

Ćwiczenie 3

Badanie parametrów elektrycznych dwustronnych bifacjalnych modułów fotowoltaicznych

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z dwustronnymi bifacjalnymi modułami fotowoltaicznymi oraz wyznaczenie ich parametrów elektrycznych.

Opis stanowiska pomiarowego

Stanowisko do wyznaczania charakterystyk prądowo–napięciowych modułów bifacjalnych składa się z:

- sztucznego oświetlenia w postaci 14 halogenowych źródeł światła,
- modułu fotowoltaicznego dwustronnego bifacjalnego o mocy 390 W,
- rezystorów suwakowych (odbiornika energii elektrycznej),
- multimetrów cyfrowych typu BM857A (amperomierza i woltomierza),
- przewodów elektrycznych.

Przed przystąpieniem do badań wszystkie elementy powinny znajdować się w odpowiednich miejscach podstawy stanowiska, które wskazuje prowadzący zajęcia. Nie należy rozpoczynać pomiarów bez sprawdzenia poprawności połączeń przez prowadzącego zajęcia.

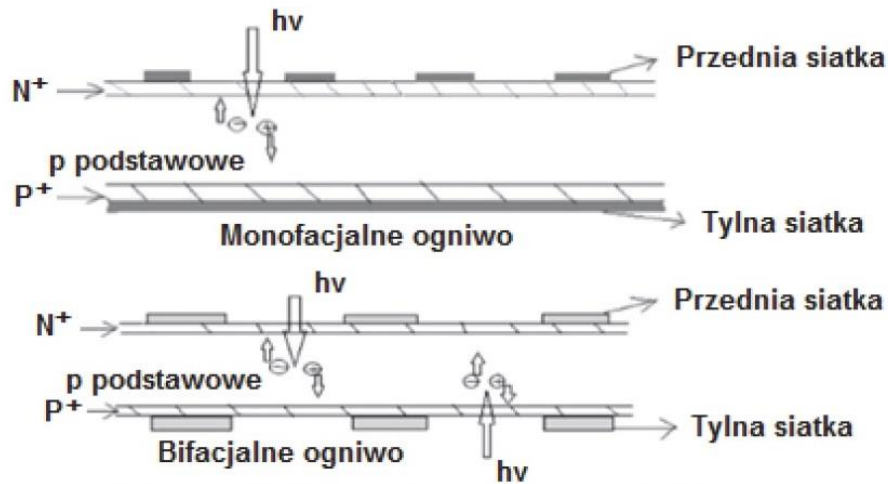
Wiadomości teoretyczne

Moduły bifacjalne (ang. *bifacial modules*) to inaczej moduły dwustronne, czyli moduły, które mogą generować moc zarówno z jednej, jak i z drugiej strony. Dzięki temu mogą wytwarzać więcej energii elektrycznej niż klasyczne moduły PV. Obecnie stają się popularnym rozwiązaniem w instalacjach fotowoltaicznych.

