. Charakterystyka sprawności testowanego generatora PV w zależności od temperatury pracy [2]

Czynnikami branyymi pod uwagę w trakcie badania systemu są nasłonecznienie określające średnią moc promieniowania przypadającą na jednostkę powierzchni, która jest równa stosunkowi energii promieniowania słonecznego, padającego w określonym czasie na daną

powierzchnię do pola tej powierzchni i czasu. Drugim czynnikiem jest temperatura otoczenia fotoogniwa, która z kolei wpływa na jego sprawność, im ona będzie wyższa tym sprawność będzie się zmniejszała. Trzecim czynnikiem który jest również bardzo istotnym parametrem brany pod uwagę w obliczeniach jest prędkość wiatru, dzięki uzyskaniu tego parametru możemy zastosować w obliczeniach współczynniki korekcyjne dotyczące chłodzenia naszego systemu PV.



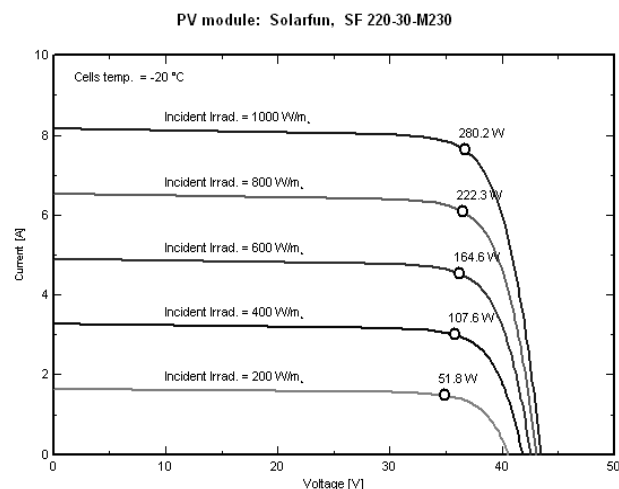
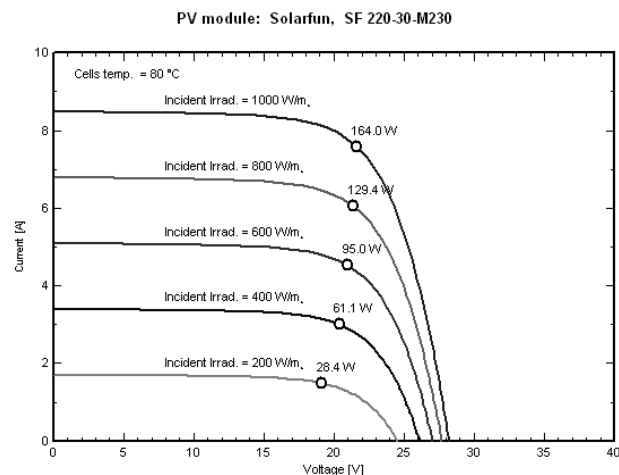
Rys.4. Sprawność generatorów PV w zależności od temperatury



Rys.5. Charakterystyka sprawności w funkcji nasłonecznienia dla wybranych temperatur pracy ogniwa PV

Ciepło wytwarzane przez moduł PV uzależniony jest od punktu pracy a konkretnie od obciążenia systemu. Oczywiście im większy prąd pobierany tym nastąpi większy przyrost temperatury paneli. Aby ograniczyć skutki nierównomiernego oświetlenia modułów stosowane są diody bocznikujące, które w przypadku zacielenia części ogniwa, chronią pozostałe elementy przed uszkodzeniami spowodowanymi ich przegrzaniem. Diody te włączone są równolegle do ogniwa lub szeregu ogniwa przy normalnej pracy modułu są spolaryzowane w kierunku zaporowym. Diody bocznikujące (diody bypass) montowane są w większości rozwiązań w puszcze przyłączeniowej z tyłu panelu fotowoltaicznego [2,6]. Takie umiejscowienie ułatwia ich kontrolę oraz wymianę w przypadku uszkodzenia. W przypadku łączenia kilku paneli fotowoltaicznych w szeregu celem zwiększenia napięcia nominalnego prąd płynący w obwodzie będzie równy prądowi najsłabszego elementu z układu. W przypadku zacielenia jednego z paneli fotowoltaicznych moc układu drastycznie się zmniejszy. Przed takimi skutkami chronią nas diody bocznikujące, które wyłączają z systemu zacieleny panel, przez co redukują straty w całej instalacji oraz redukują ryzyko uszkodzenia zacielenego ogniwa. Przez zacielenie

ogniwo przepływa prąd w kierunku przeciwnym powodując znaczący wzrost temperatury fotoogniwa. Należy pamiętać, że konsekwencją stosowania diody bocznikującej jest także brak możliwości ładowania akumulatora bezpośrednio panelem fotowoltaicznym, gdyż w przypadku zacielenia dioda bypass spowodowałaby zwarcie na akumulatorze [3]. Oczywiście ładowanie akumulatora bezpośrednio baterią słoneczną nie jest wskazane nawet w przypadku braku diody bypass w panelu fotowoltaicznym z uwagi na brak możliwości regulacji napięcia i prądu ładowania.



Rys.6. Stosunek $I=f(V)$ w zależności od temperatury modułu PV: a) rysunek pierwszy 80 °C, b) rysunek drugi – 20 °C



Zdjęcie 1. Zdjęcie przedstawia zastosowany układ generatorów PV jako zadaszenie tarasu.

