

Dariusz KURZ*, Kamil LEWANDOWSKI*, Martyna SZYDŁOWSKA*

ANALIZA UZYSKU ENERGII Z FOTOWOLTAICZNYCH OGNIW BIFACJALNYCH. CZĘŚĆ 1 – BUDOWA I PARAMETRY OGNIW BIFACJALNYCH

W pracy dokonano analizy budowy i uzysku energii z fotowoltaicznych ogniw bifacjalnych. W pierwszej części porównano budowę fotowoltaicznych ogniw mono i bifacjalnych, przytoczono struktury dwóch rodzajów komórek bifacjalnych. Omówiono parametry charakterystyczne bifacjalnych ogniw fotowoltaicznych, takie jak prąd zwarcia, napięcie stanu jałowego i współczynnik wypełnienia. Określono ponadto wskaźnik dodatkowego uzysku energii oraz wskaźnik wyrażający stosunek mocy tylnej części do przedniej bifacjalnego modułu PV. W drugiej części pracy przeanalizowano wpływ różnych parametrów instalacyjnych na wartość dodatkowego uzysku energii z instalacji PV wykonanej w oparciu o fotowoltaiczne ogniwa bifacjalne. Analizy dokonano na podstawie wyników przytoczonych badań naukowych prowadzonych na świecie na przestrzeni ostatnich kilku lat. Omówiono także istniejący model trzech zmiennych pozwalający oszacować wielkość ww. uzysku.

SŁOWA KLUCZOWE: ogniwo bifacjalne, uzysk energii, budowa ogniwa PV, współczynnik wypełnienia.

1. WPROWADZENIE

Ograniczenie kosztów produkcji z jednoczesnym podniesieniem efektywności uzysku energii to jedno z głównych wyzwań, jakie stawia sobie branża fotowoltaiczna. Odpowiednim rozwiązaniem wydaje się być technologia bifacjalna pozwalająca na konwersję zarówno bezpośredniego promieniowania słonecznego padającego na przednią stronę modułu jak i promieniowania odbitego od podłoża oraz promieniowania rozproszonego docierających do tylnej strony modułu. W ten sposób zwiększa się znacznie potencjalna energia, jaką można uzyskać w porównaniu do jednostronnych (monofacjalnych) modułów fotowoltaicznych.

Krzemowe komórki bifacjalne produkowane są od wczesnych lat 80 [4], natomiast bifacjalne moduły fotowoltaiczne zostały wprowadzone na rynek przez Sanyo/Panasonic pod koniec pierwszej dekady obecnego wieku [2, 7]. Od 2012

* Politechnika Poznańska

roku zaczęły pojawiać się konkurencyjne moduły produkowane m.in. przez Prism Solar [10], PVGS [6], Yingli [8], czy LG [9].

Niniejsza publikacja ma na celu dokonanie porównania pod względem budowy oraz charakterystyki poszczególnych parametrów różnych rodzajów fotowoltaicznych ogniw mono i bifacjalnych.

W dalszej części pracy wykorzystane będą następujące pojęcia:

BGE (ang. *Bifacial Gain Energy*) – wskaźnik wyrażający dodatkową energię generowaną przez tylną część modułu odniesioną do energii generowanej z przedniej jego części. Wskaźnik ten wyrażony jest w procentach i można zdefiniować go następująco [2]:

$$BGE = (Rear/Front) \quad (1)$$

gdzie: *Rear* – zmierzona energia generowana z tylnej powierzchni modułu (zmierzona w standardowych warunkach testowych bez udziału części przedniej) [kWh], *Front* – zmierzona energia generowana z przedniej powierzchni modułu (zmierzona w standardowych warunkach testowych bez udziału części tylnej) [kWh].

