

Dariusz KURZ*, Kamil LEWANDOWSKI*, Martyna SZYDŁOWSKA*

ANALIZA UZYSKU ENERGII Z FOTOWOLTAICZNYCH OGNIW BIFACJALNYCH . CZĘŚĆ 2 – BADANIA I MODEL 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

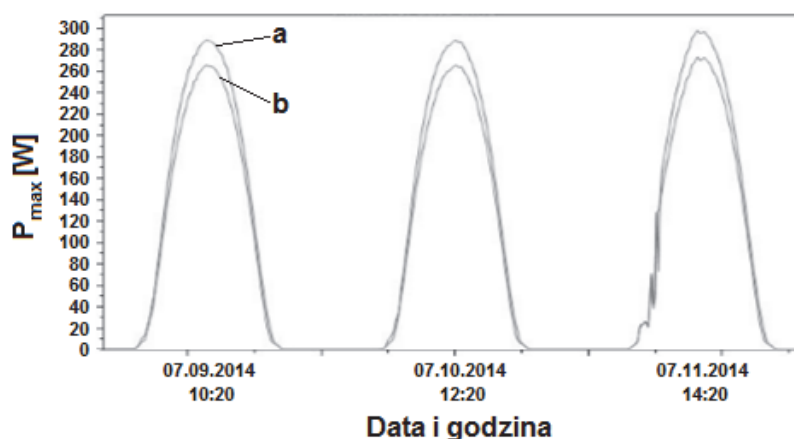
Przytoczone w pierwszej części publikacji informacje na temat budowy i parametrów fotowoltaicznych ogniw bifacjalnych pozwalają na dokonanie przeglądu prowadzonych badań w tym temacie. W literaturze przedmiotu, dostępnych jest coraz więcej badań wskazujących na związek pewnych parametrów instalacyjnych modułów bifacjalnych na wielkość dodatkowego uzysku energii (*BGE*) z nich otrzymywanego w porównaniu do zwykłych modułów jednostronnych.

Niniejsza publikacja ma na celu dokonanie przeglądu istniejących badań z wykorzystaniem ogniw bifacjalnych oraz zaprezentowanie empirycznego modelu pozwalającego na obliczenie dodatkowego rocznego uzysku energii w zależności od trzech zmiennych wraz z zakresem jego stosowalności.

* Politechnika Poznańska

2. BADANIA OGNIW BIFACJALNYCH W FUNKCJI WIELU ZMIENNYCH

Autorzy pracy [5] przeprowadzili w Kalifornii badania instalacji dachowej o stałym kącie nachylenia 30° . Wykorzystano dach o białej powierzchni, charakteryzujący się wysoką wartością wskaźnika odbicia promieni słonecznych, tzw. albedo. Przez trzy słoneczne dni w jedno minutowych interwałach czasowych dokonywano pomiarów i archiwizacji wartości mocy, napięcia, temperatury paneli oraz danych dotyczących pogody. Na podstawie zgromadzonych danych pomiarowych wykreślono charakterystyki (rys. 1) wygenerowanej mocy w czasie przez panel bifacjalny (krzywa a) oraz jego jednostronny odpowiednik o tej samej mocy, zbudowany z tego samego rodzaju komórek (krzywa b) [5].



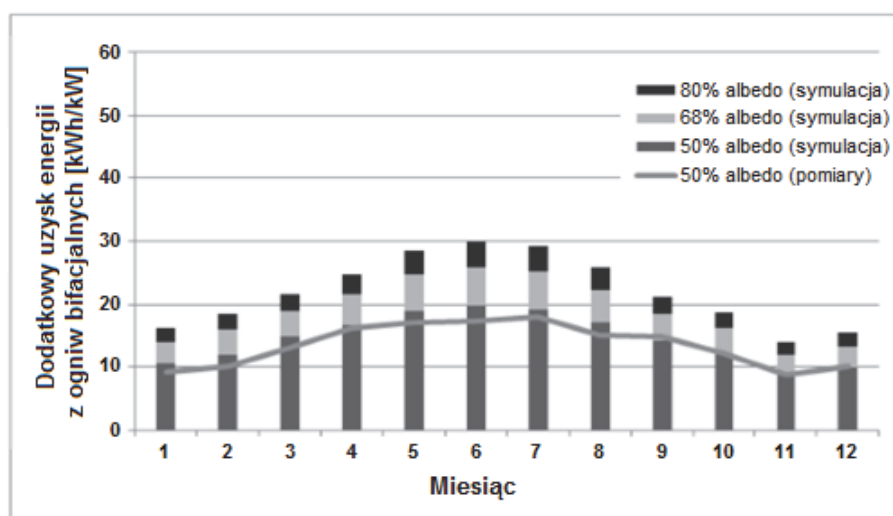
Rys. 1. Porównanie mocy uzyskanej z panelu, a) bifacjalnego, b) monofacjalnego [5]

