



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ CHEMICZNY

LABORATORIUM ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

Katedra Aparatury i Maszynoznawstwa Chemicznego

Wydział Chemiczny Politechniki Gdańskiej

INSTRUKCJA LABORATORYJNA NR 9-OS b

BADANIE WPŁYWU CZYNNIKÓW ZEWNĘTRZNYCH NA CHARAKTERYSTYKĘ OGNIW SŁONECZNYCH



1. Cel i zakres ćwiczenia

Ćwiczenie ma na celu zapoznanie studentów z następującymi zagadnieniami:

- Wpływ zmiennych warunków oświetlenia i temperatury na parametry elektryczne pracy ogniw fotowoltaicznych.
- Pomiar charakterystyki natężeniowo-napięciowej ogniw fotowoltaicznych.
- Obliczanie parametrów elektrycznych ogniw fotowoltaicznych w warunkach stałego oświetlenia.
- Straty mocy elektrycznej wywołane zacięciem powierzchni fotoczułej.

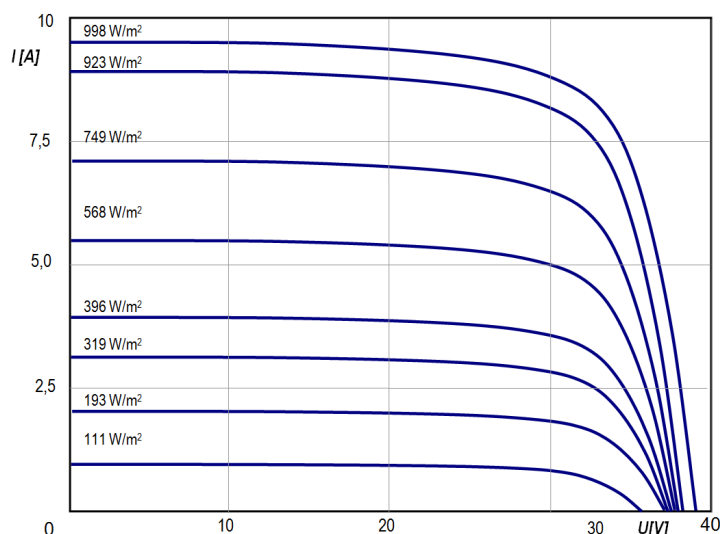
2. Tematyka ćwiczenia

Na przebieg krzywej $I(U)$ i wartość mocy maksymalnej decydujący wpływ ma natężenie promieniowania (Rys. 1.).

Natężenie prądu zwarcia rośnie wprost proporcjonalnie do wzrostu natężenia promieniowania słonecznego.

Sprawność konwersji fotowoltaicznej oblicza się na podstawie charakterystyki prądowo-napięciowej, wyznaczonej w warunkach stałego natężenia promieniowania ze wzoru:

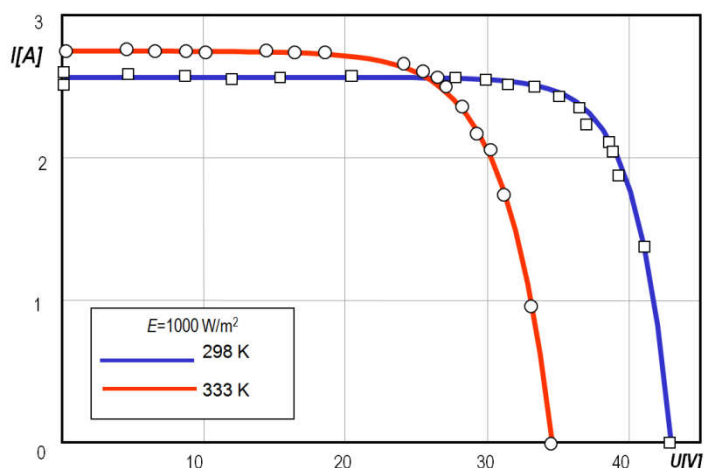
$\eta = P_{MMP}/E \cdot S$, gdzie E - natężenie promieniowania [W/m^2], S - powierzchnia ogniwa/modułu.



Rys. 1. Charakterystyki prądowo-napięciowe instalacji solarnej w różnych warunkach nasłonecznienia

Powierzchnia monokrystalicznych krzemowych ogniw fotowoltaicznych umożliwia prawie 90% absorpcję promieniowania i najwyższą sprawność konwersji fotoelektrycznej spośród ogniw krzemowych.

Temperatura ogniw i modułów podczas pracy jest zależna od wartości natężenia padającego promieniowania, prędkości wiatru, temperatury powietrza, własności termicznych elementów instalacji i może wzrosnąć powyżej $70^{\circ}C$ już przy natężeniu napromieniowania ponad $750 W/m^2$, a $30^{\circ}C$ osiąga typowy zintegrowany z budynkiem system PV umieszczony na dachu już przy temperaturze otoczenia $10,9^{\circ}C$ i natężeniu promieniowania $381 W/m^2$.