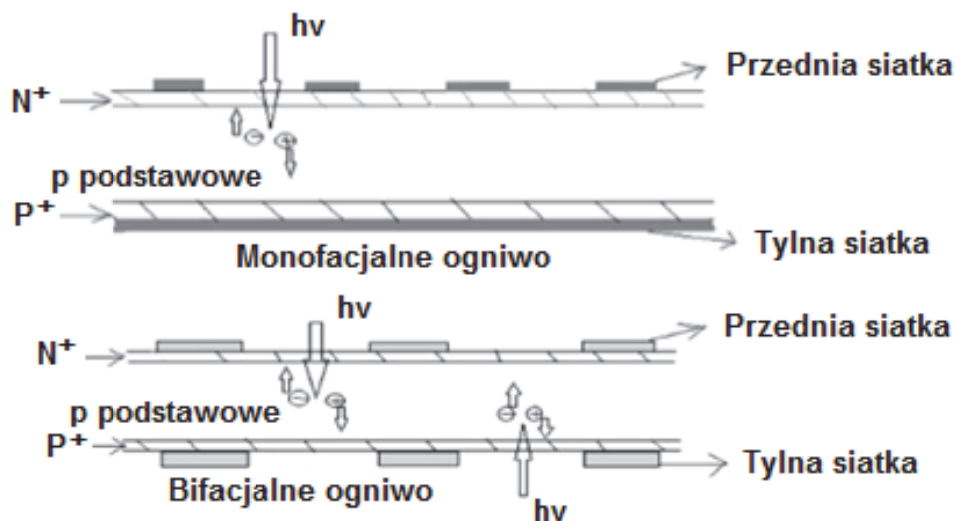
BR (ang. *Bifacial Ratio*) – wskaźnik wyrażający stosunek nominalnej mocy tylnej części modułu (otrzymanej w standardowych warunkach testowych) do mocy części przedniej. Wyrażony jest on w procentach i można zdefiniować go następująco [2]:

$$BR = 100 \cdot (P_R/P_F) \quad (2)$$

gdzie: P_R – nominalna moc tylnej części modułu otrzymana w standardowych warunkach testowych [W], P_F – nominalna moc przedniej części modułu otrzymana w standardowych warunkach testowych [W].

2. BUDOWA KOMÓREK BIFACJALNYCH

Komórki krzemowych ogniw bifacjalnych, w odróżnieniu od monofacjalnych, charakteryzują się możliwością generacji prądu zarówno po stronie przedniej jak i tylnej modułu PV (rys.1, rys. 2). Z powodu zwiększonej liczby wygenerowanych fotonów, na skutek dodatkowej absorpcji promieniowania padającego na tylną część komórki, wytworzony prąd i napięcie są większe niż w przypadku komórki monofacjalnej, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie większej mocy. Dodatkowy uzysk energii zależy od ilości promieniowania słonecznego docierającego do tylnej części modułu, odbitego od podłoża. Przykładowe parametry panelu bifacjalnego zebrano w tabeli 1, natomiast wartości współczynnika odbicia różnych podłoży mogących występować pod panelami PV podano w tabeli 2.