Z analizy krzywych przedstawionych na rys. 1 można jednoznacznie zauważyć, że panel zbudowany z ogniw bifacjalnych wygenerował większą moc niż panel monofacjalny w tych samych warunkach pogodowych. Jednakże na tej podstawie, nie można określić wartości dodatkowego uzysku mocy w zależności od zmienności parametrów instalacyjnych. W tym celu przytoczono badania przeprowadzone w Jerozolimie (Izrael) [7], mające na celu porównanie dodatkowego uzysku energii, wynikającego z zastosowania modułów bifacjalnych, w zależności od albedo podłoża. W badaniu wykorzystana została instalacja na dachu płaskim o następujących parametrach:

- wysokość montażu modułów (odległość ich dolnej krawędzi od podłoża): 0,7 m,
- kąt nachylenia: 30° ,
- odległość między rzędami modułów: 1,5 m,

- odległość między panelami w rzędzie: 0,2 m,
- albedo: 50%,
- stosunek prądu zwarciovego strony tylnej do przedniej: 0,7.

Poza danymi zmierzonymi dla albedo równego 50%, zasymulowane zostały także uzyski dla tej samej oraz dla innych wartości współczynnika refleksyjności podłoża. Zmierzone i zasymulowane wyniki przedstawiono na rys. 2.



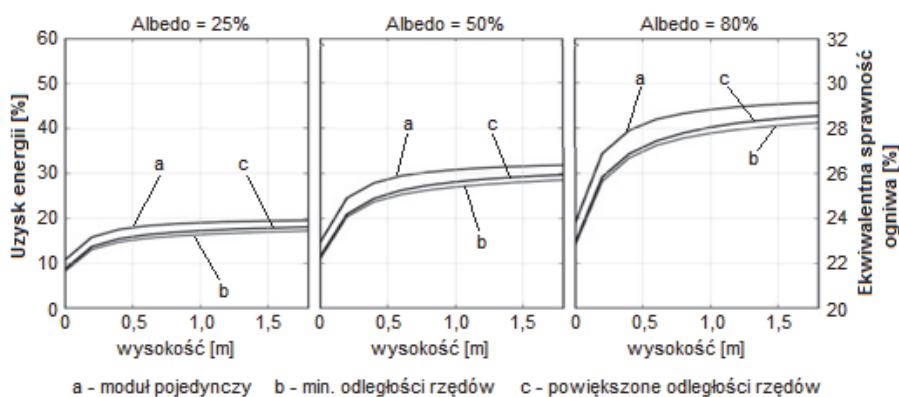
Rys. 2. Miesięczny dodatkowy uzysk energii wynikający z zastosowania modułów bifacjalnych w odniesieniu do 1kW zainstalowanej mocy znamionowej instalacji PV[7]

Zasymulowany oraz zmierzony uzysk energii (rys. 2) osiągają zbliżone wartości, dzięki czemu dla pozostałych wartości albedo podłoża wyniki symulacji można uznać za wiarygodne. Dla podłoża o 50-procentowym albedo dodatkowy roczny uzysk (*BGE*) wyniósł około 15%. W analogicznym badaniu [7] przeprowadzonym w Lahav (Izrael), dla albedo podłoża na poziomie ok. 30%, otrzymano wartość *BGE* w granicach 7-10%. Wyniki te wraz z wynikami przeprowadzonych symulacji wskazują na wprost proporcjonalną zależność pomiędzy albedo a *BGE*.

