



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ CHEMICZNY

LABORATORIUM ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII
Katedra Aparatury i Maszynoznawstwa Chemicznego
Wydział Chemiczny Politechniki Gdańskiej

INSTRUKCJA LABORATORYJNA NR 10-PV

MODUŁ FOTOWOLTAICZNY



1. Cel i zakres ćwiczenia

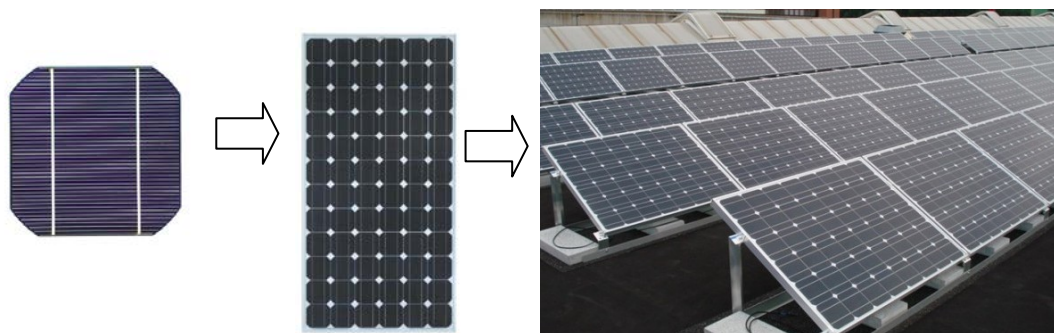
Ćwiczenie ma na celu zapoznanie studentów z następującymi zagadnieniami:

- Pomiar charakterystyki natężeniowo-napięciowej modułu fotowoltaicznego.
- Obliczanie parametrów elektrycznych modułu fotowoltaicznego w warunkach stałego oświetlenia.
- Szeregowe i równoległe łączenie modułów fotowoltaicznych.
- Obliczanie wpływu nachylenia modułu na parametry pracy modułu.

2. Tematyka ćwiczenia

Podstawowym elementem systemu fotowoltaicznego jest ogniwo słoneczne (fotowoltaiczne). Wystawione na działanie promieni słonecznych, jest ono źródłem napięcia stałego.

Ogniwa są grupowane i łączone ze sobą, tworząc moduły fotowoltaiczne. Połączone ze sobą moduły tworzą panele fotowoltaiczne, stanowiące elementy systemu fotowoltaicznego, zwanego również generatorem PV lub pojem modułów (Rysunek 1).



Rysunek 1. Ogniwo fotowoltaiczne – moduł fotowoltaiczny – system fotowoltaiczny

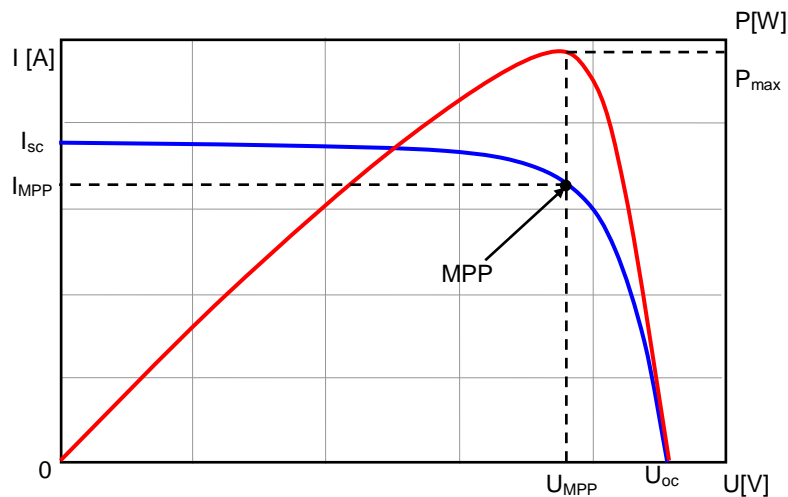
Najistotniejszym elementem systemu fotowoltaicznego jest moduł słoneczny i jego parametry (charakterystyka prądowo-napięciowa, charakterystyka spektralna, sprawność konwersji energii), decydujące o ostatecznym zysku energetycznym.

Ogniwa PV wymagają połączenia, a następnie laminacji w celu ochrony przed uszkodzeniem, gdyż w formie monokrystalicznej stanowią cienkie kruche płytki, a w formie cienkowarstwowej wraz z podłożem sztywną (w przypadku podłoża szklanego) cienką płytę lub elastyczną folię.

