

Mariusz ŚWIDERSKI*

ANALIZA SYSTEMU PV Z ROZPROSZONYMI OGNIWAMI SOLARNYMI

W artykule przedstawione zostały założenia, koncepcje i wybrane parametry modelu matematycznego i symulacyjnego dla systemu z rozproszonymi ogniwami PV. Dodatkowo został uwypuklony aspekt negatywnego wpływu zacięnień na pracę kilku połączonych ze sobą cel tworzących ogniwo PV. Negatywny wpływ poza analizowanym obniżeniem wydajności może skutkować uszkodzeniem systemu. Przedstawiono również w kontekście zacięnień z jakim problemem musi się zmagać algorytm MPPT w sytuacji gdy występuje kilka ekstremów lokalnych. Podczas badań została precyzyjnie wybrana struktura przetwornicy energoelektronicznej i jej parametry, które zapewnią możliwie niski koszt wdrożenia, a także spełnią wymagane kryteria pracy układu.

SŁOWA KLUCZOWE: ogniwo PV, model celi PV, elektrownia solarna, rozproszona elektrownia solarna, zacięnienia.

1. WPROWADZENIE

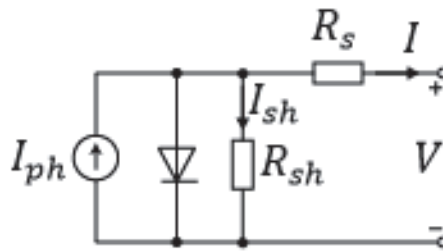
W niniejszej pracy przedstawiony zostanie w ujęciu symulacyjnym i matematycznym wpływ zacięnienia na pracę ogniwa fotowoltaicznego. Rozważania rozpoczną się od analizy pojedynczej celi, która odpowiednio połączona z innymi celami buduje powierzchnię panelu PV. Kolejnym krokiem analizy jest wykonanie symulacji pracy ogniwa PV składającego się z trzech cel w warunkach normalnych oraz zacięnienia i ugruntowanie tezy o negatywnym wpływie zacięnień na prace systemów fotowoltaicznych. Klasycznie dla standardowych paneli o powierzchni około $1,5\text{ m}^2$ w warunkach częściowego zacięnienia panelu PV temperatura zacięnionego ogniwa może wzrosnąć do takiej wartości, że powstaje punkt przegrzania (hot spot) i ogniwo może ulec uszkodzeniu. Za przyczynę takiego stanu rzeczy uważa się przepływ prądu (tzw. prąd ciemny) w kierunku przeciwnym przez nieoświetlone ogniwo. W przypadku kiedy zacięnienie obejmuje zaledwie 2% powierzchni panelu (np. zacięnienie obejmuje $\frac{3}{4}$ ogniwa z modułu, składającego się z 36 ogniw), maksymalna moc może zostać zmniejszona aż o 70% [1]. Dlatego kluczowym aspektem projektowanego systemu jest podział panelu [2] na niewielkie ogniwa wyposażone w własną przetwornicę

* Politechnika Poznańska

i kontroler sterujący pracą podzielonego panelu – projekt części silnopiędowej przetwornicy jest ostatnim aspektem opracowania.

2. MODEL SYMULACYJNY POJEDYŃCZEJ CELI PANELU PV

Analizę pracy panelu PV rozpoczęto od wykonania modelu symulacyjnego pojedynczej celi będącej podstawowym elementem składowym panelu PV. Schemat zastępczy pojedynczej celi przedstawiono na rysunku 1, gdzie I_{ph} reprezentuje fotoprąd celi oraz R_{sh} i R_s są odpowiednio wewnętrznymi rezystancjami równoległymi i szeregowymi. Klasycznie wartość R_{sh} jest bardzo duża, a wartość R_s jest bardzo mała, stąd w wielu analizach są one pomijane celem uproszczenia rozważań. Jednak w przedstawionym przypadku zrezygnowano z przytoczonych uproszczeń mając na celu zwiększenie dokładności modelu.