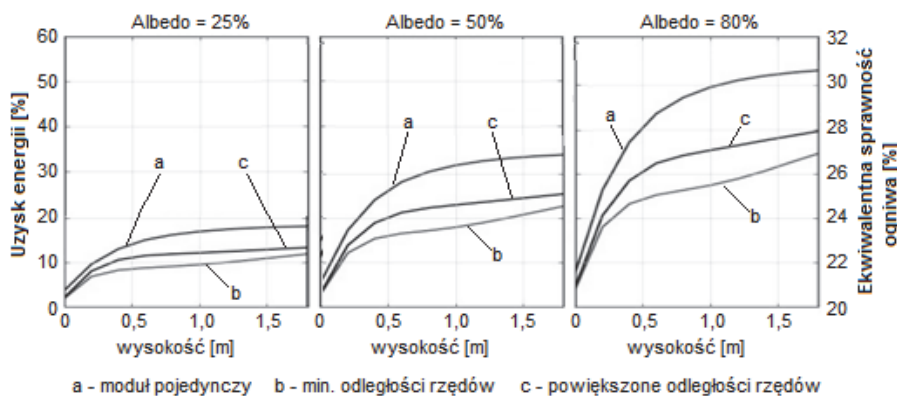
Analizując zależność dodatkowego uzysku energii od współczynnika refleksyjności podłoża warto zwrócić uwagę na wyniki symulacji [7], przeprowadzonych dla instalacji znajdujących się w dwóch różnych lokalizacjach - w San Diego (32° 45') oraz w Hannoverze (52° 22'). W przeprowadzonych symulacjach wzięte pod uwagę zostały parametry takie jak azymut, wysokość Słońca w danym czasie, szerokość geograficzna lokalizacji (równa kątowi nachylenia modułów, z uwagi na maksymalną ilość promieniowania słonecznego padającego na przód modułu w takim ustawieniu), odległość dolnych krawędzi modułów od

podłoża (określana jako wysokość modułu), albedo, odległości między rzędami modułów i między modułami w danym rzędzie. Stosunek prądów zwarciovych strony tylnej do strony przedniej przyjęto jako 0,9. Otrzymane wartości dodatkowych uzysków energii w funkcji wysokości modułów przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Dodatkowo, na prawej osi można odczytać wartość równoważnej sprawności komórek, czyli wartość sprawności monofacjalnych komórek zastępczych, z których można byłoby uzyskać taką samą ilość energii jak z komórek bifacjalnych w danych warunkach. Sprawność przedniej części komórek modułu przyjęta została jako 20%. Charakterystyki wykreślone zostały dla trzech typów instalacji: pojedynczego modułu (krzywa a), instalacji o minimalnych odległościach między rzędami modułów przy których nie występuje efekt zacienienia w południe 21 grudnia (krzywa b) oraz instalacji o 1,5 razy większych odległościach (krzywa c).

Wyniki symulacji potwierdzają wspomnianą powyżej, w przybliżeniu proporcjonalną zależność między albedo a *BGE*. Widoczny jest także wpływ zmiany wysokości na dodatkowy uzysk energii, natomiast zmiana odległości między rzędami modułów nie wpłynęła znacząco na wyniki. Warto odnotować, że otrzymane wartości sprawności równoważnej komórek z zakresu 25-30% przewyższają nawet teoretycznie osiągalne sprawności jednostronnych komórek krzemowych.

