

doi:10.15199/48.2024.10.51

Wpływ sposobu połączenia fotoogniw w panelu fotowoltaicznym na jego odporność na częściowe zacielenie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych ilustrujących wpływ sposobu połączenia fotoogniw tworzących panel fotowoltaiczny na jego charakterystyki przy różnym stopniu zacielenia. Analizy wykonano za pomocą programu SPICE dla panelu zawierającego ustaloną liczbę fotoogniw połączonych w łańcuchy o różnej liczbie i długości. W obliczeniach uwzględniano pełne zacielenie różnych obszarów panelu. W oparciu o uzyskane wyniki obliczeń przedyskutowano zasadność stosowania różnej liczby łańcuchów fotoogniw w panelu.

Abstract. The paper presents the results of computer simulations illustrating the influence of the method of connecting photocells into photovoltaic panels on its characteristics at various degrees of shading. The analyzes were performed using the SPICE software for a panel containing a fixed number of photocells connected in chains of different numbers of photocells and different lengths. The calculations took into account full shading of different areas of the panel. Based on the obtained calculation results, the validity of using different numbers of photovoltaic chains in the panel was discussed. (The influence of the manner of connecting photocells in a photovoltaic panel on its resistance to partial shading).

Słowa kluczowe: panele fotowoltaiczne, modelowanie, fotoogniwa, OZE, SPICE.

Keywords: photovoltaic panels, modelling, photocells, renewable power sources, SPICE.

Wstęp

Jak wiadomo [1-5], efektywność instalacji fotowoltaicznej (PV) silnie zależy od warunków atmosferycznych, w tym przede wszystkim nasłonecznienia. Zmienia się ono wraz z porą dnia oraz porą roku [6-9]. Konsekwencją tych zmian jest zmienna efektywność pracy rozważanych instalacji w ciągu dnia, a także w różnych porach roku [10].

Rano i wieczorem, gdy panele fotowoltaiczne oświetlane są promieniowaniem o mniejszej wartości gęstości mocy ilość wyprodukowanej przez takie instalacje energii elektrycznej jest znacznie mniejsza niż w południe, gdy pracujące instalacje eksponowane są na maksymalne dla danego dnia i regionu promieniowania. Podobnie instalacje fotowoltaiczne produkują znacznie mniej energii elektrycznej w miesiącach jesienno-zimowych, gdy dzień jest krótki a panele PV pracujących instalacji są słabiej oświetlone, niż w miesiącach wiosenno-letnich.

Ponadto na wartość gęstości mocy światła padającego na pracujące panele PV mają wpływ zachmurzenie i cienie spowodowane występowaniem takich przeszkód jak drzewo, komin lub budynek w sąsiedztwie pracujących instalacji PV. To dodatkowo niekorzystnie wpływa na pracę takich instalacji [11-14]. Może być to istotne także na jednostkach pływających, które wyposażone są w instalacje PV pracujące jako zasilanie wspomagające daną jednostkę, gdzie często z powodów konstrukcyjnych nie można zainstalować paneli w taki sposób by nie były one zacielenie przez komin, maszt, żagle, a nawet want lub sztag.

Od czasu uruchomienia pierwszej instalacji fotowoltaicznej (PV) nieprzerwanie trwają prace nad poprawieniem produktywności rozważanych rozwiązań [14, 15]. W efekcie tych prac powstają nowe technologie nie tylko pojedynczych ogniw fotowoltaicznych [16, 17], ale i całych paneli PV pracujących w instalacjach fotowoltaicznych [18]. Obecnie w przestrzeni rozwiązań komercyjnych stosowanych podczas budowy prosumenckich instalacji fotowoltaicznych wyróżnić można trzy generacje takich paneli.

Typowe instalacje fotowoltaiczne zawierają panele fotowoltaiczne oraz układ dopasowujący generowane napięcie do wymagań konkretnego odbiornika. Dodatkowo niektóre instalacje PV wyposażone są w układ magazynujący nadmiar wytworzonej energii [19]. Jednak

dla wszystkich instalacji PV elementem wspólnym są ogniwa PV, z których zbudowane są panele fotowoltaiczne instalowane zarówno w małych jak i dużych instalacjach PV [19, 20].