Rys. 1. Obwód zastępczy celi PV [3]

Dla celi przedstawionej na rysunku 1 prądu wyjściowy opisany jest następująco [3, 4]:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot \frac{k \cdot T}{q}} \right)} - 1 \right] - I_{sh} \quad (1)$$

gdzie: n - współczynnik idealności diody [-], R_s - rezystancja szeregową [Ω], k - stała Boltzmanna [$\frac{J}{K}$], T - temperatura otoczenia [K], q - ładunek elektryczny elektronu [C], I_{ph} - prąd powstały w wyniku promieniowania słonecz-

nego $[A]$, I_{sh} - prąd płynący przez rezystancję równoległą $[A]$, I_0 - prąd nasycenia celi $[A]$.

Równanie (1) wskazuje, że prąd wyjściowy w uogólnieniu jest różnicą pomiędzy prądem I_{ph} , a prądami I_{sh} i I_0 (z odpowiednim współczynnikiem). Najważniejszym prądem pod kątem analizy zacienień jest I_{ph} , ponieważ źródło prądowe w wyniku zjawiska fotowoltaicznego wytwarza prąd, który jest wprost proporcjonalny do natężenia promieniowania słonecznego. Prąd ten opisany jest zależnością (2) [3,4]:

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - 298)] \cdot \frac{I_r}{1000} \quad (2)$$

gdzie: I_{sc} - prąd zwarcia $[A]$, K_i - współczynnik dla prądu zwarcia celi w $25^\circ C$ i $1000 \frac{W}{m^2}$ $[-]$, I_r - promieniowanie słoneczne $\left[\frac{W}{m^2} \right]$.

Następny prąd I_0 jest silnie powiązany z temperaturą celi, a jego opis matematyczny przedstawia wzór (3) [3, 4]:

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{e^{\frac{q \cdot V_{OC}}{k \cdot n \cdot T}} - 1} \cdot \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \cdot e^{\left[\frac{q \cdot E_{g0}}{n \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right]} \quad (3)$$

gdzie: V_{OC} - napięcie obwodu otwartego $[V]$, T_r - temperatura odniesienia $25^\circ C$ $[K]$, E_{g0} - szerokość przerwy zabronionej $[eV]$.

Ostatnim składnikiem wchodzącym do równania (1) jest prąd płynący przez rezystancję równoległą I_{sh} , wyrażony wzorem (4) [3, 4]:

$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

gdzie: R_{sh} - rezystancja równoległa $[\Omega]$.

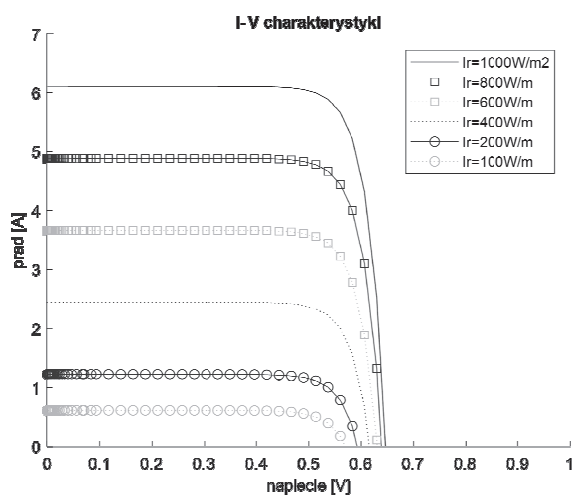
Dla modelu symulacyjnego przyjęto następujące parametry:

- prąd zwarcia $I_{sc} = 6,11 A$,
- napięcie obwodu otwartego $V_{OC} = 0,6 V$,
- temperaturę otoczenia $T = 25^\circ C$.

