

## Imitator panelu fotowoltaicznego – wpływ temperatury na zmienność charakterystyki U-I

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono propozycję prostego i stosunkowo taniego imitatora paneli fotowoltaicznych PV. Propozycja ta została zasympulowana, a testy zostały zweryfikowane na stanowisku badawczym. Wyniki pomiarów uzyskane w badanym układzie wykazały istotny wpływ temperatury na kształt charakterystyk U-I. Zaproponowana konstrukcja imitatora pozwala na typowe testy falowników fotowoltaicznych, w tym na weryfikację zaimplementowanych w nich algorytmów MPPT (ang. Maximum Power Point Trackers).

**Abstract.** The article presents a proposal of a simple and relatively cheap imitator of PV photovoltaic panels. This proposal was simulated and the tests were verified on a test stand. Measurements in the tested system showed a significant influence of temperature on the shape of the U-I characteristics. The proposed design of the imitator allows for typical tests of photovoltaic inverters, including verification of the MPPT algorithms implemented in them. (**The photovoltaic panel imitator - influence of temperature on the U-I characteristics**).

**Słowa kluczowe:** PV, panel fotowoltaiczny, imitator, schemat zastępczy, symulator, MPPT.

**Keywords:** PV, photovoltaic panels, imitator, equivalent circuit, simulator, MPPT.

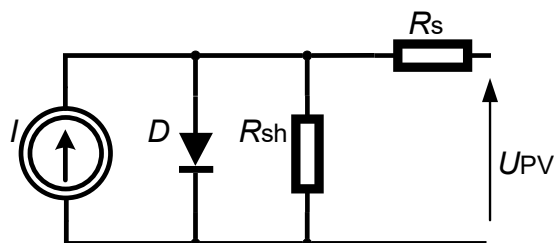
### Wstęp

Technologie OZE wymuszają realizację nowych systemów pomiarowych. Powodem jest możliwość weryfikacji takich urządzeń, jak np. przekształtniki fotowoltaiczne, panele fotowoltaiczne - PV (ang. Photovoltaic Panels), czy też zasobniki energii. Weryfikacje takie nie dotyczą tylko obszaru badawczego, ale także dydaktycznego, np. w czasie szkoleń dla instalatorów. Aby móc zweryfikować działanie układów przekształtnikowych, niezbędne jest ich sprzęgnięcie z panelami fotowoltaicznymi, działającymi przy określonym natężeniu światła. Celem takiej weryfikacji jest m.in. sprawdzenie sposobu i poprawności działania układów MPPT (ang. Maximum Power Point Trackers), czasów uruchamiania i reakcji zabezpieczeń. Jest kilka sposobów określenia przedstawionego punktu pracy, jednak aby móc zweryfikować ich działania potrzebna jest stabilna charakterystyka silnie nieliniowego źródła.

W przypadku korzystania z rzeczywistych paneli PV nie jest to zawsze możliwe ze względu na zmienność warunków pogodowych. Dodatkowym problemem jest ograniczenie działania do określonej pory dnia oraz roku. Aby temu zaradzić, stosuje się tzw. „sztuczne słońce”, które jest rozwiązaniem zarówno bardzo drogie pod względem inwestycyjnym oraz użytkowym i zazwyczaj wykorzystywane jest tylko do sprawdzania samych paneli PV. Ostatnią możliwością zastąpienia paneli PV w badanym układzie fotowoltaicznym, jest budowa symulatora (imitatora), odwzorowującego charakterystykę określonego źródła. Znane są rozwiązania symulatorów odwzorowujących charakterystykę jako energoelektronicznego zasilacza z wbudowanym sterowaniem, czego wynikiem jest charakterystyka dowolnego źródła (PV, wodorowe, akumulator i inne). Jakkolwiek jest to rozwiązanie najlepsze, ma jedną wadę – stosunkowo wysoką cenę, zależną przede wszystkim od mocy i maksymalnego napięcia wyjściowego takiego źródła [5], [6].

### Założenia projektowe

Znane jest odwzorowanie ogniwa PV w postaci schematu zastępczego (rys. 1), złożonego ze źródła prądowego, diody oraz dodatkowych rezystorów [1]. Moduł fotowoltaiczny można odwzorować połączeniem szeregowym wielu ogniw (liczba ogniw zależna od symulowanego typu paneli PV).