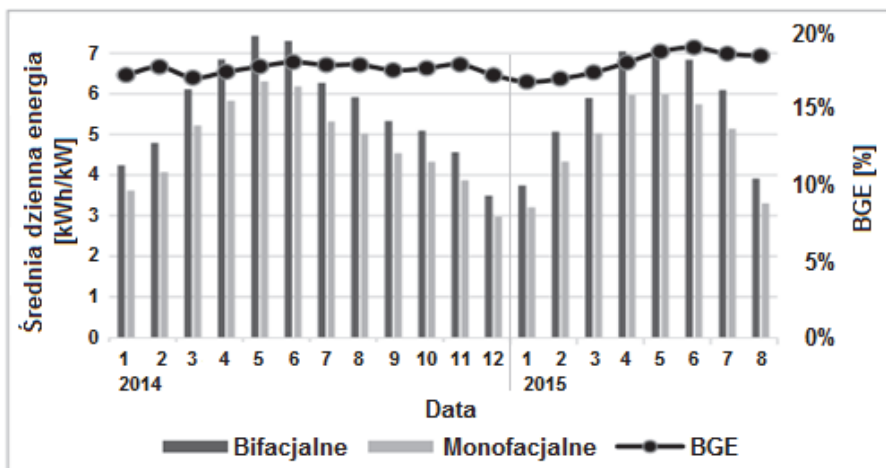


Rys. 3. Roczny bifacjalny zysk i równoważna sprawność komórek dla różnych parametrów instalacyjnych w odniesieniu do modułu monofacjalnego (Hannover, Niemcy) [7]



Rys. 4. Roczny bifacjalny zysk i równoważna sprawność komórek dla różnych parametrów instalacyjnych w odniesieniu do modułu monofacjalnego (San Diego, USA) [7]

Autorzy pracy [3] przeprowadzili badania w Tucson (Arizona), w których wykorzystano cztery moduły monofacjalne Canadian Solar CS6P-245M oraz dwa bifacjalne moduły Prism Solar B245. Wszystkie moduły skierowane zostały na południe (azymut = 180°). Pozostałe parametry instalacyjne to: odległość od podłoża - 0,3 m, kąt nachylenia - 10°, albedo - 70%. Na rysunku 5 poza zmianami BGE, przedstawiona została także średnia dzienna produkcja energii w odniesieniu do 1 kW mocy modułu.



Rys. 5. Porównanie średniej dziennej produkcji energii dla modułów bifacjalnych i ich jednostronnych odpowiedników w odniesieniu do 1kW zainstalowanej mocy znamionowej instalacji PV (Tucson, Arizona) [3]

Także wyniki innych badań przeprowadzonych w tej samej lokalizacji [3] (przy dużych wartościach albedo i małych kątach nachylenia modułów), wskazują na szczytowe wartości *BGE* osiągane w miesiącach letnich, natomiast brak jest wyraźnego wzrost tego wskaźnika na przestrzeni roku, co spowodowane jest niewielką wartością kąta nachylenia badanych modułów.

Przytoczone wyniki badań wskazują, że oprócz albedo podłoża oraz odległości między nim a badanym modułem, istotny wpływ na kształtowanie wartości wskaźnika *BGE* modułu ma także jego kąt nachylenia względem podłoża. Jednakże nie pozwalają na oszacowanie jego średniej rocznej wartości, która mogłaby posłużyć do oszacowania opłacalności inwestycji w panele bifacjalne.

3. MODEL ROCZNEGO UZYSKU ENERGII

Aby oszacować roczny dodatkowy uzysk energii z modułu bifacjalnego (*BGE*) stworzony został model trzech zmiennych, na podstawie wyników pięciu badań przeprowadzonych w Arizonie oraz jednego z Nowego Jorku [3]. Do jego opracowania posłużyły także zależności zaobserwowane przez innych autorów [1,4,6,8,9,10]. Zestawienie charakterystycznych parametrów instalacyjnych dla każdego z przeprowadzonych badań zebrano w tabeli 1. Z uwagi na stosunkowo krótki czas trwania badań nr 2 i 3 (pięć miesięcy – oznaczonych indeksem "*" w tabeli 1), dokonano ekstrapolacji, dzięki której otrzymano wyniki odpowiadające rocznym badaniom. Pozwoliło to na zredukowanie stosunkowo wysokich wartości *BGE* (wynikających ze zwykłej tendencji tego wskaźnika w miesiącach letnich [3]), wynoszących odpowiednio 36,8% i 27,3% dla danych z 5-miesięcznego okresu badania, do wartości 30,64% i 22,75% dla rocznego okresu (rozszerzonego o wyniki uzyskane za pomocą ekstrapolacji).

Tabela 1. Zestawienie parametrów instalacyjnych oraz otrzymanych wartości *BGE* dla badań które posłużyły do opracowania modelu trzech zmiennych [3].