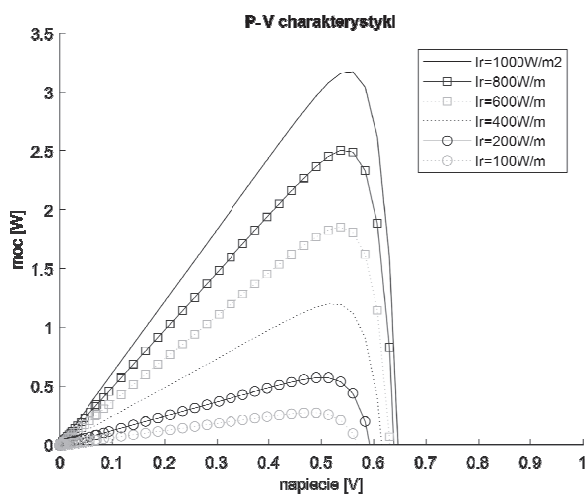
Pozostałe parametry modelu zostały dobrane w następujący sposób: współczynnik idealności diody na podstawie badań literaturowych [3,4] ustalono na $n = 1,2$ (typowy zakres wynosi $n \in \langle 1, 2 \rangle$), rezystancja szeregową rozumiana jako odchylenie się charakterystyki (o ΔU) prądowo-napięciowej od linii pro-

stej dla dużych prądów (I) została dla wyznaczona z zależności: $R_s = \frac{\Delta U}{I}$ i wynosi $R_s = 1\text{m}\Omega$, rezystancja równoległa na podstawie badań literaturowych [4] została ustalona na poziomie $R_{sh} = 1\text{k}\Omega$.

Dla przedstawionych parametrów wykonano obliczenia symulacyjne dla różnych wartości nasłonecznienia, a uzyskane charakterystyki prądowo-napięciowe oraz charakterystyki mocy przestawiono na odpowiednio rysunku 2 i 3.



Rys. 2. Charakterystyka prądowo-napięciowa celi



Rys. 3. Charakterystyka mocy w zależności od napięcia celi

Na podstawie uzyskanych charakterystyk można stwierdzić, że zbudowany model działa poprawnie i uzyskane wyniki pokrywają się z oczekiwaniami teoretycznymi.

Dzięki wykonanym badaniom symulacyjnym wykreślono charakterystykę (rys. 4) opisującą moc maksymalną celi w funkcji wartości nasłonecznienia. Zgodnie z oczekiwaniami uzyskana charakterystyka jest praktycznie liniowa, wobec czego opis matematyczny mocy maksymalnej dla pojedynczej celi PV wygląda następująco:

$$P_{max} = 0,0032 \cdot I_r - 0,0452 \quad (5)$$

Równanie (5) otrzymano przy pomocy metody regresji liniowej, a dodatkowe informacje statystyczne są następujące:

– szacunkowy błąd średni dla współczynnika kierunkowego

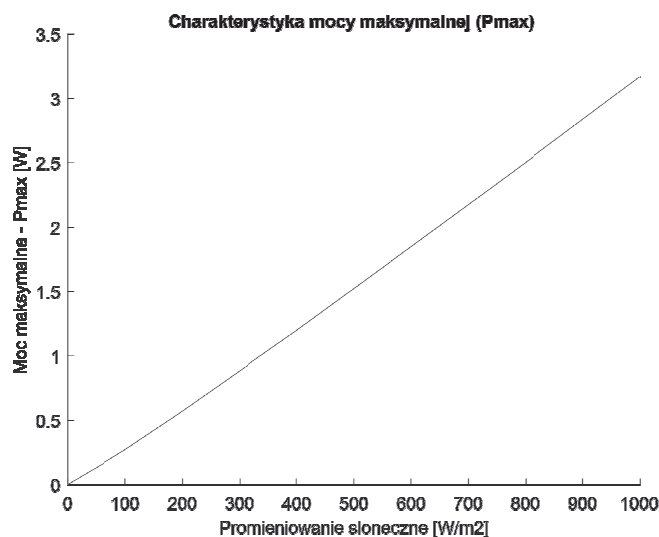
$$d_1 = 0,0000336 \frac{Am^2}{W} \text{ (wartość pomijalnie mała),}$$