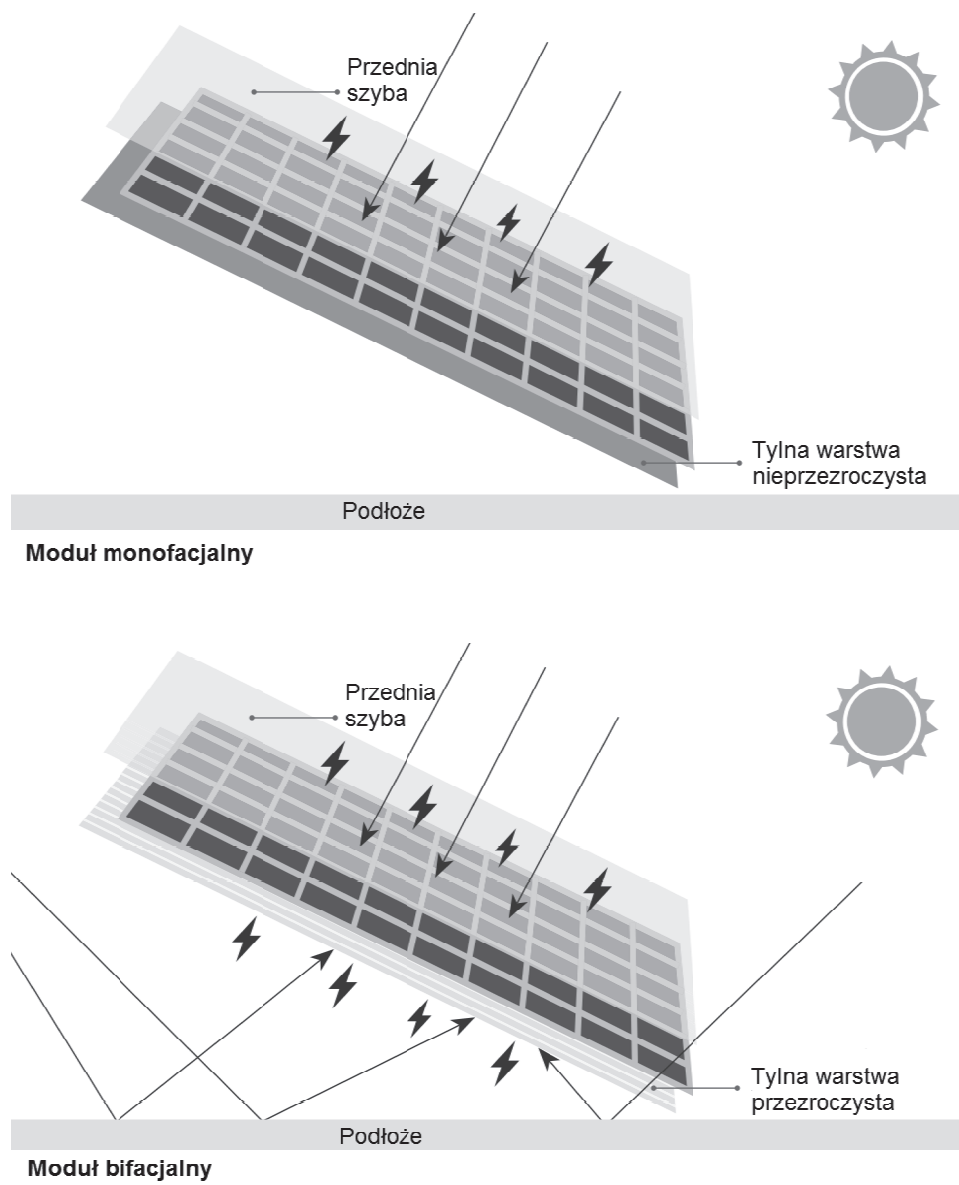


Rys. 1. Porównanie przekrojów poprzecznych komórki konwencjonalnej (monofacjalnej) oraz bifacjalnej [11]

Tabela 1. Zestawienie parametrów elektrycznych wybranego panelu bifacjalnego LG Neon2 BiFacial LG300N1T-G4 w warunkach STC [12].

Moduł		LG300N1T-G4	Wartość dodatkowego uzysku energii z tyłu modułu*		
			10%	20%	30%
Moc maksymalna P_{max}	[W]	300	330	360	375
Napięcie w MPP U_{MPP}	[V]	32,9	32,9	32,9	33,0
Prąd w MPP I_{MPP}	[A]	9,15	10,07	10,98	11,44
Napięcie obwodu otwartego U_{oc}	[V]	40,1	40,1	40,2	40,3
Prąd zwarcia I_{sc}	[A]	9,65	10,68	11,65	12,14
Sprawność η	[%]	18,3	20,1	22,0	22,9

* W zależności od wysokości montażu i współczynnika albedo podłoża

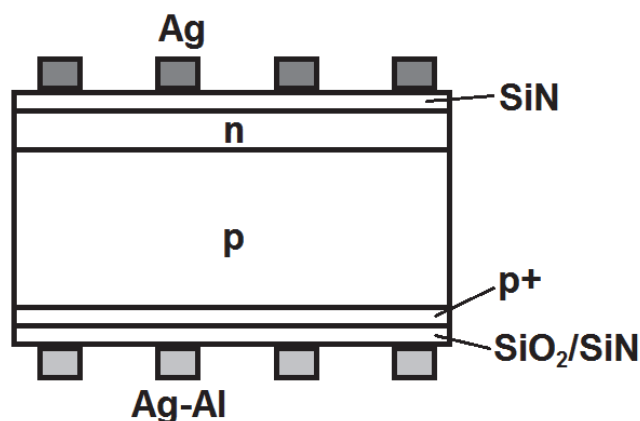


Rys. 2. Porównanie fotowoltaicznych modułów monofacjalnych oraz bifacjalnych [12]