Proces laminacji zależy od technologii wytwarzania danego typu ogniwa i od rodzaju zastosowania modułu. Połączenia muszą zapewnić dobre przewodzenie i niezawodność na długi czas, niezależnie od możliwych wahań temperatury i innych czynników klimatycznych, które mogą wpływać na ich działanie. W zależności od liczby połączonych w module ogniw, rodzaju połączenia (szeregowe, równoległe, szeregowo-równoległe) otrzymuje się inne parametry elektryczne modułu. W praktycznych zastosowaniach istotne są także wymiary modułu i jego ciężar.

Charakterystyka prądowo-napięciowa modułu PV jest to wykres natężenia prądu wyjściowego generatora fotowoltaicznego w funkcji napięcia przy określonej temperaturze i natężeniu promieniowania. Charakterystyczne punkty charakterystyki $I(U)$ zaznaczono na Rysunku 2:

1. napięcie otwartego obwodu (U_{oc}) – jest to napięcie na końcówkach nieobciążonego (otwartego) generatora fotowoltaicznego w określonej temperaturze i natężeniu promieniowania,
2. prąd zwarcia (I_{sc}) – jest to natężenie prądu wyjściowego generatora fotowoltaicznego w warunkach zwarcia w określonej temperaturze i przy określonym natężeniu promieniowania,
3. MPP – punkt mocy maksymalnej (ang.: *Maximum Power Point*) i odpowiadające mu współrzędne: U_{MPP} i I_{MPP} .



Rysunek 2.2 Charakterystyka prądowo- napięciowa modułu oraz generowana moc elektryczna w funkcji napięcia

Punkt maksymalnej mocy. Istotnym parametrem w zastosowaniu modułu PV w energetyce fotowoltaicznej jest maksymalna moc wyjściowa, jaką można uzyskać z modułu na rezystancji obciążenia, R_{opt} , przy której prostokąt pod charakterystyką $I(U)$ posiada maksymalną powierzchnię równą maksymalnej mocy:

$$P_{MPP} = I_{MPP} \cdot U_{MPP},$$

a punkt przecięcia prostokąta z krzywą $I(U)$ jest w tym przypadku punktem maksymalnej mocy (MPP). Rezystancja obciążenia R w obwodzie ogniwa lub modułu fotowoltaicznego powinna być tak dobrana, by moc w niej wydzielona posiadała wartość maksymalną $P = P_{MPP}$. Punkt MPP (Maximum Power Point) jest to punkt, którego współrzędne I_{MPP} i U_{MPP} tworzą prostokąt o największej możliwej powierzchni pod krzywą $I(U)$.

FF- współczynnik wypełnienia charakterystyki prądowo-napięciowej – to parametr, określający jakość ogniwa/modułu fotowoltaicznego:

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{oc} \cdot I_{sc}},$$

I_{MPP} – wartość natężenia prądu w punkcie maksymalnej mocy,
 U_{MPP} – napięcie, odpowiadające położeniu punktu maksymalnej mocy.

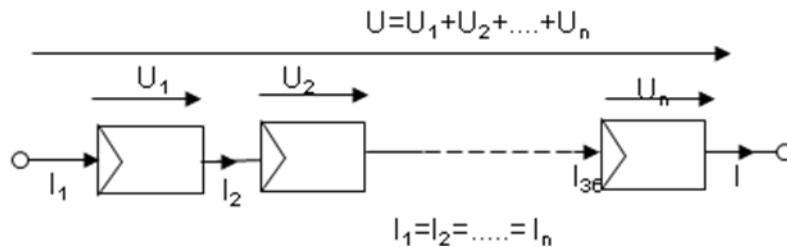
Sprawność konwersji fotowoltaicznej określa, jaka część energii padającego promieniowania zamieniana jest na użyteczną energię elektryczną. Sprawność konwersji fotowoltaicznej ogniwa/modułu fotowoltaicznego η_{PV} można obliczyć na podstawie wartości maksymalnej mocy wyjściowej:

$$\eta_{PV} = \frac{I_{MPP} U_{MPP}}{E \cdot S_C} \cdot 100\% ,$$

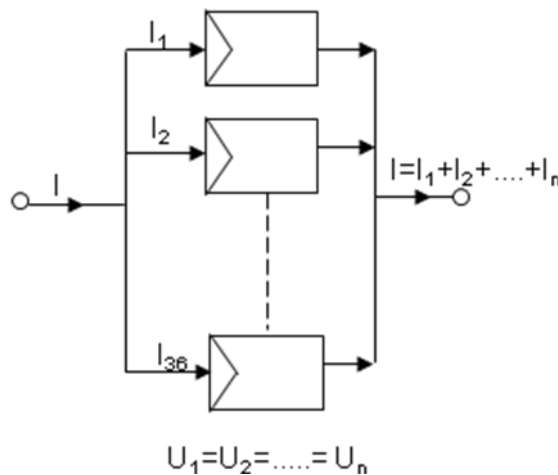
gdzie: S_C – powierzchnia ogniwa/modułu, E - natężenie promieniowania [W/m^2].