Warunki testu	Przedział czasowy	Kąt nachylenia modułu θ [°]	Min. współczynnik wysokościowy h [m]	Albedo α [%]	Wartość zmierzona <i>BGE</i> [%]
1	1.1.14 – 12.31.14	30	0,63	10	17,88
2	5.10.13 – 10.04.13*	30	0,76	80	30,64
3	5.10.13 – 10.04.13*	30	0,2	80	22,75
4	1.1.14 – 12.31.14	20	0,2	70	18,85
5	1.1.14 – 12.31.14	20	0,2	25	13,25
6	1.1.14 – 12.31.14	10	0,3	80	17,66

Należy także podkreślić, że opracowany przez autorów pracy [3] model ma pewien ograniczony zakres stosowalności, obejmujący jedynie najbardziej powszechne warunki systemowe. Może on być stosowany dla instalacji:

- skierowanych na południe ($AZ=180^\circ$), przy czym istnieje możliwość zastosowania korekty dla systemów o innym azymucie [2],
- zastosowane moduły charakteryzują się wskaźnikiem BR przekraczającym 70% (jednak jeśli ich wartość jest różna od 95% należy zastosować odpowiednią korektę, omówioną w dalszej części pracy),
- kąt nachylenia modułu (θ) zawiera się w przedziale $7,5^\circ \div 35^\circ$ i jest stały (model nie obejmuje instalacji nadążnych),
- albedo podłoża (α) zawiera się w przedziale $10\% \div 90\%$,
- o szerokości geograficznej z przedziału $21^\circ \div 51^\circ$ od równika,
- gdzie odległość między rzędami modułów jest ustalana na podstawie długości cieni występujących 21 grudnia o godz. 9:00,
- gdzie tylne części wykorzystanych modułów nie są zacienione, ani nie ma żadnych przeszkód na drodze światła,
- w których nie wykorzystuje się modułów składających się z komórek opartych na technologii hybrydowej,
- gdzie minimalny współczynnik wysokościowy (h) zawiera się w przedziale $0,15 \div 0,8$ m. Współczynnik ten stosowany jest zamiast bezpośrednio zmierzonej minimalnej wysokości rzędu modułów w przypadku systemów z więcej niż jednym rzędem modułów zamocowanych na tej samej konstrukcji wsporczej. Pozwala on uniknąć błędów obliczeniowych wynikających z niezachowania proporcjonalności w związku z wystąpieniem efektu samozacienienia dla tego typu instalacji.

Poruszając się w opisanym zakresie stosowalności można skorzystać z opracowanego modelu danego wzorem [3]:

$$BGE = A \cdot (\theta) + B \cdot (h) + C \cdot (\alpha) \quad (1)$$

gdzie: A – dopasowany współczynnik dla kąta nachylenia modułu (θ) mający wartość $0,347^\circ$, B – dopasowany współczynnik dla minimalnego współczynnika wysokościowego (h) mający wartość $12,145/m$, C – dopasowany współczynnik dla albedo podłoża (α) mający wartość $0,1414\%$.

Aby oszacować roczny uzysk energii z modułu bifacjalnego należy w pierwszej kolejności wyznaczyć roczny uzysk energii na podstawie danych otrzymanych w standardowych warunkach testowych (STC), nie uwzględniając udziału tylnej części modułu (należy wykorzystać czarne podłoże – największy współczynnik absorpcji). Następnie za pomocą przedstawionego modelu (1) należy obliczyć roczny dodatkowy uzysk energii (BGE). Całkowity roczny uzysk energii oblicza się za pomocą następującego równania [3]:

$$TBEY = [(Front \cdot BGE) + 100\%] \quad (2)$$

gdzie: *TBEY* (*Total Bifacial Energy Yield*) – całkowity roczny uzysk energii uwzględniający wkład tylnej części modułu [kWh], *Front* – roczny uzysk energii nie uwzględniający wkładu tylnej części modułu, wyznaczony na podstawie testów w standardowych warunkach testowych [kWh].

W przypadku, gdy wartość wskaźnika *BR* wykorzystanych w instalacji modułów jest inna niż 95%, należy zastosować korektę wskaźnika *BGE* za pomocą następującego równania [3]:

$$BGE' = BGE \cdot (BR/95) \quad (3)$$

gdzie: *BGE'* – skorygowana wartość wskaźnika *BGE* [%], *BGE* – wartość wskaźnika *BGE* dla modułów o wskaźniku *BR* na poziomie 95% [%], *BR* – wartość wskaźnika *BR* modułów zastosowanych w instalacji [%].