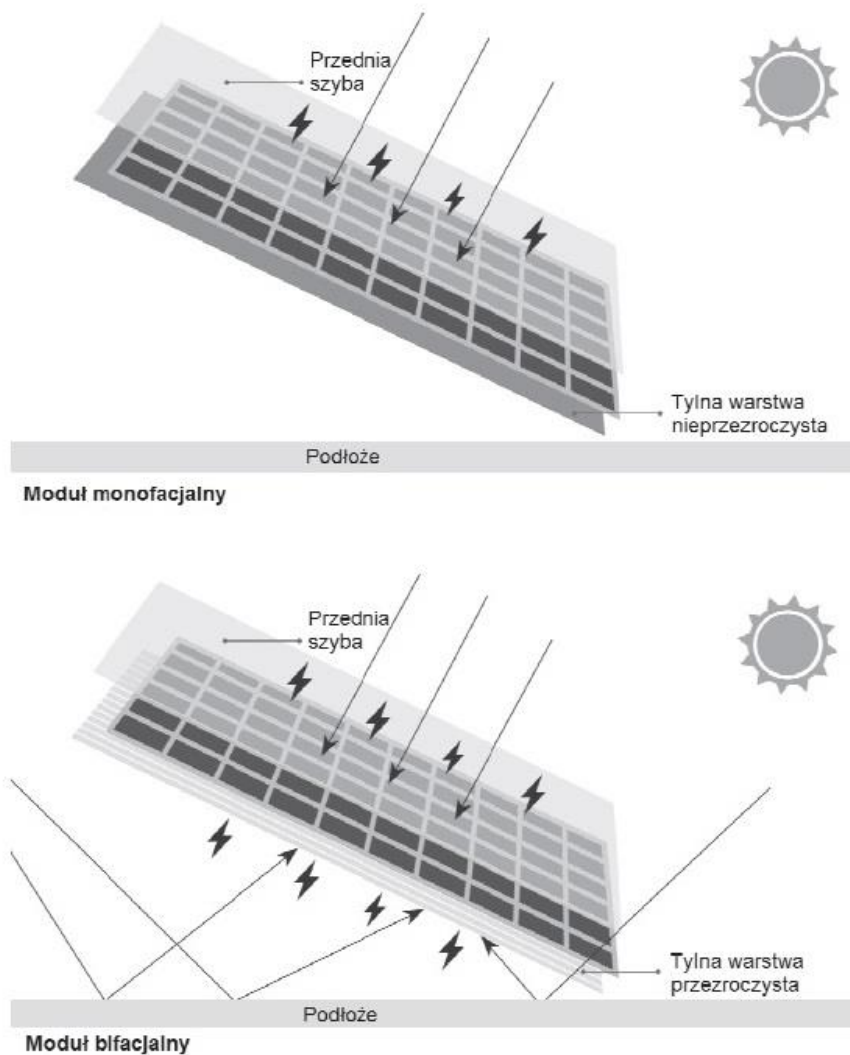
Ograniczenie kosztów produkcji z jednoczesnym podniesieniem efektywności uzysku energii to jedno z głównych wyzwań, jakie stawia sobie branża fotowoltaiczna. Odpowiednim rozwiązaniem wydaje się być technologia bifacjalna pozwalająca na konwersję zarówno bezpośredniego promieniowania słonecznego padającego 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 elektryczna, jaką można uzyskać w porównaniu do jednostronnych (monofacjalnych) modułów PV [3, 4, 5].

Komórki krzemowych ogniw bifacjalnych, w odróżnieniu od monofacjalnych, charakteryzują się możliwością generacji prądu zarówno po stronie przedniej jak i tylnej modułu (rysunki 1 i 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 elektryczne modułu bifacjalnego zebrano w tabeli 1, natomiast wartości współczynnika odbicia różnych podłoży mogących występować pod modułami podano w tabeli 2. Na rysunku 3 przedstawiono wartości współczynnika albedo,

określającego udział promieniowania słonecznego docierającego do tylnej części modułu bifacjalnego [3, 4, 5].



Rys. 1. Porównanie przekrojów poprzecznych komórki konwencjonalnej (monofacjalnej) oraz bifacjalnej [3]



Rys. 2. Porównanie przekrojów poprzecznych komórki konwencjonalnej (monofacjalnej) oraz bifacjalnej [3]