Moduły fotowoltaiczne można łączyć szeregowo i równoległe oraz w sposób mieszany.

Przy połączeniu szeregowym prąd płynący przez każde ogniwo łańcucha jest taki sam ($I_1 = I_2 = \dots = I_n$), natomiast napięcia sumują się: $U = n \cdot U_i$ (Rysunek 3 i 4).

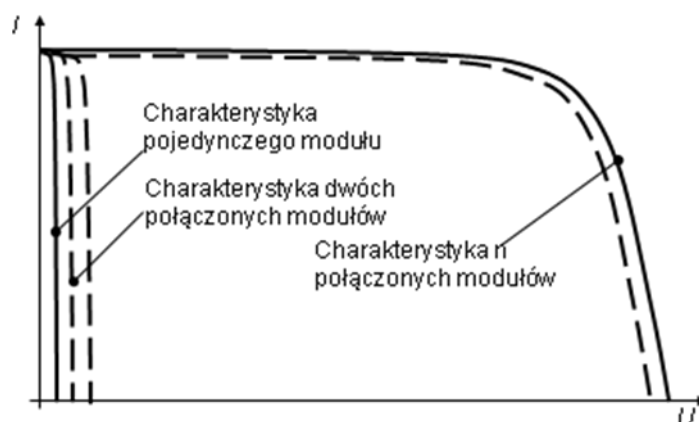


Rysunek 3. Łączenie szeregowo modułów PV w celu uzyskania żądanych parametrów elektrycznych

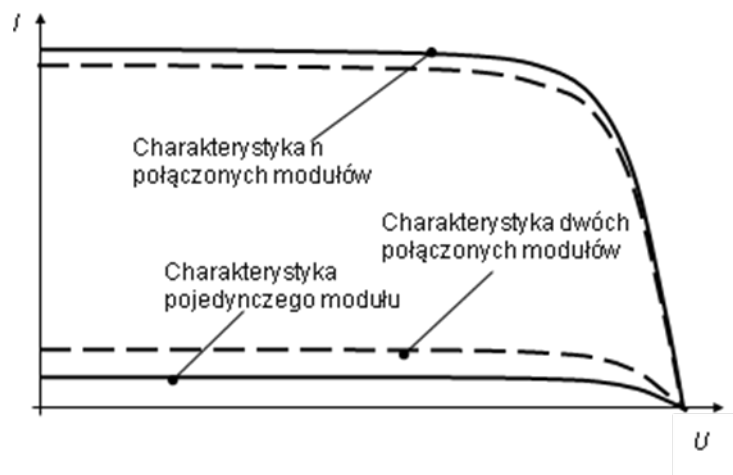


Rysunek 4.3 Łączenie równoległe modułów PV w celu uzyskania żądanych parametrów elektrycznych

Przyłączeniu równoległym generatorów o tej samej wartości napięcia sumuje się natężenia prądów wpływających do węzła $I = n \cdot I_i$ (Rysunek 5. i 6.).



Rysunek 5. Charakterystyka prądowo-napięciowa instalacji, składającej się z n połączonych szeregowo modułów



Rysunek 4. Charakterystyka prądowo-napięciowa instalacji, składającej się z n połączonych równolegle modułów

Zestaw eksperymentów do wykonania w ramach ćwiczenia:

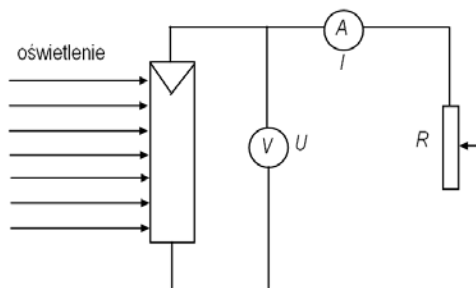
- A. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej I-U, optymalny punkt pracy modułów w podłączeniu szeregowym, wyznaczenie mocy maksymalnej, sprawności konwersji i współczynnika wypełnienia charakterystyki.
- B. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej I-U, optymalny punkt pracy modułów w podłączeniu równoległym, wyznaczenie mocy maksymalnej, sprawności konwersji i współczynnika wypełnienia charakterystyki.
- C. Pomiar krzywej prądowo-napięciowej I-U i wyznaczenie mocy maksymalnej w zależności od kąta pochylenia modułu.