Wówczas równanie (2) przyjmuje następującą postać [3]:

$$TBEY = [(Front \cdot BGE \cdot (BR/95)) + 100\%] \quad (4)$$

4. PODSUMOWANIE

Przytoczone wyniki badań wskazują na możliwość uzyskania dodatkowej energii przy wykorzystaniu fotowoltaicznych modułów bifacjalnych w porównaniu z monofacjalnymi. Istnieją zależności między parametrami instalacji bifacjalnej a rocznym dodatkowym uzyskiem energii z modułu bifacjalnego (*BGE*). Trzema kluczowymi parametrami kształtującymi roczną wartość wskaźnika *BGE* są: współczynnik refleksyjności podłoża, czyli jego albedo (α), kąt nachylenia modułów zastosowanych w instalacji względem podłoża (θ) oraz minimalny współczynnik wysokościowy (*h*). W pracy został także przytoczony doświadczalnie opracowany roczny model dodatkowego uzysku energii, pozwalający na oszacowanie rocznego wskaźnika *BGE* w zależności od ww. parametrów instalacyjnych. Przedstawiono także zakres jego stosowalności obejmujący najczęściej spotykane warunki instalacyjne oraz zaproponowano metodę wyznaczania dodatkowej ilości energii generowanej w skali roku z ogniwa bifacjalnego wykorzystującą przedstawiony model oraz testy przedniej części modułu bifacjalnego w standardowych warunkach testowych (STC).

BIBLIOGRAFIA

- [1] B-Solar Ltd. Commercial Test Sites and Outdoor Field Results. <http://www.b-solar.com/Technology.aspx?Sel=Field%20Results>, dn. 03.01.2018.
- [2] Castillo-Aguilella J. E., Hauser P. S., Bifacial Photovoltaic Module Best-Fit Annual Energy Yield Model with Azimuthal Correction, 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 5-10.06.2016, Portland, OR, USA, pp. 2688 – 2691, 2016.

- [3] 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.
- [4] Eisenberg N., Kreinin L., Bordin N., Kofman Y., High efficiency industrial PERT p-type bifacial cell and field results, 2nd Bifacial PV Workshop, Chambéry, France, 26-27.05.2014.
- [5] Erben C., Heng J. B., Xie Z., Fatehi J., Yang B., High Efficiency Bifacial Modules in Outdoor Testing, 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 14-19.06.2015, New Orleans, LA, USA, pp. 1 – 3, 2015.
- [6] Frank J., Rüdiger M., Fischer S., Goldschmidt J. C., Hermle M., Optical simulation of bifacial solar cells, *Energy Procedia*, vol. 27, pp. 300 – 305, 2012.
- [7] Kreinin L., Karsenty A., Grobgedl D., Eisenberg N., PV Systems Based on Bifacial Modules: Performance Simulation vs. Design Factors, 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 5-10.06.2016, Portland, OR, USA, pp. 2688 – 2691, 2016.
- [8] Luque A., Hegedus S., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. New York, NY, USA: Wiley, 2003.
- [9] Yusufoglu U. A., Pletzer T. M., Koduvelikulathu L. J., Comparotto C., Kopecek R., Kurz H., Analysis of the annual performance of bifacial modules and optimization methods, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, no. 1, pp. 320 – 328, 2015.
- [10] Yusufoglu U. A., Tae H. L., Pletzer T. M., Halm A., Koduvelikulathu L. J., Comparotto C., Kopecek R., Kurz H., Simulation of energy production by bifacial modules with revision of ground reflection, *Energy Procedia*, vol. 55, pp. 389 – 395, 2014.

ANALYSIS OF THE ENERGY YIELD FROM PHOTOVOLTAIC BIFACIAL CELLS. PART II - RESEARCH AND MODEL OF BIFACIAL CELLS

The paper analyzes the construction and yield of energy from photovoltaic bifacial 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: 10.02.2018, revised: 08.03.2018)