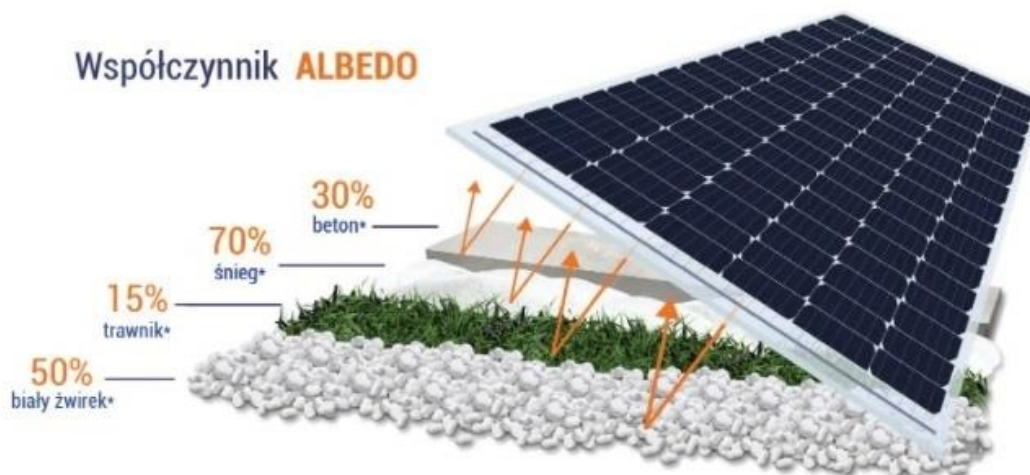
Tabela 1. Zestawienie parametrów elektrycznych wybranego modułu bifacialnego LG Neon2 BiFacial LG300N1T-G4 w warunkach STC [6]

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

Tabela 2. Wartości współczynnika albedo wybranych podłoży [7]

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



Rys. 3. Współczynnik albedo, określający udział promieniowania słonecznego docierającego do tylnej części modułu bifacjalnego [1]

Poniżej opisano sposób wyznaczania podstawowych wskaźników modułów bifacjalnych tzn. BR i BGE .

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 jednostce [%] i można zdefiniować go następująco [9]:

$$BR = \left(\frac{PR}{PF} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

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

BGE (ang. *Bifacial Gain Energy*) – wskaźnik wyrażający dodatkową energię wytwarzaną przez tylną część modułu odniesioną do energii wytwarzanej z przedniej jego części. Wskaźnik ten wyrażony on w jednostce [%] i można zdefiniować go następująco [9]:

$$BGE = \left(\frac{Rear}{Front} \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

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

Pomiary parametrów elektrycznych modułów bifacjalnych można wykonywać na zewnątrz przy wykorzystaniu naturalnego promieniowania słonecznego lub wewnątrz pomieszczenia za pomocą symulatora oświetlenia słonecznego. Aby wyniki badań otrzymane w wyżej wymienionych metodach były współmierne należy założyć, że prąd zwarciaowy I_{sc} modułu zależy liniowo od przedniego oraz tylnego napromieniowania modułu. Ponadto należy przyjąć, że prąd zwarciaowy I_{sc} podczas obustronnego naświetlenia jest równy sumie prądu wytwarzanego z części tylnej oraz przedniej modułu [8].

Wskaźnik BGE można także zdefiniować jako stosunek wydajności prądowej tylnej części do wydajności prądowej przedniej części modułu [8]:

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

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

Przy pomocy parametru określającego zdolność generowania fotonów przez tylną część modułu fotowoltaicznego $BGE_{I_{sc}}$ można wyznaczyć wartość irradiancji G_E dla pomiarów wykonywanych przy pomocy symulatora oświetlenia [8]:

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

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 naświetlenia padającego na przednią część modułu oraz promieniowania docierającego 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.

Poniżej opisano sposób wyznaczania podstawowych parametrów modułów bifacjalnych tzn. prąd zwarcia $I_{sc,bi}$, napięcie stanu jałowego $U_{oc,bi}$ oraz współczynnik wypełnienia FF_{bi} w zależności od wartości irradiancji G_E [8]:

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

gdzie: $I_{sc,bi}$ – prąd zwarcia modułu bifacjalnego [A], $I_{sc0,front}$ – prąd zwarcia uwzględniający oświetlenie wyłącznie przedniej części modułu bifacjalnego [A], $I_{sc0,rear}$ – prąd zwarcia uwzględniający oświetlenie wyłącznie tylnej części modułu bifacjalnego [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 modułu bifacjalnego [V], $U_{oc0,front}$ – napięcie obwodu otwartego uwzględniające oświetlenie wyłącznie przedniej części modułu bifacjalnego [V], $U_{oc0,rear}$ – napięcie obwodu otwartego uwzględniające oświetlenie wyłącznie tylnej części modułu bifacjalnego [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 modułu bifacjalnego, pFF – pseudo współczynnik wypełnienia dla modułu bifacjalnego, który nie uwzględnia strat rezystancji szeregowej.