Jeszcze kilka lat temu typowy panel PV zawierał 60 lub 72 szeregowo połączone fotoogniwa (panele PV I generacji). W celu zabezpieczenia rozważanego panelu przed wsteczną polaryzacją występującą np. gdy któreś z fotoogniw w module PV zostało zacielenie, panel taki wyposażało się w diodę bocznikującą. W celu poprawy produktywności pracujących paneli, panele PV zaczęto wyposażać w trzy diody bocznikujące 3 łańcuchy połączonych szeregowo fotoogniwa (panele PV II generacji). Dzięki temu, gdy w takim module zacielenie zostało jakieś fotoogniwo, zacielenie to powodowało utratę jedynie 1/3 produkującej przez panel PV energii elektrycznej.

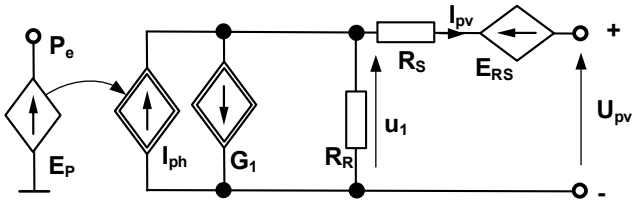
Kolejnym rozwiązaniem poprawiającym produktywność paneli PV jest technologia half-cut. Typowe panele wykonane w tej technologii zawierają 120 lub 144 fotoogniwa zorganizowane w ten sposób, że 60 lub 72 fotoogniwa połączone są ze sobą szeregowo w dwóch sub-modułach. Sub-modułach zaś łączone są ze sobą równolegle. Dodatkowo panele te wyposaża się w trzy diody bocznikujące [21, 22]. Dzięki temu, przy zacieleniu pojedynczego fotoogniwa w takim module, wyłączony z pracy zostaje zaledwie 1/6 pracującego panelu PV.

Celem pracy jest zbadanie wpływu sposobu połączenia fotoogniw w panelu fotowoltaicznym na odporność tego panelu na częściowe zacielenie. Rozważany jest panel zawierający identyczną liczbę fotoogniw, które są połączone w łańcuchy o różnej liczbie fotoogniw, a każdy z tych łańcuchów zbocznikowany jest diodą p-n. Porównano wpływ rozważanych konstrukcji panelu na jego charakterystyki prądowo-napięciowe oraz na wartość szczytową produkowanej mocy w warunkach częściowego zacielenia panelu oraz przy jego pracy bez zacielenia.

W rozdziale drugim przedstawiono opis zastosowanego modelu fotoogniwa. Rozdział trzeci zawiera opis testowanych konstrukcji badanego panelu. W rozdziale czwartym zawarto wyniki uzyskanych obliczeń oraz przedstawiono ich dyskusję.

Model fotoogniwa

W obliczeniach, których wyniki zaprezentowano w niniejszej pracy zastosowano model fotoogniwa bazujący na modelu opisanym w pracy [23]. Model ten dedykowany jest dla programu SPICE i ma reprezentację obwodową pokazaną na rys.1.



Rys. 1. Reprezentacja obwodowa modelu fotoogniwa

W modelu tym sterowane źródło napięciowe E_P reprezentuje gęstość mocy promieniowania P_e na powierzchni fotoogniwa. Sterowane źródło napięciowe I_{ph} modeluje fotoprąd opisany zależnością o postaci:

$$(1) \quad I_{ph} = P_e \cdot S \cdot \eta \cdot x$$

gdzie S jest aktywna powierzchnią fotoogniwa, η - sprawnością konwersji fotowoltaicznej, a x jest parametrem wskazującym zacinienie fotoogniwa ($x = 0$) lub brak tego zacinienia ($x = 1$).

Sterowane źródło prądowe G_1 modeluje charakterystyki złącza p-n za pomocą zależności o postaci:

$$(2) \quad I_1 = J_0 \cdot S \cdot \left(\frac{T_j}{T_0}\right)^3 \cdot \exp\left(\frac{-U_{go}}{n \cdot V_T}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{u_1}{n \cdot V_T}\right) - 1\right]$$

gdzie J_0 oznacza parametr gęstości prądu nasycenia, n - współczynnik emisji złącza, U_{go} - napięcie odpowiadające szerokości przerwy energetycznej krzemu, u_1 - napięcie na źródle G_1 , V_T - potencjał termiczny, T_j - temperaturę wnętrza, T_0 - temperaturę odniesienia.