Ze wzrostem temperatury spada sprawność generatora PV, w przypadku różnicy wynoszącej 100°C spadek sprawności wyniesie około 50%. Dlatego ważnym czynnikiem odgrywającym istotną rolę w zmniejszeniu strat spowodowanych temperaturą jest sposób oraz miejsce umiejscowienia generatora PV. Zalecane jest takie umiejscowienie paneli aby spodnia strona paneli była sprawnie wentylowana oraz materiał który znajduje się pod panelami nie gromadził ciepła lub był dobrym izolatorem termicznym. Oczywiście najlepszym rozwiązaniem byłoby ułożenie paneli jako pokrycie dachowe na konstrukcji wsporczej metalowej, która w pewnym stopniu absorbowała by ciepło wytworzone przez moduł PV.

Dzięki rozwiązaniu pokazanemu na zdjęciu 1 uzyskujemy dużą powierzchnię bez potrzeby wykonywania dodatkowych konstrukcji i wygospodarowywania powierzchni na działce w celu umiejscowienia paneli PV, również kwestia wentylacji została optymalnie rozwiązana dzięki takiemu zastosowaniu modułów PV. Istotnym czynnikiem który ma duży wpływ na wydajność elektryczną generatora PV jest jego termiczna charakterystyka. Określona jest jako równowaga termiczna pomiędzy temperaturą powietrza a temperaturą ogniwa. Parametr ten wyrażany jest przez czynnik strat termicznych k [W/m^2], który rozkłada się na dwa czynniki: czynnik stały i czynnik proporcjonalny do prędkości wiatru. Czynniki te zależą od sposobu zamontowania modułów do podłoża i warunków tylnej wentylacji. Parametr ten możemy obliczyć używając wzoru:

$$(2) \quad \alpha \cdot G_{inc} = (k_c + k_v \cdot V) \cdot (NOCT - T_{amb})$$

gdzie: α jest współczynnikiem pochłaniania promieni słonecznych,

Do obliczeń przyjęto następujące wartości czynników:

k_c – czynnik stały: 20 W/m^2 ,

k_v – czynnik zależny od prędkości wiatru: 8 W/m^2 ,

Uwzględniono ponadto współczynnik NOCT (Nominalna Operacyjna Temperatura Generatora), który określa temperaturę modułów pola PV bez tylnego osłonięcia przy standardowych warunkach pracy definiowanych jako :

$G_{inc} = 800 W/m^2$ – standardowe nasłonecznienie,

$T_{amb} = 20 ^\circ C$ – temperatura otoczenia,

$V = 1 m/s$ – prędkość wiatru,

Oczywiście wraz ze zmianą temperatury ulegają także zmiany właściwości fizycznych fotoogniwa w tym:

- ruchliwość ładunków elektrycznych,
- szerokość przerwy energetycznej,
- rezystywność półprzewodnika,
- współczynnik absorpcji fotonów.

Głównymi parametrami ogniwa które także ulegną zmianie będą napięcie otwartego obwodu, prąd zwarcia ogniwa, moc w punkcie maksymalnym pracy, współczynnik wypełnienia charakterystyki oraz sprawność konwersji fotowoltaicznej [4,5], dlatego przy obliczaniu parametrów elektrycznych paneli PV należy te czynniki uwzględnić.

Wnioski

Jak wykazaliśmy w artykule temperatura w jakiej pracują generatory PV ma istotny wpływ na ilość uzyskanej energii elektrycznej. Temperatura pracy odgrywa kluczową rolę w procesie konwersji fotowoltaicznej. Zarówno elektryczna efektywność oraz co za tym idzie moc modułu fotowoltaicznego zależy liniowo od temperatury pracy T_c . Panele fotowoltaiczne powinny pracować w pewnych ustalonych warunkach pogodowych, ale ponieważ pogoda zawsze się zmienia to my jako inżynierowie badający instalacje paneli słonecznych musimy zrozumieć, jak panele reagują na różne warunki pogodowe. Dzięki tej wiedzy, można będzie je zaprojektować w sposób poprawny dla uzyskania maksymalnej efektywności. W niektórych przypadkach projektowane są systemy chłodzenia do utrzymania paneli w pewnych ustalonych temperaturach. Na przykładzie elektrowni słonecznych w klimatach gorących gdzie panel może zostać powleczone specjalnym płynem powodującym chłodzenie urządzenia. Oczywiście w artykule wskazaliśmy proste sposoby na ograniczenie niekorzystnego wpływu temperatury na pracę fotoogniwa. Istotnym niekorzystnym czynnikiem jest przyrost temperatury czy to wywołany pracą generatora czy warunkami atmosferycznymi. Dlatego przy projektowaniu systemów zasilania ogniwami fotowoltaicznymi należy dokonać istotnych obliczeń, biorąc pod uwagę opisane w artykule zjawiska temperaturowe pracy modułów fotowoltaicznych.

Autorzy: dr hab. inż. Janusz Partyka, prof. PL Politechnika Lubelska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin E-mail: j.partyka@pollub.pl, mgr inż. Mirosław Mazur, Politechnika Lubelska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: mirekpolon@gmail.com ; mgr inż. Tomasz Marcewicz, Politechnika Lubelska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: tomasz.marcewicz@pollub.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Klugman E, Klugman – Radziemska E., Ogniwa i moduły fotowoltaiczne oraz inne niekonwencjonalne źródła energii, *Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko*, Białystok 2005.
- [2] Szymański B., Instalacje fotowoltaiczne [Photovoltaic installations (in Polish)], 2nd edition, published by Geosystem Burek, Kotyza S.C., 2013.
- [3] Radziemska E., The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells, *Renewable Energy*, 2003.
- [4] Smoliński S., Fotowoltaiczne źródła energii i ich zastosowania, Wyd. SGGW, Warszawa 1998.
- [5] Jastrzębska G., Ogniwa słoneczne, budowa, technologia i zastosowanie, *WKiŁ* Warszawa 2013.
- [6] Jastrzębska G., Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne, *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, wyd. II, Warszawa 2009.