Rys. 1. Schemat zastępczy ogniwa PV, gdzie:  $I$  – źródło prądu stałego (wartość prądu zależna od natężenia promieniowania słonecznego);  $D$  – dioda reprezentująca charakterystykę zewnętrzną źródła półprzewodnikowego;  $R_s$  – rezystancja szeregową,  $R_{sh}$  – rezystancja równoległa;  $U_{PV}$  – napięcie ogniwa PV.

Do tej pory stosowano schemat zastępczy w celu odwzorowania działania paneli fotowoltaicznych w postaci obwodu elektrycznego. Umożliwia to zrozumienie działania źródeł PV, jednak nie wykorzystuje się obecnie bezpośrednio schematu zastępczego w celu zbudowania symulatora.

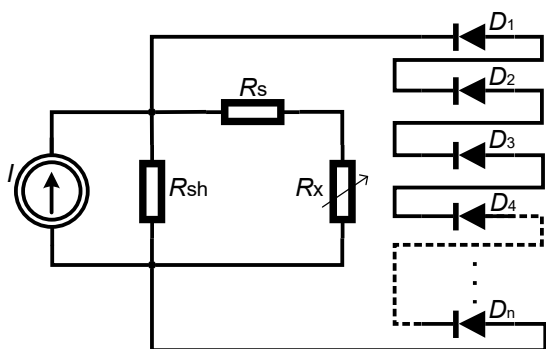
W rzeczywistym źródle prąd jest wynikiem generowanych par elektron-dziura, zatem podczas pracy przepływa przez szereg ogniw, które w tym wypadku reprezentowane są za pomocą diod. Skutkiem czego, dołączając dowolne rezystancyjne obciążenie, powstają straty mocy określone spadkiem napięcia oraz przepływającym prądem.

W zaprezentowanej pracy zmieniono rolę schematu zastępczego (rys. 1) i wykorzystano go jako podstawę użytkowego symulatora PV. Zastosowanie szeregowo połączonych diod krzemowych mocy, umożliwiło odwzorowanie modułu fotowoltaicznego z 37 ogniwami (liczba ogniw wynika z ograniczeń technicznych wykorzystywanego zasilacza). Zastosowanie zasilacza o stałej wydajności prądu (CC – constant current) dopełnia schemat zastępczy z rys. 1 z tą różnicą, że w projektowanym symulatorze jest jedno źródło prądu dla wszystkich ogniw. Stosując bezpośrednio schemat zastępczy, należałoby zastosować tyle źródeł prądu, połączonych odpowiednio z diodami, ile planuje się symulować ogniw. Można jednak zauważyć, że dla projektowanego symulatora nie ma to znaczenia, co dalej zostało pokazane. Również nie zastosowano dodatkowych

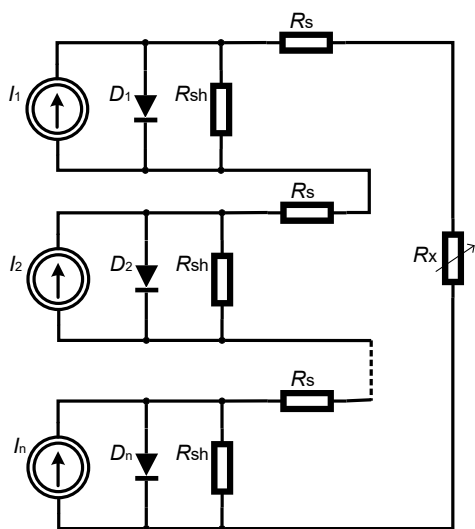
rezystancji szeregowych i równoległych, które mają wpływ na nachylenie prostoliniowych części charakterystyki zewnętrznej. Rezystancje wewnętrzne zastosowanych diod są dla tych nachyleń wystarczające.

### Badania symulacyjne

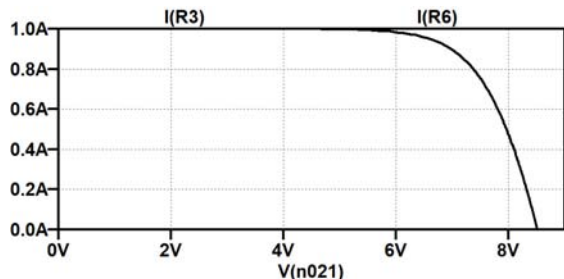
Przed zbudowaniem urządzenia przeprowadzono badania symulacyjne w środowisku LTSpice [2]. Na rys. 2 pokazano schemat obwodu symulatora badanego w środowisku LTSpice i docelowo zbudowanego, a na rys. 3 w celach porównawczych wersję alternatywną. Na rysunkach wprowadzono oznaczenia:  $D_1 - D_n$  – diody symulujące charakterystykę źródła półprzewodnikowego;  $R_x$  – zmienna rezystancja obciążenia;  $I$  – źródło prądu;  $R_s$ ,  $R_{sh}$  – rezystancje szeregowa i równoległa.