Sterowane źródło napięciowe E_{RS} modeluje wpływ temperatury na rezystancję szeregową fotoogniwa. Rezystor R_S reprezentuje rezystancję szeregową fotoogniwa w temperaturze T_0 , a rezystor R_R - opływność fotoogniwa.

Testowane panele

Wykorzystując model fotoogniwa opisany w poprzednim rozdziale przeprowadzono analizy komputerowe paneli fotowoltaicznych o różnej konstrukcji. W każdej z tych konstrukcji wykorzystano 60 fotoogniw. W analizach założono, że fotoogniwa te są identyczne. Rozważano następujące warianty połączeń tych fotoogniw w panelu:

- 60 fotoogniw połączonych szeregowo oraz 1 dioda p-n połączona antyrównolegle do łańcucha fotoogniw (panel A), co odpowiada panelom I generacji,
- 3 połączone szeregowo łańcuchy po 20 fotoogniw, z których każdy jest bocznikowany diodą włączoną antyrównolegle (panel B), co odpowiada panelom II generacji,
- 2 połączone równolegle łańcuchy zawierające po 30 fotoogniw oraz 1 dioda p-n połączona antyrównolegle do łańcucha fotoogniw (panel C),
- 3 połączone szeregowo zestawy zawierające po 2 połączone równolegle łańcuchy zawierające po 10 fotoogniw oraz 3 diody p-n połączone antyrównolegle do każdego z zestawów (panel D), co odpowiada panelom typu half-cut,
- 6 połączonych szeregowo zestawów zawierających po 2 połączone równolegle łańcuchy zawierające po 5 fotoogniw oraz 6 diod p-n połączonych antyrównolegle do każdego z zestawów (panel E),
- 5 połączonych szeregowo zestawów zawierających po 4 połączone równolegle łańcuchy zawierające po 3

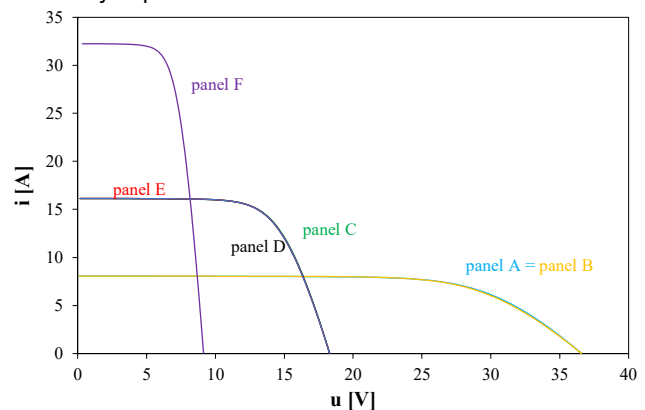
fotogniwa oraz 5 diod p-n połączonych antyrównolegle do każdego z zestawów (panel F).

W obliczeniach przyjęto wartości parametrów poszczególnych fotoogniw odpowiadające prostokątnemu monokrystalicznemu fotoogniwu krzemowemu o powierzchni 138 cm². Prąd zwartego obwodu wynosi dla niego 8 A.