3. Opis stanowiska

3A. Moduły fotowoltaiczne

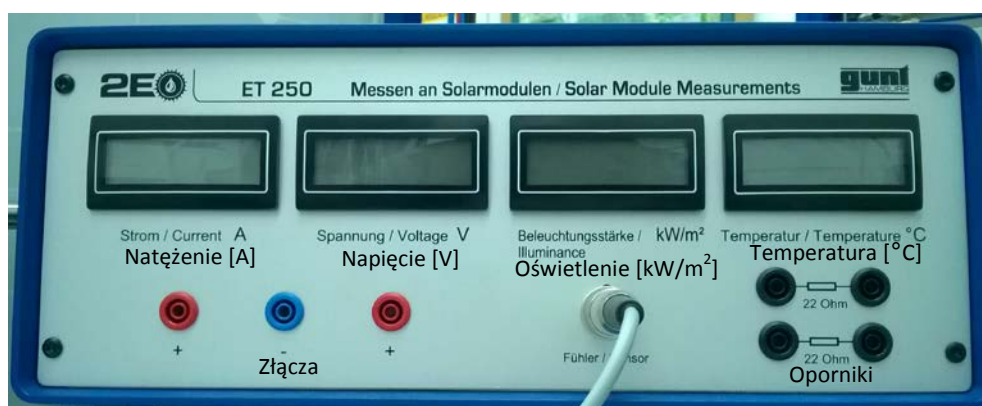
Moduły fotowoltaiczne zamontowane są na uchylnej ramie. Wspornik umożliwia nachylenie w przedziale od 0° do 90° . Kąt można określić precyzyjnie przy pomocy dołączonego inklinometru.

Każdy z zastosowanych modułów składa się z 36 ogniw monokrystalicznych, o łącznej powierzchni $0,557 \text{ m}^2$. Przy braku obciążenia, każde ogniwo wytwarza napięcie ok. $0,6 \text{ V}$. W celu zmniejszenia strat związanych z częściowym zacienieniem ogniwa zostały ułożone w dwóch ciągach po 18 ogniw połączonych szeregowo. W razie zakłóceń szereg zostaje ominięty przy pomocy tzw. diody bocznikującej.



3B. Jednostka pomiarowa

Jednostka pomiarowa umożliwia pomiary natężenia (I), napięcia (U) oraz odczytanie wyników pomiaru natężenia promieniowania oraz temperatury modułu. Wszystkie pomiary wymagane do omawianych eksperymentów można odczytać na wyświetlaczu jednostki pomiarowej.



3C. Opornica suwakowa

Opornica w obwodzie pełni funkcję obciążenia zmiennego (R) od 1Ω do 10Ω . Dwa dodatkowe oporniki o oporze 22Ω zostały wbudowane w jednostkę pomiarową.

3D. Czujnik oświetlenia i czujniki temperatury

Czujnik oświetlenia składa się z małego, referencyjnego ogniwa słonecznego o określonej wrażliwości. Czujnik ten umożliwia pomiar padającego aktualnie oświetlenia w rybie ciągłym. Mierzone natężenie promieniowania wyrażone jest na wyświetlaczu jednostki pomiarowej w kW/m^2 . Powierzchnia światłoczuła czujnika leży w jednej płaszczyźnie z modułami.

Czujniki temperatury zostały umieszczone na odwrotnej stronie modułów za pomocą styku termicznego. Czujnik analizuje zależne od temperatury zmiany oporu na podstawie zmian napięcia. Na wyświetlaczu jednostki pomiarowej wartości wyświetlane są w $^\circ\text{C}$.

4. Przebieg ćwiczenia

A. Pomiar krzywej $I-U$, optymalny punkt pracy modułów w podłączeniu szeregowym, wyznaczenie mocy maksymalnej, sprawności konwersji i współczynnika wypełnienia charakterystyki

A1. Podłączyć kable zgodnie ze schematem.