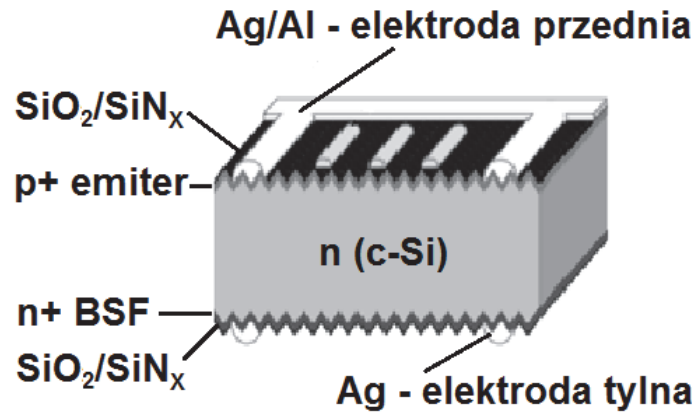
Tabela 2. Wartości współczynnika albedo wybranych podłoży [13].

Rodzaj powierzchni	Wartość współczynnika odbicia albedo
Czarna ziemia	0,08 – 0,14
Grunt	0,07 – 0,20
Trawa	0,14 – 0,37
Piasek suchy	0,35 – 0,45
Piasek mokry	0,20 – 0,30
Beton (np. chodnik)	0,20 – 0,35
Asfalt	0,05 – 0,20
Śnieg świeży	0,80 – 0,95
Śnieg zleżały	0,42 – 0,70

Większość dostępnych komórek bifacjalnych oparta jest na strukturze typu $p^+ - p - n^+$ lub $p^+ - n - n^+$. Na rys. 3 przedstawiony został schemat komórki typu $p^+ - p - n^+$, z bazą typu p , pasywowanej przy użyciu azotku krzemu (SiN) na przedniej części oraz przy użyciu azotku krzemu bądź tlenku krzemu (SiO_2/SiN) na spodzie. Przednia siatka wykonana jest ze srebra (Ag), a tylna ze srebra bądź aluminium (Ag/Al). Warstwa p^+ odpowiada za barierę *BSF*, zmniejszającą zależność rekombinacji tylnej powierzchni od jej pasywacji [3].

Rys. 3. Schemat komórki bifacjalnej typu $p^+ - p - n^+$ [3]

Schemat drugiej z dwóch obecnie najczęściej spotykanych struktur komórek bifacjalnych przedstawiony jest na rys. 4. W odróżnieniu od wcześniej wspomnianej struktury $p^+ - p - n^+$, struktura ta oparta jest na bazie typu n . Do pasywacji wierzchniej i spodniej strony wykorzystany jest tlenek bądź azotek krzemu ($\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$). Przednia siatka wykonana jest ze srebra bądź aluminium (Ag/Al), a tylna ze srebra (Ag). Warstwa n^+ odpowiada za barierę *BSF* [1].

Rys. 4. Schemat komórki bifacjalnej typu $p^+ - n - n^+$ [1]

3. PARAMETRY CHARAKTERYSTYCZNE OGNIWA BIFACJALNEGO

Pomiary parametrów paneli bifacjalnych można wykonywać na zewnątrz przy wykorzystaniu naturalnych promieni słonecznych lub wewnątrz pomieszczenia za pomocą symulatora oświetlenia słonecznego. Aby wyniki badań otrzymane w wyżej wymienionych metodach były współmierne należy założyć, że prąd zwarcioowy (I_{sc}) modułu zależy liniowo od przedniego oraz tylnego napromieniowania modułu. Ponadto należy przyjąć, że prąd zwarcioowy (I_{sc}) podczas obustronnego naświetlenia jest równy sumie prądu generowanego z części tylnej oraz przedniej modułu [5].