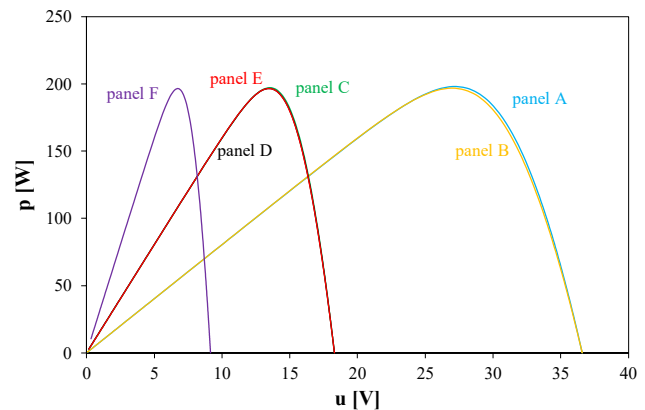
Wyniki badań

W tym rozdziale przedstawiono obliczone charakterystyki statyczne paneli fotowoltaicznych o konstrukcjach opisanych w poprzednim rozdziale. Wszystkie obliczenia przeprowadzono dla ustalonej wartości gęstości mocy promieniowania na powierzchni panelu $P_e = 1$ kW/m². Rozważano tylko przypadek pełnego zacinienia wybranych fotoogniw lub brak takiego zacinienia.

Na rys. 2 przedstawiono obliczone charakterystyki prądowo-napięciowe, a na rys. 3 - zależności produkowanej mocy od napięcia dla badanych paneli uzyskane przy braku zacinienia jakiegokolwiek fotoogniwa w badanych panelach.



Rys. 2. Charakterystyki prądowo-napięciowe badanych paneli przy braku zacinienia



Rys. 3. Zależność produkowanej mocy od napięcia dla badanych paneli przy braku zacinienia

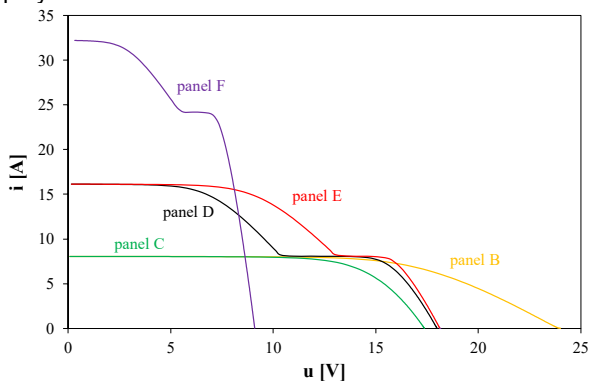
Jak można zauważyć na rys. 2, dla paneli A i B uzyskano dwukrotnie mniejszą wydajność prądową niż dla paneli C, D i E oraz 4 razy mniejszą niż dla panelu F, ale jednocześnie napięcie na tych panelach jest około dwukrotnie większe niż na panelach C, D i E. Dla panelu C uzyskano nieznacznie większe napięcie otwartego obwodu niż dla paneli D i E. Zaś dla panelu F napięcie to jest aż 4 razy mniejsze niż dla panelu A.

Z kolei, na rys. 3 można zauważyć, że dla każdego panelu występuje jedno maksimum na charakterystyce $p(u)$. Maksymalna wartość mocy wytwarzanej przez badane panele przy braku zacinienia jest podobna dla wszystkich

badanych paneli. Różnice nie przekraczają 1,5 %. Warto zauważyć, że dla paneli A i B moc osiąga wartość maksymalną przy napięciu równym około 28 V, dla paneli C, D, E – przy napięciu 13,5 V, a dla panelu F – przy napięciu 6,8 V.

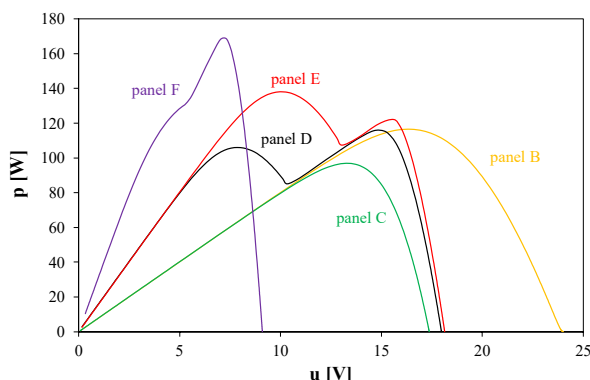
Przypadek wpływu zacinienia jednego fotoogniwa w badanych panelach na ich charakterystyki $i(u)$ oraz $p(u)$ rozważano na rys. 4 i 5.

Dla panelu A zacinienie jednego fotoogniwa powoduje utratę zdolności do generowania energii elektrycznej przez cały panel. Pozostałe panele, dzięki zastosowaniu równoległe połączonych łańcuchów fotoogniw lub diod bocznikujących takie łańcuchy generują w tych warunkach energię elektryczną. Jednak zarówno charakterystyki $i(u)$, jak i $p(u)$ znacznie różnią się od charakterystyk uzyskanych przy braku zacinienia.