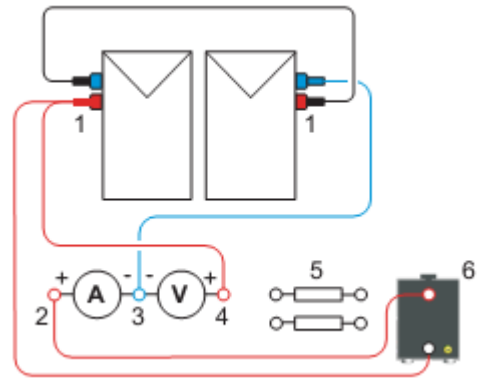
A2. Uruchomić oświetlenie przełącznikiem na skrzynce rozdzielczej urządzenia. Odczytać wartość natężenia promieniowania (pożądana wartość około 1 kW/m^2).

A3. Odczekać około 10 min do ustabilizowania się temperatury modułu na ok. 50°C (temperaturę odczytać na panelu jednostki pomiarowej).

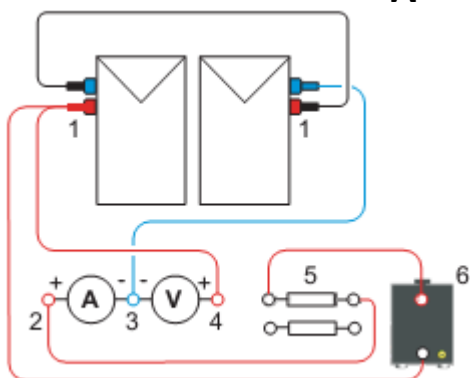
A4. Po ustabilizowaniu temperatury należy wykonać pomiary napięcia i natężenia zmieniając nastawienia opornicy suwakowej. Podczas pomiaru zapisywać temperaturę modułu.

A5. Podłączyć kable zgodnie z nowym schematem A i wykonać pomiar analogicznie do pkt. A4. Następnie podłączyć kable zgodnie ze schematem B i wykonać pomiar analogicznie jak poprzednio.

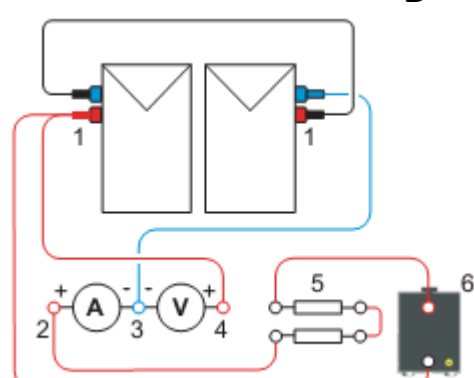
1 – złącza modułów PV;
2-4 – złącza jednostki pomiarowej;
5 – oporniki stałe;
6 – opornica.



A



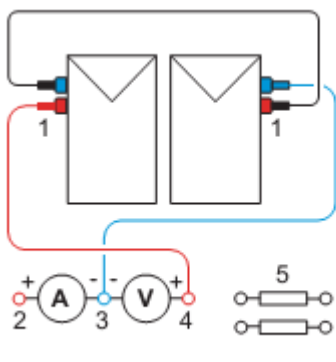
B



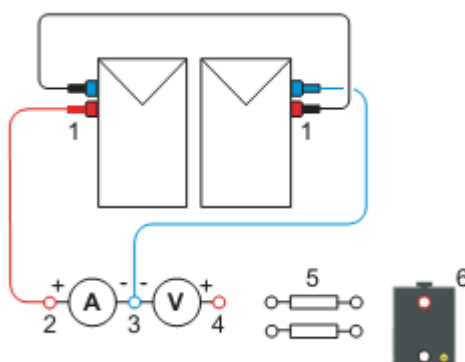
1 – złącza modułów PV;
2-4 – złącza jednostki pomiarowej;
5 – oporniki stałe;
6 – opornica.

A6. Po wykonaniu pomiaru należy zmierzyć napięcie otwartego obwodu oraz prąd zwarcia podłączając układ zgodnie ze schematami.