Rys. 2. Schemat symulowanego w LTSpice obwodu imitatora w wersji docelowej



Rys. 3. Schemat symulowanego w LTSpice obwodu imitatora alternatywnego

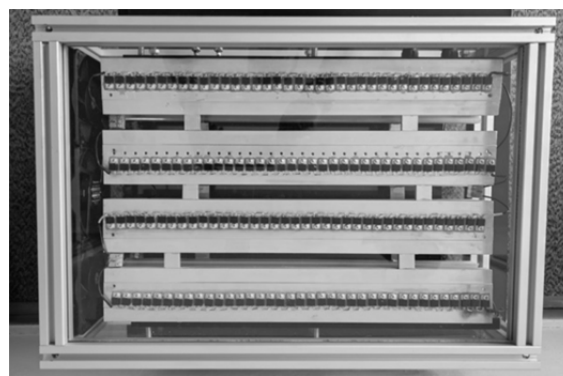


Rys. 4. Wyniki symulacji dla obu wariantów schematu imitatora – charakterystyka zewnętrzna dla tej samej wartości prądu źródła.

Uzyskane wyniki (rys. 4) pokazują, że z punktu widzenia uzyskanej charakterystyki zewnętrznej nie ma znaczenia, czy w obwodzie jest jedno źródło prądu dla wszystkich ogniw, czy źródła prądu są rozdzielone dla każdego ogniwa osobno. Wadą rozwiązania z jednym źródłem prądu jest brak możliwości symulacji różnych wymuszeń dla poszczególnych ogniw (np. symulacja częściowego zacielenia paneli, lub pojedynczych ogniw w panelu PV).

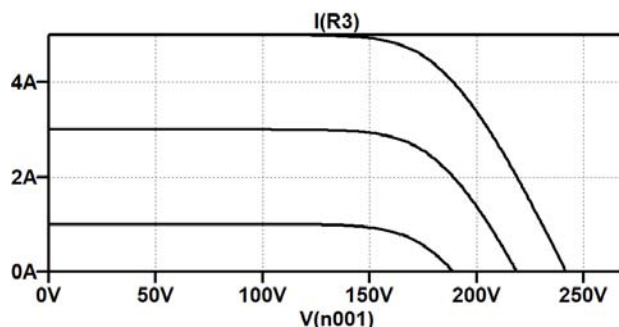
### Realizacja urządzenia

Założeniem była budowa układu umożliwiającego zasilanie standardowego falownika typu on-grid stosowanego w mikroinstalacjach PV. W tym wypadku ważne było dostosowanie parametrów projektowanego imitatora do parametrów wejściowych układu MPPT. Określono najniższe użyteczne napięcie na poziomie 150-200 V przy maksymalnym prądzie 5 A. Aby uzyskać odpowiednio szeroki zakres zmian parametrów, prowadzący do weryfikacji działania układu MPPT, odwzorowano 6 paneli fotowoltaicznych w postaci modułów zintegrowanych na osobnych radiatorach (zrealizowany na 222 diodach prostowniczych) (rys. 5).



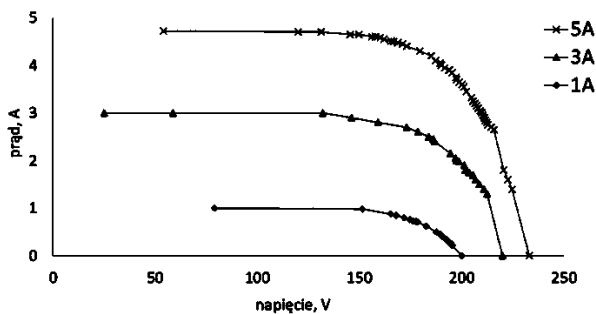
Rys. 5. Fotografia wykonanego imitatora.

Wstępna weryfikacja działania układu została zweryfikowana w programie LTSpice (rys. 6), dla trzech wartości prądów (1 A, 3 A, 5 A).



Rys. 6. Wynik symulacji imitatora – charakterystyki zewnętrzne dla różnych wartości prądu (1 A, 3 A, 5 A).