– szacunkowy błąd średni dla wyrazu wolnego $d_1 = 0,0189 A$,

– współczynnik determinacji $R^2 = 0,9994$,

– szacunkowe odchylenie standardowe składnika losowego $s = 0,03073$,

– ilość stopni swobody $Q = 5$.



Rys. 4. Charakterystyka mocy maksymalnej w funkcji nasłonecznienia

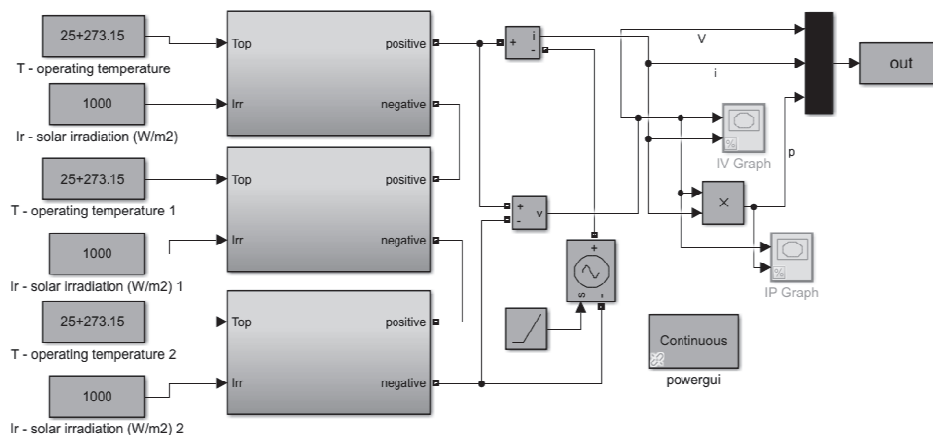
Na podstawie zaprezentowanych danych przyjęto, że opis matematyczny modelu pojedynczej celi jest poprawny z punktu widzenia statystyki i precyzji-

nie opisuje moc maksymalną w funkcji nasłonecznienia. W badanym przypadku liczba obserwacji wynosiła 7, a liczba estymowanych parametrów 2, stąd ilość stopni swobody.

3. MODEL SYMULACYJNY OGNIWA SOLARNEGO SKŁADAJACEGO SIĘ Z TRZECH CEL PV

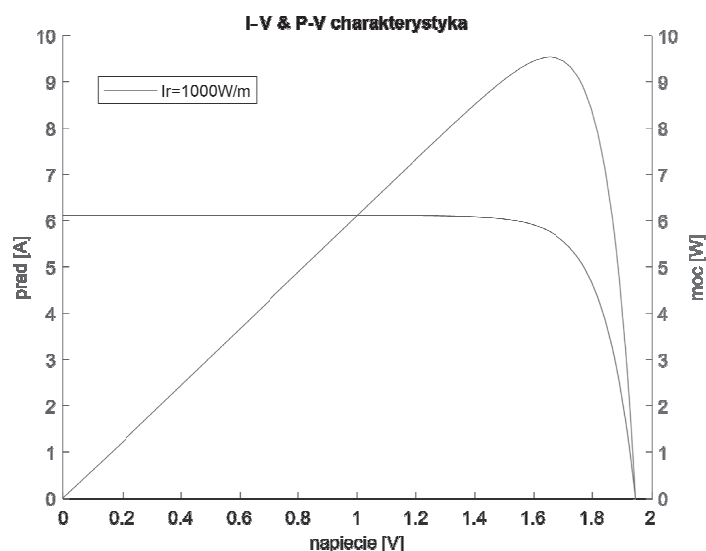
Kolejnym etapem było zbudowanie modelu symulacyjnego ogniwa solarne- go złożonego z trzech cel - opisanych w rozdziale 2. Model przygotowano w taki sposób by parametrami wejściowymi każdej z cel było nasłonecznienie oraz temperatura, a wyjściem celi zaciski prądowe z zaznaczoną polaryzacją. Cele połączono szeregowo aby napięcie budowanego ogniwa wynosiło około $2V$.