Do zalet modułów bifacjalnych można zaliczyć [1, 2]:

- od 5% do 30% dodatkowego uzysku energii elektrycznej, w zależności od wartości współczynnika odbicia albedo powierzchni pod modułem i wysokości instalacji,
- wysoka niezawodność modułów w trudnych warunkach atmosferycznych ze względu na obustronną taflę szkła,
- wysoka roczna wydajność energetyczna modułów w warunkach niskiej irradiancji i niskie współczynniki temperaturowe (prądu zwarcia, napięcia obwodu otwartego i mocy),
- projektowane i produkowane w standardzie 1500 V,
- długoletnia gwarancja na wydajność energetyczną modułów (około 30 lat),
- mała powierzchnia instalacji i liczba materiałów potrzebnych do wykonania konstrukcji,
- ze względu na specyfikę montażu usprawniony przepływ powietrza, który schładzając moduły, zwiększa uzysk energii elektrycznej,
- atrakcyjność dla systemów zintegrowanych z budownictwem BIPV tzn. fasady, wiaty, ekrany dźwiękochłonne.

Do wad modułów bifacjalnych można zaliczyć [1, 2]:

- ilość dodatkowo wyprodukowanej energii elektrycznej modułu dwustronnego zależy od warunków atmosferycznych, w tym intensywności rozproszonego promieniowania dostępnego z tyłu modułu, współczynnika odbicia powierzchni pod modułem, a także od wysokości instalacji modułu od powierzchni odbijającej promieniowanie słoneczne,
- potencjał modułów dwustronnych nie zostanie wykorzystany w przypadku instalacji takich modułów na dachach skośnych, ponieważ ich naturalnym przeznaczeniem są instalacje montowane na gruncie z odpowiednio przygotowanym podłożem.

W celu maksymalizacji uzysku energii elektrycznej wytwarzanej przez tylną część modułu bifacialnego, należy spełnić następujące założenia:

- współczynnik odbicia gruntu (albedo) większy od 15%,
- instalacja pod kątem α co najmniej 30° ,
- wymiar L modułu nie powinien być większy niż 2,5 m,
- instalacja na wysokości H minimum 0,5 m (najlepiej powyżej 1 m),
- brak zacienienia od tylnej części modułu.

Przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest określenie parametrów charakterystycznych oraz charakterystyk prądowo – napięciowych dwustronnych modułów fotowoltaicznych przy różnych wariantach ich oświetlenia. Pomiary przeprowadza się w warunkach sztucznego oświetlenia. Powierzchnia badanego modułu oświetlana jest o strony przedniej, tylnej oraz z obu stron z wykorzystaniem halogenowych źródeł światła.