Rys. 4. Charakterystyki prądowo-napięciowe badanych paneli przy zacińnięciu pojedynczego ogniwa w panelu

Na rys. 4 widać, że zacińnięcie jednego fotoogniwa spowodowało spadek napięcia na panelu B o 1/3 i dwukrotne zmniejszenie wartości prądu generowanego przez panel C. Charakterystyki $i(u)$ paneli D, E oraz F osiągają taką samą wartość prądu zwarcia, jak przy braku zacińnięcia i prawie taką samą wartość napięcia otwartego obwodu, ale widoczne jest ograniczenie wartości napięcia panelu, przy której uzyskuje się maksymalny prąd (równy prądowi zwarcia). Przy pewnej wartości napięcia panelu D i E ich prąd maleje do połowy wartości prądu zwarcia. Zmiana ta następuje przy najniższej wartości napięcia dla panelu D, a przy najwyższej wartości tego napięcia – dla panelu E. Dla panelu F rozważany spadek wartości prądu wynosi 25% jego wartości w stanie zwarcia.



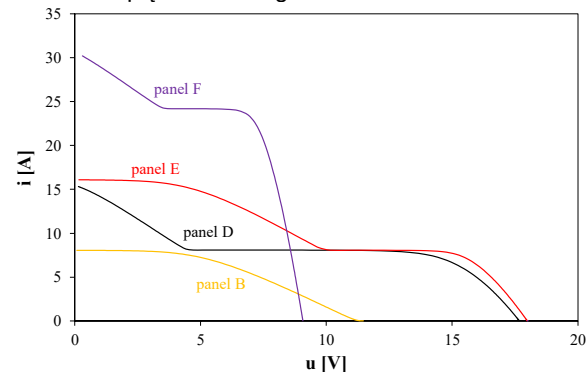
Rys. 5. Zależność produkowanej mocy od napięcia dla badanych paneli przy zacińnięciu pojedynczego ogniwa w panelu

Widoczne na rys. 5 charakterystyki $p(u)$ mają dla każdego panelu inny przebieg. Zależność ta posiada jedno maksimum dla paneli B i C, natomiast dla pozostałych paneli widoczne są dwa lokalne maksima. Dla każdego

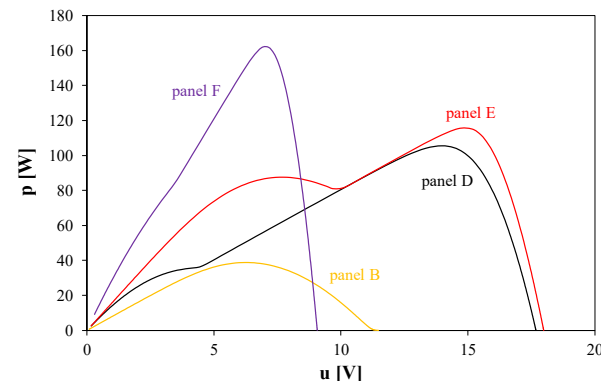
panelu maksima te występują przy innej wartości napięcia. Najmniejsze napięcie uzyskano dla panelu F (około 7,3 V), a największe (około 17 V) dla panelu B. Maksymalne wartości mocy uzyskane dla poszczególnych paneli wynoszą od 97 W (dla panelu C) do 169 W (dla panelu F).

Kolejny przykład dotyczy badanych paneli pracujących przy zacińnięciu dwóch fotoogniw w panelu, które wybrano w taki sposób, aby dla każdego z paneli był to wariant najbardziej niekorzystny. Uzyskane wyniki analiz zaprezentowano na rys. 6 i 7.

Przy tym wariantcie zacińnięcia panele A oraz C nie generują energii elektrycznej. Dlatego ich charakterystyki nie są widoczne. W porównaniu z poprzednio rozważanymi przypadkami można zauważyć na rys. 6, że istotnie rozszerzył się zakres napięcia, przy którym prąd panelu jest równy połowie prądu zwarcia. Zmalała również wartość napięcia otwartego obwodu.