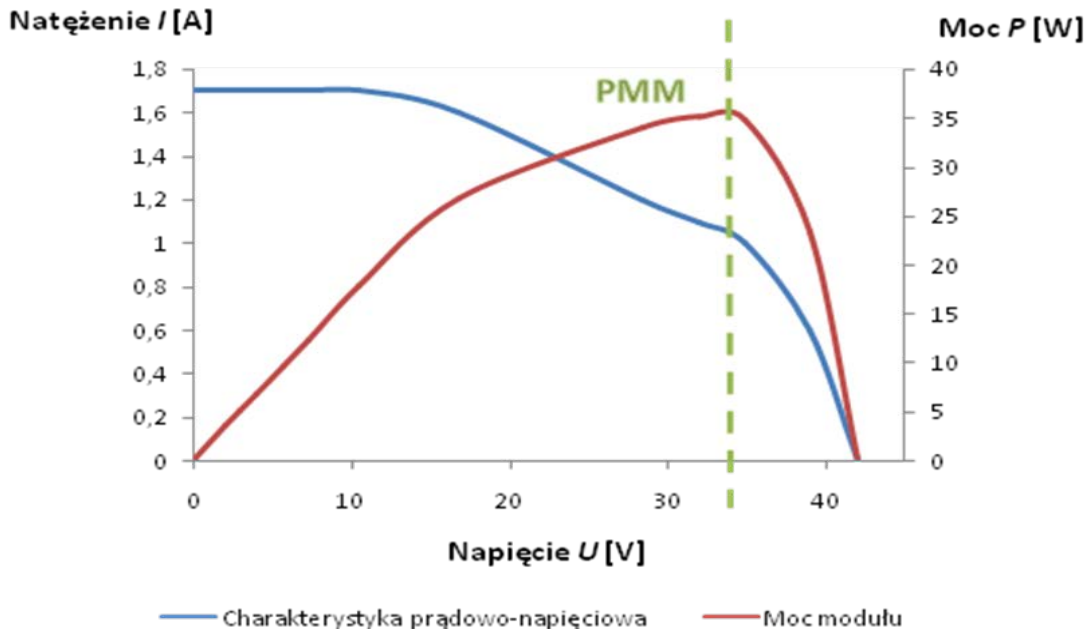
Napięcie otwartego obwodu (U_{oc})



Prąd zwarcia (I_{sc})



A7. Na podstawie otrzymanych wyników sporządzić krzywą charakterystyki prądowo napięciowej, oraz wykres zależności mocy modułu od napięcia.



A8. Wyznaczyć wartości:

- mocy maksymalnej P_{MPP} ,
- sprawności modułowej $\eta = \frac{P_{MPP}}{(E \cdot S)}$,
- oporności optymalnej $R_{opt} = \frac{U_{MPP}}{I_{MPP}}$,
- współczynnik wypełnienia charakterystyki $FF = \frac{P_{MPP}}{(U_{OC} \cdot I_{SC})}$.

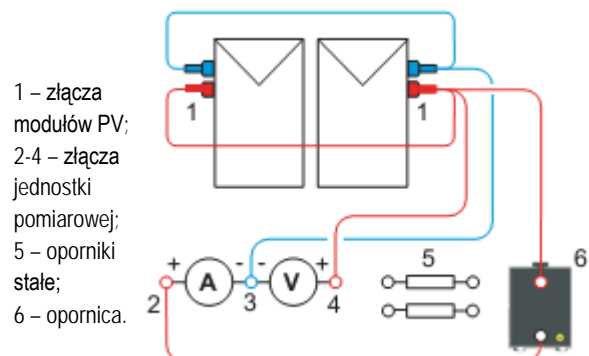
B. Pomiar krzywej $I-U$, optymalny punkt pracy modułów w podłączeniu równoległym, wyznaczenie mocy maksymalnej, sprawności konwersji i współczynnika wypełnienia charakterystyki

B1. Podłączyć kable zgodnie ze schematem.

B2. Uruchomić oświetlenie przełącznikiem na skrzynce rozdzielczej urządzenia. Odczytać wartość natężenia promieniowania (pożądana wartość około 1 kW/m^2).

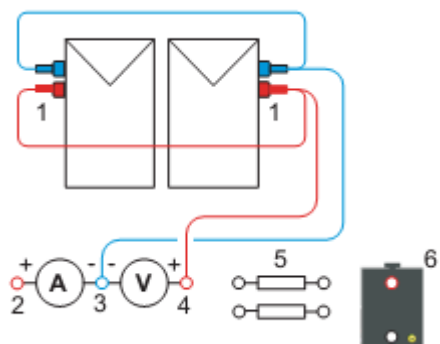
B3. Odczekać około 15 min do ustabilizowania się temperatury modułu (temperaturę odczytać na panelu jednostki pomiarowej).

B4. Po ustabilizowaniu temperatury należy wykonać pomiary napięcia i natężenia zmieniając nastawienia opornicy suwakowej. Podczas pomiaru spisywać temperaturę modułu.