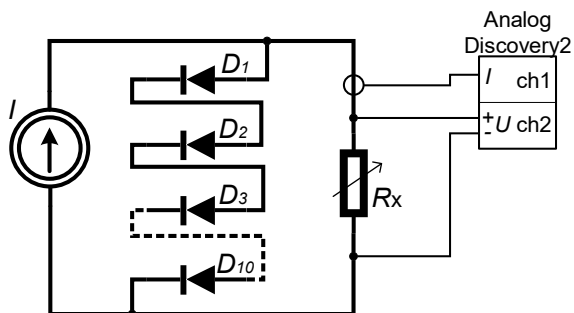
Działanie wykonanego urządzenia, składającego się z modułów diodowych oraz zasilacza, zweryfikowano pomiarowo (rys. 7). Określono charakterystyki prądowo-napięciowe przy zmiennym obciążeniu, dla trzech nastaw źródła prądowego.



Rys. 7. Wyniki pomiarów imitatora—charakterystyki zewnętrzne.

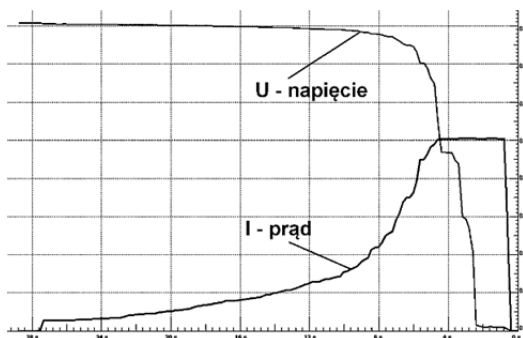
### Wpływ temperatury na charakterystyki zewnętrzne imitatora

Zrealizowane urządzenie umożliwia imitację paneli fotowoltaicznych, jednak widoczna jest rozbieżność pomiędzy charakterystykami zmierzonymi (rys. 7), a symulowanymi (rys. 6). Jednym z problemów, który powoduje różnice w charakterystykach jest zmniejszenie napięcia dyfuzyjnego złącza P-N spowodowanego zmianą temperatury zastosowanych diod. Podczas realizowanych pomiarów temperatura nie była kontrolowana, a jedynie włączone były wentylatory chłodzące. Rzeczywiste ogniwo fotowoltaiczne charakteryzuje się zmianą parametrów prądowo-napięciowych w zależności od temperatury (wraz ze wzrostem temperatury napięcie maleje, a prąd rośnie). W celu sprawdzenia wpływu temperatury na charakterystyki zewnętrzne przeprowadzono symulację w programie LTSpice oraz pomiary dla panelu składającego się z 10 diod (rys. 8, 11).



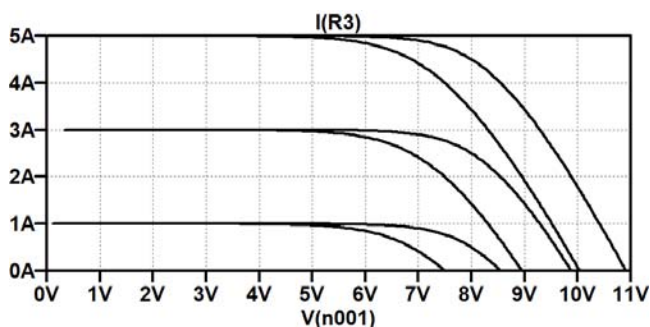
Rys. 8. Schemat układu wyznaczania charakterystyk zewnętrznych oraz dla określonej temperatury.

Do pomiarów wykorzystano rejestrator Analog Discovery2 z dwoma kanałami analogowymi o rozdzielczości 14 bit. Ze względu na nagrzewanie się diod pomiaru należało wykonać bardzo szybko.



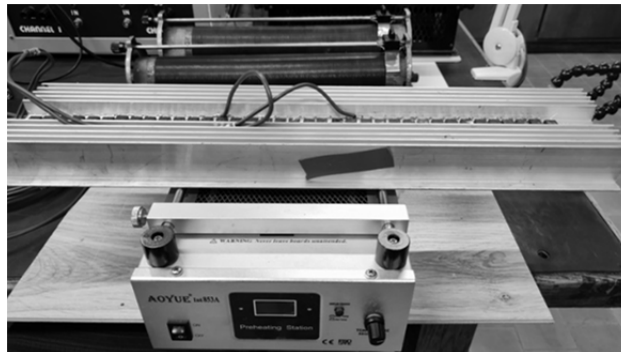
Rys. 9. Przykładowe przebiegi prądu i napięcia podczas rejestracji charakterystyk zewnętrznych, przy różnych prądach i temperaturach (obciążenie zadawane ręcznie, bez pomiaru wartości, jedynie celem przedstawienia przybliżonego kształtu charakterystyk).