Rysunek 5 przedstawia zbudowany model gdzie na wyjściu wykonywany jest pomiar napięcia i prądu ogniwa dla wykreślenia odpowiednich charakterystyk. Wymuszeniem dla ogniwa jest sterowalne źródło napięciowe, które sterowane sygnałem w kształcie rampy (sygnał liniowo narastający, częściowo zbliżony do niepełnego okresu sygnału piłokształtnego) pozwala przeanalizować wymagany przebieg zmienności napięcia na wyjściu.



Rys. 5. Model symulacyjny ogniwa PV

W wyniku symulacji uzyskano charakterystyki dla równomiernego nasłonecznienia $Ir = 1000 \frac{W}{m^2}$ działającego na wszystkie cele, które zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 6. Charakterystyki: prądowo-napięciowa (lewa) i moc w funkcji napięcia (prawa) dla ogniwa

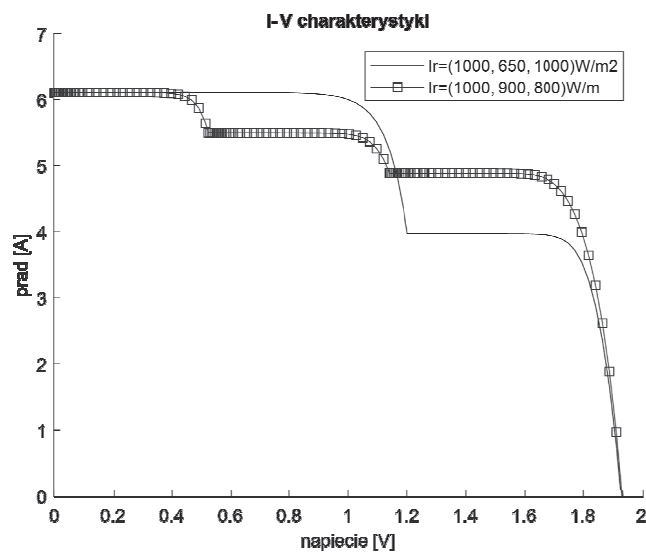
Uzyskane charakterystyki potwierdzają poprawność modelu, ponieważ dla połączenia szeregowego następuje sumowanie napięć co jest widoczne na rysunku 6 (lewa charakterystyka) oraz co za tym idzie sumowanie się mocy, dla analizowanego przypadku wzrost mocy jest trzykrotny - rysunek 6 (prawa charakterystyka).

Dalsza analiza będzie się skupiała na nierównomiernym nasłonecznieniu wybranych cel w ogniwie. Rozpatrywane będą dwa przypadki:

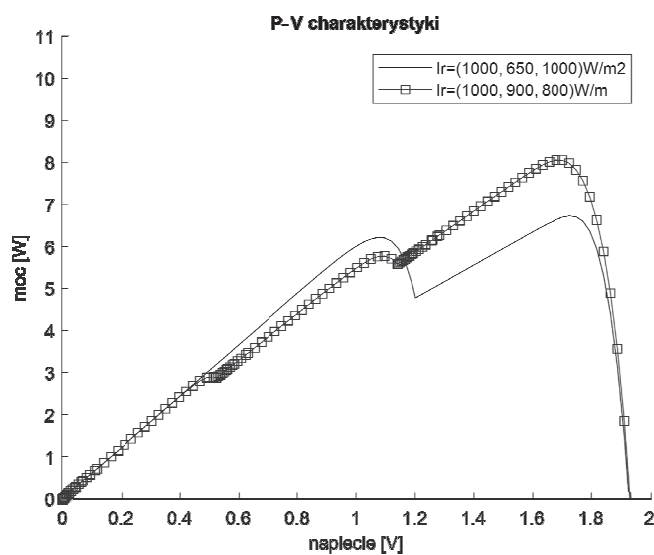
- gdy jedna z cel będzie nasłoneczniona w 65%, a pozostałym w 100% - przypadek oznaczony linią ciągłą na charakterystykach,
- gdy cele będą odpowiednio nasłonecznione w 100%, 90% i 80% - przypadek oznaczony linią z kwadratowymi znacznikami na charakterystykach.