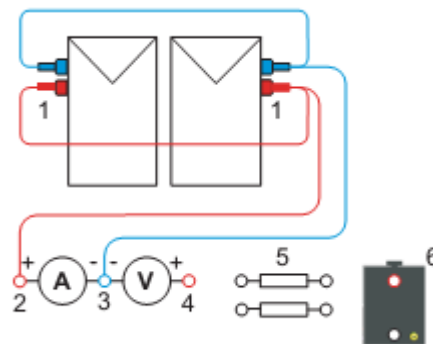


B5. Po wykonaniu pomiaru należy zmierzyć napięcie otwartego obwodu oraz prąd zwarcia, podłączając układ zgodnie ze schematami.

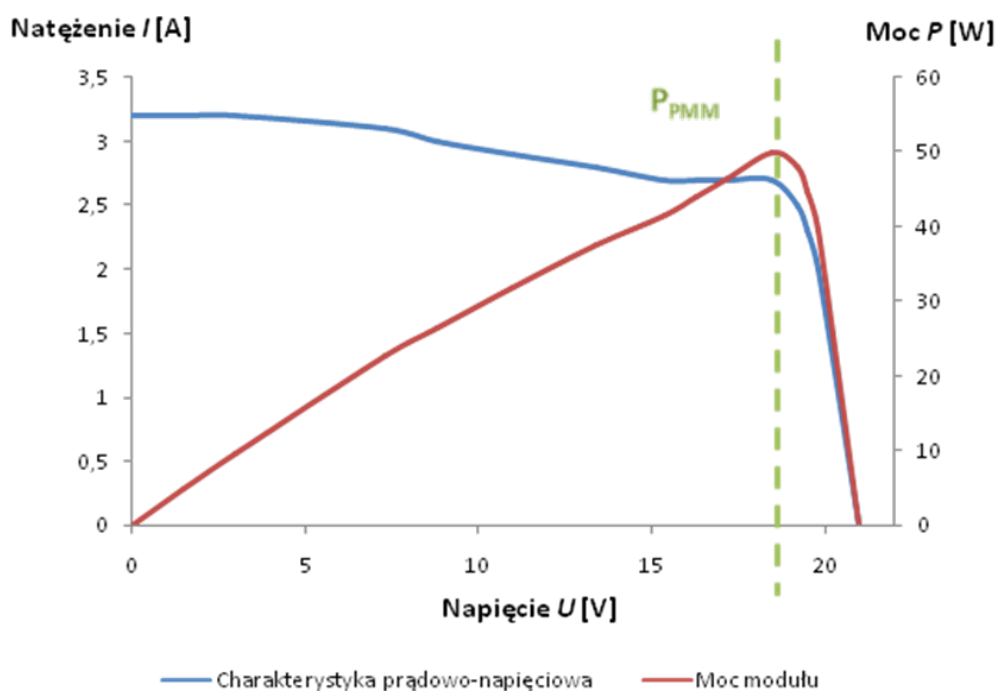
Pomiar napięcia otwartego obwodu (U_{oc})



Pomiar prądu zwarcia (I_{sc})



B6. Na podstawie otrzymanych wyników sporządzić krzywą charakterystyki prądowo napięciowej oraz wykres zależności mocy modułu od napięcia.



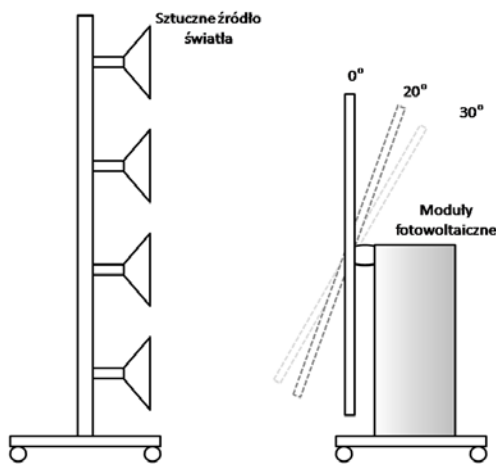
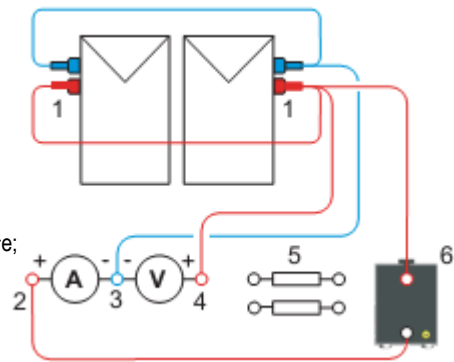
B7. Wyznaczyć wartości:

- mocy maksymalnej P_{MPP} ,
- sprawności modułowej $\eta = \frac{P_{MPP}}{(E \cdot S)}$,
- oporności optymalnej $R_{opt} = \frac{U_{MPP}}{I_{MPP}}$,
- współczynnik wypełnienia charakterystyki $FF = \frac{P_{MPP}}{(U_{oc} \cdot I_{sc})}$.