W tym celu rejestrowano jednocześnie, z okresem 100 ms, prąd i napięcie podczas zmiany nastawy rezystora suwakowego  $R_x$  (rys. 9). Wykonane pomiary miały na celu określenie wpływu zmiany temperatury na napięcie imitatora. Wpływ temperatury na zmianę prądu może być uzyskany tylko przez sterowanie źródłem prądu ze sprzężeniem od temperatury.

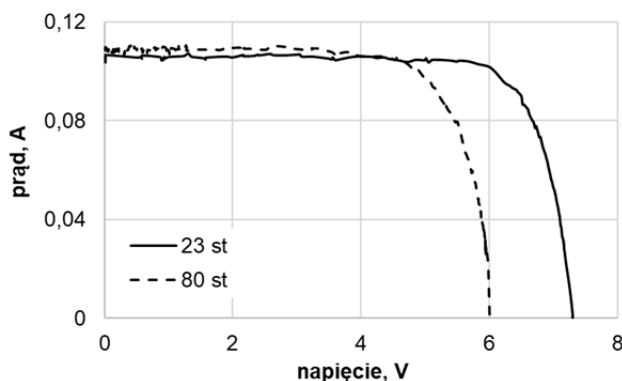


Rys. 10. Wyniki symulacji charakterystyk zewnętrznych przy różnych prądach i temperaturach.

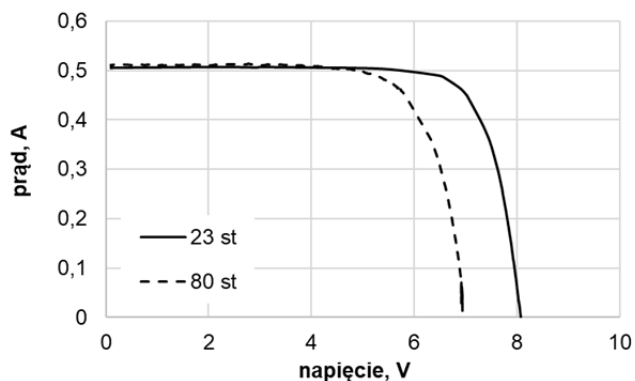
Wyniki symulacji (zarejestrowane w środowisku LTSpice) wpływu temperatury na charakterystyki zewnętrzne pokazano na rys. 10, natomiast wyniki wykonanych pomiarów charakterystyk zewnętrznych dla różnych prądów (0,1 A, 0,5 A, 1 A, 3 A, 6 A) i temperatur ( $23^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$ ) pokazano na rys. od 12 do 16. Podana temperatura dotyczy średniej temperatury obudów 10 diod, przez który płynął prąd. Temperatura była mierzona pirometrem. Na radiatorze (rys. 11) zainstalowanych było 37 diod, ale prąd wymuszano przez 10 środkowych. Dodatkowo radiator ten ustawiony został na promienniku podczerwieni celem stabilizacji temperatury.



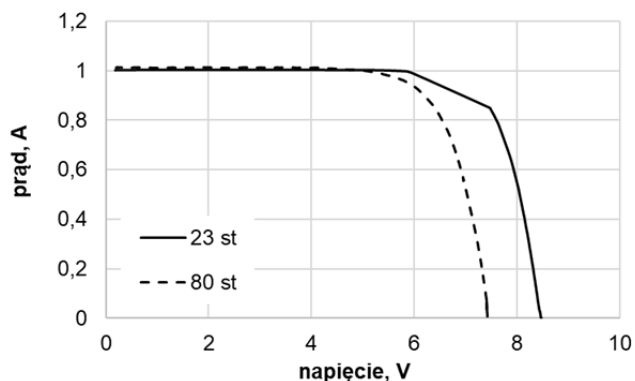
Rys. 11. Fotografia stanowiska pomiarowego wpływu temperatury na parametry napięciowe imitatora PV.