Rys. 6. Charakterystyki prądowo-napięciowe badanych paneli przy niekorzystnym zacińnięciu dwóch fotoogniw w panelu



Rys. 7. Zależność produkowanej mocy od napięcia dla badanych paneli przy niekorzystnym zacińnięciu dwóch fotoogniw w panelu

Z kolei, pokazane na rys. 7 zależności $p(u)$ wykazują maksima pojedyncze lub podwójne. Maksymalne wartości wytwarzanej mocy są najmniejsze dla panelu B i wynoszą około 39 W, a największe – dla panelu F wynosząc 162 W. W porównaniu z przypadkiem przedstawionym na rys. 5 widać, że maksymalna wartość mocy zmalała w najmniejszym stopniu dla panelu F. Dowodzi to faktu, że można ograniczyć redukcję wartości produkowanej mocy na skutek zacińnięcia łącząc fotoogniwa w panelu w krótkie łańcuchy, które są bocznikowane przez inne łańcuchy fotoogniw i diody zabezpieczające.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych ilustrujących wpływ częściowego zacińnięcia powierzchni paneli fotowoltaicznych na ich charakterystyki. Obliczenia wykonano za pomocą programu SPICE i modelu fotoogniwa opracowanego przez autorów. Rozważano 6 różnych konfiguracji połączeń fotoogniw w panelu

zawierającym łącznie 60 fotoogniw. Dla każdej konfiguracji wyznaczono charakterystyki $i(u)$ oraz $p(u)$ dla 3 przypadków: braku zacielenia, zacielenia 1 fotoogniwa w panelu oraz zacielenia 2 fotoogniw znajdujących się w różnych łańcuchach fotodiod tworzących panel.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że w przypadku braku zacielenia nie widać istotnych różnic między charakterystykami poszczególnych paneli. Różnice stają się wyraźne, gdy zacielenie jest co najmniej jedno fotoogniwo. Wówczas dla klasycznej konstrukcji panelu fotowoltaicznego nie obserwuje się produkcji energii elektrycznej, a dla pozostałych konstrukcji widoczny jest spadek wartości mocy maksymalnej. Im większa liczba sekcji, na które podzielono panel, tym spadek mocy jest mniejszy. W przypadku zacielenia dwóch fotoogniw istotna jest ich lokalizacja na panelu. Jednak daje się zauważyć, że maksymalna moc generowana przez panel częściowo zacieleny jest malejącą funkcją liczby łańcuchów fotoogniw występujących w rozważanym panelu. Przykładowo, podział panelu na 20 obszarów tworzących takie łańcuchy powoduje, że zacielenie dowolnej liczby fotodiod z tego łańcucha spowoduje spadek wartości maksymalnej generowanej mocy zaledwie o 15%.