C. Pomiar krzywej $I-U$ i wyznaczenie mocy maksymalnej w zależności od kąta nachylenia modułu.

- C1. Podłączyć kable zgodnie ze schematem.
 C2. Uruchomić oświetlenie przełącznikiem na skrzynce rozdzielczej urządzenia. Odczytać wartość natężenia promieniowania (pożądana wartość około 1 kW/m^2).
 C3. Ustawić kąt nachylenia modułu na 0° przy pomocy inklinometru. Inklinometr należy umieścić z tyłu modułu, a następnie przy pomocy mocowania nastawy i klucza dostosować kąt nachylenia obserwując wskazania inklinometru.

- 1 – złącza modułów PV;
 2-4 – złącza jednostki pomiarowej;
 5 – oporniki stałe;
 6 – opornica.



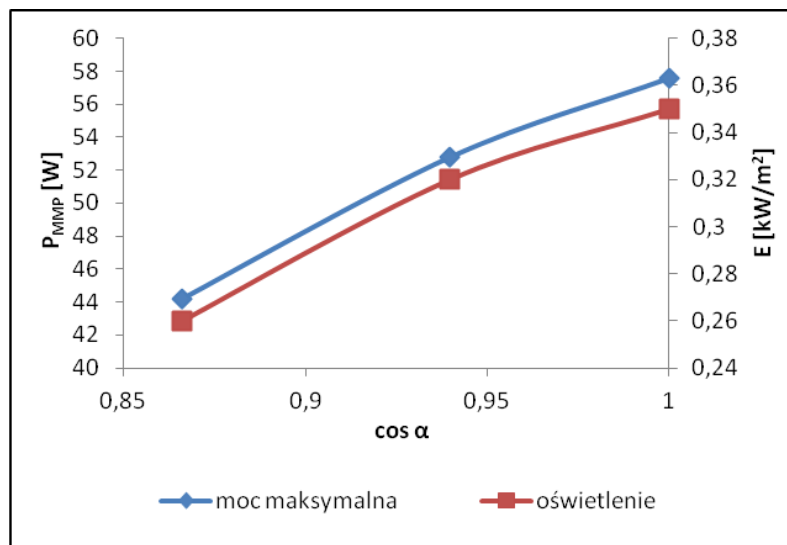
- C4. Odczekać około 15 min do ustabilizowania temperatury modułu (temperaturę odczytać na panelu jednostki pomiarowej).

- C5. Po ustabilizowaniu temperatury należy wykonać pomiary napięcia i natężenia zmieniając nastawienia opornicy suwakowej. Podczas pomiaru kontrolować temperaturę modułu.

- C6. Po wykonaniu pomiaru należy zmierzyć napięcie otwartego obwodu oraz prąd zwarcia podłączając układ zgodnie ze schematami z pkt. B5.

- C7. Po wykonaniu pomiaru należy zmienić kąt nachylenia na 20° i 30° . Pomiar należy wykonać dla obu kątów jak w pkt. B5-B6.

- C8. Na podstawie otrzymanych wyników sporządzić krzywe charakterystyki prądowo napięciowej dla każdego z kątów.



- C9. Wyznaczyć wartości mocy maksymalnej P_{MMP} .

- C10. Narysować wykres zależności mocy maksymalnej modułu od kąta nachylenia i porównać z wykresem spadku mocy obliczonym na podstawie kosinusa kąta.

5. Literatura

- [1] Ewa Klugmann-Radziemska, Fotowoltaika w teorii i praktyce, Wydawnictwo BTC, Warszawa-Legionowo 2009
- [2] Ewa Klugmann-Radziemska, Odnawialne źródła energii - przykłady obliczeniowe, Wydanie V, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2015
- [3] ET 250 Pomiary modułów słonecznych, G.U.N.T. Gerätebau, Barsbüttel, Germany 2015