Wykonane symulacje (rys. 7 i 8) ilustrują jak bardzo nawet niewielkie zacielenie (zmniejszone nasłonecznienie) może niekorzystnie oddziaływać na system PV. Na charakterystyce prądowo napięciowej (rys. 7) wraz z kolejnym zacieleniem powstaje kolejny uskok – stąd nasuwa się wniosek, że można wykorzystać liczbę uskoków do oszacowania ilości zacielenionych cel i przy pomocy algorytmów sterowania odpowiednio sterować systemem PV tak by zminimalizować niepożądane efekty. Zasadniczo największy uskok towarzyszy największemu zacieleniu. Oczywiście ze zmianami na charakterystyce prądowo napięciowej wiążą się ściśle zmiany na charakterystyce mocy w funkcji napięcia, na której pojawiają się dodatkowe lokalne ekstrema. Wobec czego

algorytmy MPPT [5] mogą skupić się wokół jednego lokalnego maksimum, które nie będzie globalnym i w konsekwencji cały system będzie pracował z jeszcze bardziej obniżoną efektywnością.



Rys. 7. Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa z efektem zacienienia



Rys. 8. Charakterystyka mocy w zależności od napięcia ogniwa z efektem zacienienia

Dla przedstawionych przypadków moc maksymalna układu wynosić będzie odpowiednio:

- przypadek 100%,65%, 100% - 6,7300W ,
- przypadek 100%,90%, 80 % - 8,0509W .

Niestety ze względu na ukształtowanie charakterystyki mocy w funkcji napięcia ogniwa PV uzyskane podczas symulacji wartości mocy nie zgadzają się z wyliczonymi wartościami przy pomocy wzoru (5) dla poszczególnych cel i dalszym ich sumowaniu. Wynik takiego obliczenia zawsze był większy od wartości uzyskanych w symulacjach, co pokazuje istotę problemu ponieważ zacinienie jednej z cel pracujących w systemie ma gorsze skutki niż zacinienie pojedynczej celi będącej autonomicznym mikro-systemem.

4. PROJEKT PRZERWONICY WSPÓLPRACUJACEJ Z OGNIWEM PV

Proponowana koncepcja podziału panelu PV na mniejsze ogniwa wyposażone w własne przetwornice zakłada wykorzystanie wspólnej dla całego systemu szyny DC będącej wyjściem wszystkich przetwornic połączonych równolegle. Taka koncepcja niesie za sobą konieczność zastosowania przetwornicy z separacją galwaniczną wyjścia. Mając na względzie niewielkie rozmiary jak również prostotę sterowania i niewielki koszt pojedynczego ogniwa wraz z przetwornicą wybrano przetwornicę typu flyback [6, 7] (rys. 9).

Parametry projektowanej przetwornicy:

- napięcie wejściowe minimalne $U_{in(min)} = 1,7V$,
- napięcie wejściowe maksymalne $U_{in(max)} = 2V$,
- napięcie wyjściowe $U_{out} = 12V$,
- prąd wyjściowy $I_{out} = 0,22A$,
- częstotliwość pracy przetwornicy $f = 25kHz$.