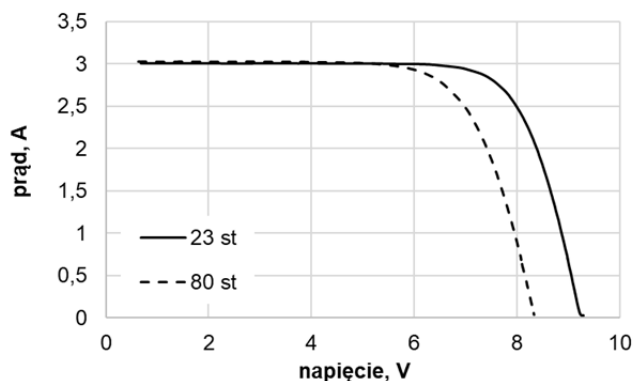
Rys. 12. Wyniki pomiarów dla prądu 0,1 A.



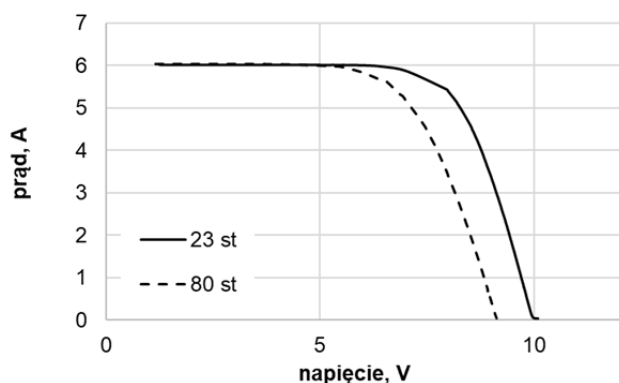
Rys. 13. Wyniki pomiarów dla prądu 0,5 A.



Rys. 14. Wyniki pomiarów dla prądu 1 A.



Rys. 15. Wyniki pomiarów dla prądu 3 A.



Rys. 16. Wyniki pomiarów dla prądu 6 A.

## Wnioski

Otrzymane charakterystyki rzeczywiste stosunkowo dobrze odwzorowują charakterystyki dostępnych obecnie paneli fotowoltaicznych. Zaprojektowany imitator pozwala, przy niskich kosztach wykonania, na symulację zarówno pojedynczego panelu PV, jak i całego stringu szeregowo połączonych paneli, przez co urządzenie może być wykorzystywane w typowych badaniach falowników stosowanych w mikroinstalacjach fotowoltaicznych.

Rozwiązanie takie wykazuje jednak pewną wadę. Zauważyć można istotny wpływ generowanego ciepła na poziomy napięć w charakterystykach zewnętrznych imitatora. Przepływ prądu przez półprzewodnik, skutkuje stratami mocy czynnej, co przy niewielkich rozmiarach diody prostowniczej, wywołuje istotne wzrosty temperatury.

Zjawisko wpływu temperatury na uzyskiwaną generację jest znane i obserwowane w rzeczywistych panelach fotowoltaicznych [3], [4]. Jednakże wpływ ten wywołany jest przede wszystkim temperaturą otoczenia, a nie wzrostem temperatury związanym z pracą układu. Na szczęście ta wada wykonanego imitatora jest prosta do wyeliminowania poprzez zastosowanie pasywnego lub aktywnego chłodzenia diod prostowniczych.

*Budowa imitatora została dofinansowana z Programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza w ramach projektu Project Based Learning.*

**Autorzy:** dr inż. Adam Piłśniak, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, e-mail: [adam.pilśniak@polsl.pl](mailto:adam.pilśniak@polsl.pl); dr inż. Marcin Fice, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, e-mail: [marcin.fice@polsl.pl](mailto:marcin.fice@polsl.pl); dr inż. Krzysztof Sztymelski, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, e-mail: [krzysztof.sztymelski@polsl.pl](mailto:krzysztof.sztymelski@polsl.pl).

## LITERATURA

- [1] Horowitz P., Hill W., Sztuka elektroniki, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ (2020)
- [2] Krac E., Górecki K., Modelowanie ogniw fotowoltaicznych w programie SPICE, *Przegląd Elektrotechniczny*, 97 (2021), nr 5, 6-10
- [3] Matuszczyk P., Poptłowski T., Flaszka J., Wpływ natężenia promieniowania słonecznego i temperatury modułu na wybrane parametry i moc znamionową paneli fotowoltaicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 12, 159-162
- [4] Krac E., Górecki K., Wpływ wybranych parametrów pogodowych na charakterystyki paneli fotowoltaicznych, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania*, 57, (2016), nr 5, 40-43
- [5] <https://www.amt.pl/pl/prt/cty/symulatory-pv>
- [6] <https://saving.em.keysight.com/en/used/power-supplies/pv8921a-e195249055677>