Wskaźnik BGE (określony zależnością 1) można także zdefiniować jako stosunek wydajności prądowej tylnej części do wydajności prądowej przedniej części modułu [5]:

$$BGE_{I_{sc}} = \frac{I_{sc0, rear}}{I_{sc0, front}} \quad (3)$$

gdzie: $BGE_{I_{sc}}$ – parametr określający stosunek wydajności prądowej tylnej części modułu do wydajności prądowej przedniej części modułu [-], $I_{sc0, rear}$ – prąd zwarcioowy tylnej części modułu przy standardowych warunkach testowych (STC) [A], $I_{sc0, front}$ – prąd zwarcioowy przedniej części modułu przy standardowych warunkach testowych (STC) [A].

Przy pomocy parametru określającego zdolność generowania fotonów przez tylną część modułu ($BGE_{I_{sc}}$) można wyznaczyć wartość irradiancji G_E dla pomiarów wykonywanych przy pomocy symulatora oświetlenia [5]:

$$G_E = G_o + BGE_{isc} \cdot G_{rear} \quad (4)$$

gdzie: G_E – wartość irradiancji dla pomiarów wykonywanych za pomocą symulatora oświetlenia [W/m^2], G_o – wartość irradiancji pochodząca od promieniowania padającego na przednią część modułu [W/m^2], G_{rear} – wartość irradiancji pochodząca od promieniowania padającego na tylną część modułu [W/m^2].

Warto zauważyć, że wartość irradiancji G_E składa się z wartości natężenia promieniowania pochodzącego od naswietlenia padającego na przednią część modułu oraz promieniowania rzucanego na tylną część modułu, pomniejszonego o zdolność tylnej części modułu do wytwarzania foto nośników.

Równanie (4) pozwala na porównanie pomiarów wykonanych na zewnątrz przy wykorzystaniu naturalnych promieni słonecznych z tymi, które zostały wykonane wewnątrz pomieszczenia za pomocą symulatora oświetlenia słonecznego.

Wyprowadzono zależności na wartość podstawowych parametrów ogniwa bifacjalnego: napięcie obwodu otwartego $U_{oc,bi}$, prąd zwarcia $I_{sc,bi}$ oraz współczynnik wypełnienia FF_{bi} w zależności od wartości irradiancji G_E [5]:

$$I_{sc,bi} = \frac{G_E}{G_o} I_{sc0,front} \quad (5)$$

gdzie: $I_{sc,bi}$ – prąd zwarcia dla ogniwa bifacjalnego [A], $I_{sc0,front}$ – prąd zwarcia uwzględniający oświetlenie wyłącznie przedniej części ogniwa [A], $I_{sc0,rear}$ – prąd zwarcia uwzględniający oświetlenie wyłącznie tylnej części ogniwa [A].

$$U_{oc,bi} = U_{oc0,front} + \frac{(U_{oc0,rear} - U_{oc0,front}) \ln\left(\frac{G_E}{G_o}\right)}{\ln\left(\frac{I_{sc0,rear}}{I_{sc0,front}}\right)} \quad (6)$$

gdzie: $U_{oc,bi}$ – napięcie obwodu otwartego dla ogniwa bifacjalnego [V], $U_{oc0,front}$ – napięcie obwodu otwartego uwzględniające oświetlenie wyłącznie przedniej części ogniwa [V], $U_{oc0,rear}$ – napięcie obwodu otwartego uwzględniające oświetlenie wyłącznie tylnej części ogniwa [V].

$$FF_{bi} = pFF - \frac{G_E}{G_o} \left(\frac{U_{oc0,front}}{U_{oc,bi}} \right) (pFF - FF_{O,front}) \quad (7)$$

gdzie: FF_{bi} – współczynnik wypełnienia dla ogniwa bifacjalnego, pFF – pseudo współczynnik wypełnienia, który nie uwzględnia strat rezystancji szeregowej.

4. PODSUMOWANIE

Dokonane porównanie fotowoltaicznych ogniw mono i bifacjalnych pozwoliło na zapoznanie się z różnicami występującymi w budowie poszczególnych typach ogniw PV. Opisano także sposób wyznaczania podstawowych parametrów bifacjalnych ogniw PV, jak prądu zwarcia, napięcia stanu jałowego oraz współczynnika wypełnienia.