Badania przedstawione w niniejszej pracy mogą być przydatne dla konstruktorów paneli PV. Mogą one pomóc w opracowaniu optymalnego podziału panelu na sekcje i ograniczeniu strat energii spowodowanych zacieleniem.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, dr inż. Ewa Krac, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: k.gorecki@we.umg.edu.pl, e.krac@we.umg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] A. Hemza, H. Abdeslam, R. Chenni, D. Narimene, Photovoltaic system output simulation under various environmental conditions, International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Marrakech, Morocco, 2016, pp. 722-726
- [2] P. Matuszczyk, T. Popławski, J. Flaszka, Wpływ natężenia promieniowania słonecznego i temperatury modułu na wybrane parametry i moc znamionową paneli fotowoltaicznych, Przegląd Elektrotechniczny, R. 91, Nr 12, 2015, doi:10.15199/48.2015.12.40
- [3] Górecki K., Dąbrowski J., Krac E., SPICE-aided modeling of daily and seasonal changes in properties of the actual photovoltaic installation, Energies, Vol. 14, No. 19, 2021, 6247
- [4] M. Eduardo, R. Godinho, G. Radu, M. Mousa, P. Edris, Simulation and Comparison of Mathematical Models of PV Cells with Growing Levels of Complexity, Energies, Vol. 11, No. 11, 2018, 2902
- [5] Md. Sarkar, Effect of various model parameter on solar photovoltaic cell simulation: a SPICE analysis, Renewables: Wind, Water and Solar, Vol. 3, No. 13, 2016, pp. 1-9
- [6] Eduardo M., Godinho R., Radu G., Mousa M., Edris P., Simulation and Comparison of Mathematical Models of PV Cells with Growing Levels of Complexity, Energies, Vol. 11, No. 11, 2018, 2902
- [7] Bąk A., Borowiecka I., Cierlicki T., Kruszelnicka W., Wpływ warunków środowiskowych na wydajność modułów fotowoltaicznych, Nauka Technika, Polska Energetyka Słoneczna, Nr I-IV, 2018, s. 9-14
- [8] Dąbrowski J., Krac E., Górecki K., Analiza długookresowej wydajności instalacji fotowoltaicznej, Przegląd Elektrotechniczny, 2017, R. 93, Nr 2, s. 202-205
- [9] Górecki K., Górecki P., Krac E., Modelling simple photovoltaic systems with thermal phenomena taken into account, Proceedings of the 23rd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MIXDES 2016, 2016, pp. 276-281, 7529747
- [10] Górecki K., Dąbrowski J., Krac E., Spice-aided modeling of daily and seasonal changes in properties of the actual photovoltaic installation, Energies, 2021, Vol. 14, No. 19, 6247
- [11] Bidram A., Davoudi A., Balog R. S., Control and Circuit Techniques to Mitigate Partial Shading Effects in Photovoltaic Arrays, Photovoltaics, IEEE Journal of Photovoltaics, 2012, Vol. 2, No. 4, pp. 532-546.
- [12] Bizzarri F., Bongiorno M., Brambilla A., Gruosso G., Gajani G. S., Model of photovoltaic power plants for performance analysis and production forecast, Sustainable Energy, IEEE Transactions on energy conversion, 2013, Vol. 4, No. 2, pp. 278-285.
- [13] Villa L. F. L., Picault D., Raison B., Bacha S., Labonne A., Maximizing the Power Output of Partially Shaded Photovoltaic Plants Through Optimization of the Interconnections Among Its Modules, IEEE Journal of Photovoltaics, April 2012, Vol. 2, No. 2, pp. 154-163.
- [14] Lameirinhas R., Torres J.P., Cunha J., A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications, Energies, Vol. 15, No. 5, 2022, 1823
- [15] Maciąg K., Maciąg M., Energetyka na skalę XXI w. - osiągnięcia i perspektywy, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL, Lublin, 2018
- [16] Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A.A., and Novoselov K.S., Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, Source: Science, New Series Gene Expression: Genes in Action, vol. 306, no. 5696, pp. 183-191, 2007.
- [17] Berger C., Song Z., Li T., Li X., Ogbazghi A.Y., Feng R., Dai Z., Marchenkov A.N., Conrad E.H., First P.N., and de Heer W., Ultrathin Epitaxial Graphite: 2D Electron Gas Properties and a Route toward Graphene-based Nanoelectronics, Journal of Physical Chemistry B, vol. 108, no. 52, pp. 19912-19916, 2004
- [18] Haedrich I., Eitner U., Wiese M., Wirth H., Unified methodology for determining CTM ratios: Systematic prediction of module power, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 131, pp. 14-23, 2014.
- [19] Haberlin H., Photovoltaics. System Design and Practice, Wiley, 2012
- [20] Rashid M., Power Electronic Handbook, Academic Press, Elsevier, 2007
- [21] Hanifi H., Schneider J., Bagdahn J., Reduced shading effect on half-cell modules – measurement and simulation, 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2018, pp. 2529-2533
- [22] Mittag A., Pfreundt J., Shahid N., Wöhrle D., Neuhaus D., Techno-Economic Analysis of Half Cell Modules - The Impact of Half Cells on Module Power and Costs, Presented at the 36th EU PV Solar Energy Conference and Exhibition, 9-13 September 2019, Marseille, France
- [23] Górecki K., Górecki P., Paduch K.: Modelling solar cells with thermal phenomena taken into account. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 494, 2014, 012007, doi:10.1088/1742-6596/494/1/012007