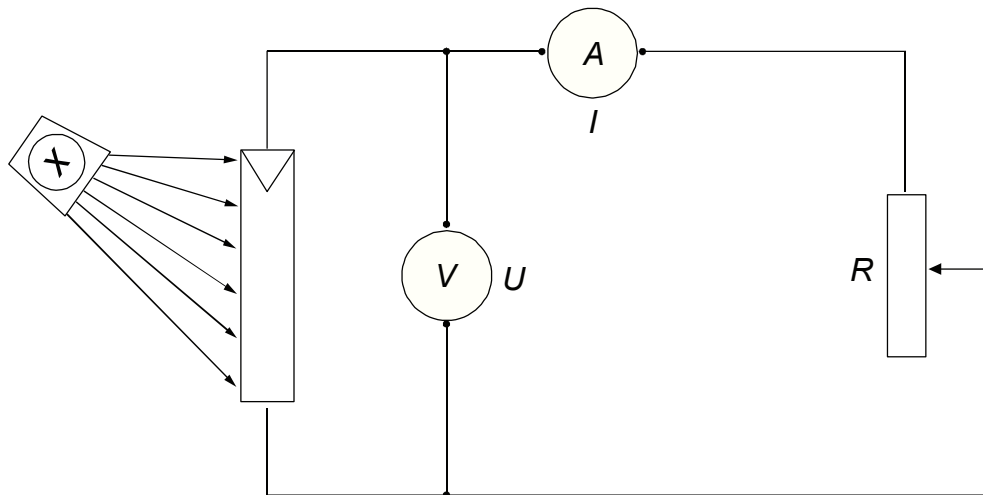


Tabela 3. Parametry - wyniki pomiarów i obliczeń

L.p.	Napięcie U [V]	Prąd I [A]	Moc P [W]	Współczynnik wypełnienia FF	Sprawność η [%]
Konfiguracja nr 1					
Oświetlenie przednie (12 źródeł halogenowych)					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					

34					
35					
36					
Irradiancja płaszczyzna przednia [W/m2]					
Irradiancja płaszczyzna tylna [W/m2]					
Konfiguracja nr 2 Oświetlenie z tyłu (12 źródeł halogenowych)					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					

30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			
43			
Irradiancja płaszczyzna przednia [W/m2]			
Irradiancja płaszczyzna tylna [W/m2]			
Konfiguracja nr 3			
Oświetlenie przednie (12 źródeł halogenowych)			
+			
Oświetlenie tylne (1x halogen)			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			

18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
Irradiancja płaszczyzna przednia [W/m2]			
Irradiancja płaszczyzna tylna [W/m2]			
Konfiguracja nr 4			
Oświetlenie tylne (12 źródeł halogenowych)			
+			
Oświetlenie przód (1x halogen)			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			

16					
17					
18					
19					
20					
21					
Irradiancja płaszczyzna przednia [W/m2]					
Irradiancja płaszczyzna tylna [W/m2]					
Konfiguracja nr 5					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					

28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
Irradiancja płaszczyzna przednia [W/m²]					
Irradiancja płaszczyzna tylna [W/m²]					

Sprawozdanie z przebiegu ćwiczenia

Sprawozdanie z przebiegu ćwiczenia powinno zawierać:

- przykładowe obliczenia z pełną dyskusją jednostek,
- wszystkie wyniki pomiarów i obliczeń zawarte w tabelach,
- wykresy charakterystyk prądowo – napięciowych $I=f(U)$ testowanego modułu dla wszystkich wariantów oświetlenia (w jednym układzie współrzędnych),
- wykresy charakterystyk mocowo – napięciowych $P=f(U)$ testowanego modułu dla wszystkich wariantów oświetlenia,
- określenie charakterystycznych parametrów elektrycznych na wykresach z zaznaczeniem prostokątów mocy maksymalnej,
- obliczenie sprawności konwersji fotowoltaicznej i współczynnika wypełnienia dla warunków STC i dla warunków laboratoryjnych,
- wnioski i komentarze.

Literatura

- [1] <https://columbusenergy.pl/blog/moduly-bifacialne-glass-glass/>
- [2] <https://www.gramwzielone.pl/energia-sloneczna/103258/zalety-modulow-dwustronnych-oraz-technologie-w-nich-wykorzystywane>
- [3] http://www.iee.put.poznan.pl/wydawnictwa/wydawnictwaFiles//2018/2034_Academic%20Journals%20Poznan%20University%20of%20Technology_94/!215_19_Kurz.pdf
- [4] http://www.iee.put.poznan.pl/wydawnictwa/wydawnictwaFiles//2018/2034_Academic%20Journals%20Poznan%20University%20of%20Technology_94/!225_20_Kurz.pdf
- [5] https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2018/04/itmconf_zkwe2018_01020.pdf
- [6] <http://www.lg-solar.com/downloads/products/LGE-Data%20Sheet-LG300N1TG4-EN-08.2016.pdf>, dn. 24.05.2017.
- [7] <http://www.instsani.pl/450/wielkosc-energii-docierajacej-do-kolektora>, 24.05.2017.
- [8] 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.
- [9] 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.