Na podstawie powyższych parametrów dobrano:

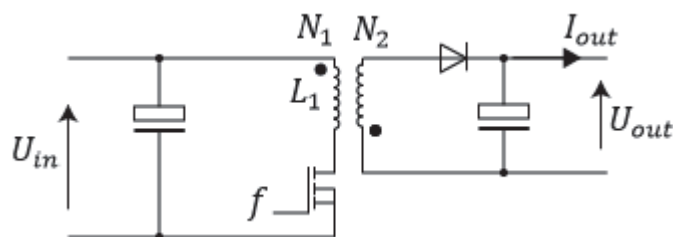
- przekładnię transformatora [6]:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\frac{U_{in(min)} + U_{in(max)}}{2}}{U_{out} + 0,7} = 0,15,$$

- indukcyjność uzwojenia pierwotnego [6]:

$$L_1 = \frac{\left(\frac{U_{in(min)} + U_{in(max)}}{2} \right)^2}{8 \cdot (U_{out} + 0,7) \cdot I_{out} \cdot f} = 6,125 \mu H.$$

Schemat projektowanej przetwornicy z zaznaczeniem dobranych elementów przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Schemat części silnoprądowej przetwornicy typu flyback

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione analizy dla pojedynczej celi oraz ogniwa PV pokazują jak bardzo złożone jest zjawisko zacienień w systemach PV. Ponieważ w przypadku zacienień nieliniowa część opisu matematycznego staje się znaczącym składnikiem oddziałującym na prąd wyjściowy ogniwa. Zasadność podziału klasycznego panelu na mniejsze elementy staje się coraz bardziej porządna ponieważ przy odpowiednim sterowaniu można z systemu usunąć elementy zacienione tak by nie wpływały na prace pozostałej części systemu będącej właściwie oświetlonej. Dodatkowo odpowiednie zarządzanie przetwornicami DC/DC w oparciu o kontrolę parametrów środowiskowych pozwoli znacząco podnieść niezawodność systemu. Autor planuje praktyczną implementację przedstawionego rozwiązania.

LITERATURA

- [1] Klugmann-Radziemska E., Odnawialne źródła energii - przykłady obliczeniowe, Wydanie V, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2015.
- [2] Ru-Min Chao, Jhin-Chao Jhang, I-Kai Wang, Shih-Chiang Hsu, Hardware implementation of a distributed PV system based on the central operation of the MPPT algorithm, Systems and Informatics (ICSAI), 2017 4th International Conference on, 10.1109/ICSAI.2017.8248301.
- [3] Salmi T, Bouzguenda M, Gastli A, Masmoudi A, Matlab/simulink based modelling of solar photovoltaic cell. Int J Renew Energy Res 2(2):6 2012.
- [4] Tu H-LT, Su Y-J. Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK. Proc World Congr Eng Comput Sci 2008:6 2008.
- [5] T. Eswam, P.L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, June 2007.

- [6] Flyback Converter http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/smps_e/spw_hilfe_e.html.
- [7] Krystkowiak M., Gulczyński A., Model symulacyjny i eksperymentalny przekształtnika solarnego współpracującego z siecią energetyczną, Prace Instytutu Elektrotechniki 2016, Z.273, s. 95-104.

PV SYSTEM ANALYSIS WITH SPREAD SYSTEM OF PV PANELS

The article presents the assumptions, concepts and selected parameters of the mathematical and simulation model for a system with dispersed PV cells. In addition, the aspect of the negative impact of shades on the work of several interconnected cells forming the PV cell has been emphasized. A negative impact outside the analyzed performance degradation may result in system damage. It was also presented in the context of shades with which the MPPT algorithm must deal with the situation when there are several local extremes. During the research, the structure of the power electronics converter and its parameters have been precisely selected, which will ensure the lowest possible cost of implementation, as well as meet the required criteria for the operation of the system.

(Received: 13.02.2018, revised: 10.03.2018)