W drugiej części pracy przytoczono wyniki badań, wskazujące na możliwości uzyskania dodatkowej energii przy wykorzystaniu fotowoltaicznych modułów bifacjalnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Aoyama T., Aoki M., Sumita I., Yoshino Z., Ogura A., Effect of Glass Frit in Metallization Paste on the Electrical Losses in Bifacial N-type Crystalline Silicon Solar Cells, 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 5-10.06.2016, Portland, OR, USA, pp. 2854 – 2858, 2016.
- [2] Castillo-Aguilella J. E., Hauser P. S., Multi-Variable Bifacial Photovoltaic Module Test Results and Best-Fit Annual Bifacial Energy Yield Model, IEEE Access, vol. 4, pp. 498 – 506, 2016.
- [3] Chowdhury A. A., Ebong A., A Simulation Model for Optimizing the Performance of Bifacial Si Solar Cells, 12th International Conference on High-Capacity Optical Networks and Enabling/Emerging Technologies (HONET), 21-23.12.2015, Islamabad, Pakistan, pp. 1 – 4, 2015.
- [4] Cuevas A., Luque A., Eguren J., Alamo J. D., ‘High efficiency bifacial back surface field solar cells, Solar Cells, vol. 3, no. 4, pp. 337 – 340, 1981.
- [5] Deline C., MacAlpine S., Marion B., Toor F., Asgharzadeh A., Stein J. S., Assessment of Bifacial Photovoltaic Module Power Rating Methodologies – Inside and Out, IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 7, no. 2, pp. 575 – 580, 2017.
- [6] Goda S., Experience from bifacial PV installations of mega solar using EarthON technology, 2nd Bifacial PV Workshop, Chambéry, France, 26-27.05.2014.
- [7] Karta katalogowa: HIT Double 186 Model: HIP-186DA3, Sanyo Energy USA Corp., Frisco, TX, USA, 2009.
- [8] Karta katalogowa: Panda 60 Cell Series, Yingli Green Energy Holding Co. Ltd., Baoding, China, 2012.
- [9] Karta katalogowa, MonoX Neon LG300N1C-B3, LG Electron., Seoul, Korea, 2014.
- [10] Prism Solar Technologies Inc. (Dec. 6, 2012). Prism Solar Receives UL and CEC Certifications for Bifacial Modules. <http://www.prismsolar.com>, dn. 03.01.2018.
- [11] Siddique A., Biswas S. K., Performance Analysis of Bifacial PV Module for the Integration in Static Sea Shell Concentrator, International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), 4-6.11.2015, Rajshahi, Bangladesh, pp. 65 – 68, 2015.

- [12] <http://www.lg-solar.com/downloads/products/LGE-Data%20Sheet-LG300N1T-G4-EN-08.2016.pdf>, dn. 24.05.2017.
- [13] <http://www.instsani.pl/450/wielkosc-energii-docierajacej-do-kolektora>, dn. 24.05.2017.

ANALYSIS OF THE ENERGY YIELD FROM PHOTOVOLTAIC BIFACIAL CELLS. PART I - CONSTRUCTION AND PARAMETERS OF BIFACIAL CELLS

The paper analyzes the construction and yield of energy from photovoltaic bifocal cells. The first part compares the construction of photovoltaic mono and bifacial cells, and the structures of two types of bifacial cells are cited. Characteristic parameters of bifacial photovoltaic cells are discussed, such as short-circuit current, open-circuit voltage and fill factor. Moreover, the indicator of additional energy yield and index expressing the ratio of the power of the back part to the front bifacial PV module were determined. In the second part of the work, the influence of various installation parameters on the value of additional energy yield from a PV installation made on the basis of photovoltaic bifacial cells was analyzed. The analysis was based on the results of the above-mentioned scientific studies conducted in the world over the past few years. The existing model of three variables was also discussed, allowing to estimate the size of the above-mentioned yield.

(Received: 17.01.2018, revised: 06.03.2018)