Za spadek sprawności ogniw/modułów w temperaturach wysokich odpowiada głównie spadek wartości napięcia otwartego obwodu (Rys. 2.).

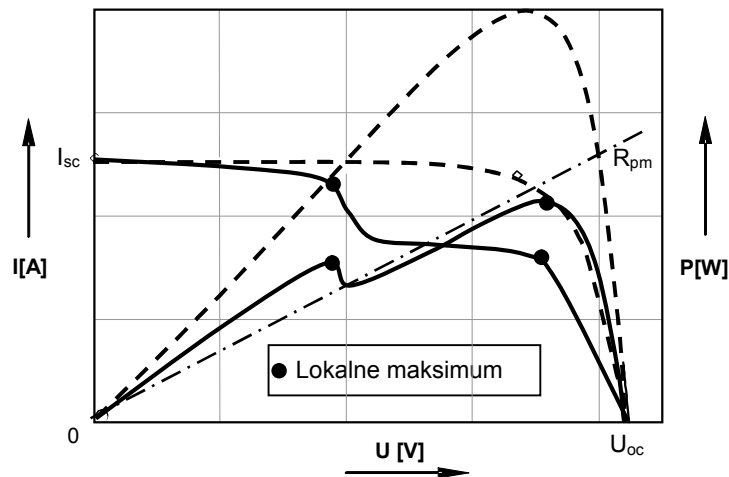
Nieznaczny wzrost prądu zwarcia nie rekompensuje tego spadku i w efekcie wzrostu temperatury ogniw maleje generowana moc elektryczna i sprawność konwersji fotowoltaicznej.

Rys. 2. Wpływ temperatury ogniw na charakterystykę prądowo-napięciową modułu fotowoltaicznego

W warunkach nierównomiernego nasłonecznienia modułu temperatura zacienionego ogniwa może wzrosnąć do takiej wartości, że ulega ono uszkodzeniu i powstaje punkt przegrzania (tzw. *hot spot*). Przyczyną takiego stanu rzeczy jest przepływ prądu w kierunku przeciwnym przez nieoświetlone ogniwo.

Częściowe zacienienie modułu lub instalacji, może być spowodowane przez warunki naturalne takie jak chmury, drzewa, kominy, sąsiednie budynki czy zalegający śnieg.

W przypadku kiedy zacienienie obejmuje zaledwie 2% powierzchni modułu (np. zacienienie obejmuje $\frac{3}{4}$ ogniwa z modułu, składającego się z 36 ogniw), maksymalna moc zostaje zmniejszona o 70%.



Rys. 3. Charakterystyka $I-U$ oraz $I-P$ modułu fotowoltaicznego w warunkach jednolitego i niejednolitego oświetlenia

Zestaw eksperymentów do wykonania w ramach ćwiczenia:

- Pomiary charakterystyk $I-U$ przy różnych natężeniach oświetlenia. Moc i optymalny punkt pracy jako funkcja natężenia oświetlenia
- Pomiary charakterystyk $I-U$ przy różnych temperaturach pracy ogniw słonecznych. Moc i optymalny punkt pracy układu PV jako funkcja temperatury ogniw
- Pomiary charakterystyk $I-U$ przy ogniwach zacienionych.

3. Opis stanowiska

Natężenie oświetlenia, temperatura i obciążenie elektryczne mają bezpośredni wpływ na parametry elektryczne pracy ogniw fotowoltaicznych.

Układ oświetleniowy z regulowanym natężeniem oświetla cztery ogniwa słoneczne, których temperaturę można utrzymywać na stałym poziomie dzięki modułowi Peltiera.

Zastosowanie dołączonego zestawu kabli umożliwia połączenie ogniw szeregowo lub/i równolegle za pomocą tablicy połączeń. Opornik elektryczny o zmiennym obciążeniu, wbudowany w tablicę połączeń umożliwia ręczne obliczenia na podstawie zmierzonej krzywej charakterystyki prądowo-napięciowej. Do każdego ogniwa można przyłączyć równolegle diodę w celu zbadania wpływu zacinienia.

Pomiary krzywej charakterystyki można wykonać automatycznie przy pomocy wbudowanego układu odpływu prądu sterowanego oprogramowaniem i pozwalającego na ciągłe zmiany obciążenia elektrycznego. Do pomiaru natężenia oświetlenia, natężenia prądu, napięcia elektrycznego i temperatury służy układ czujników wraz z oprogramowaniem.

3A. Oświetlenie

Jednostka oświetleniowa zawiera 16 pojedynczych lamp halogenowych do oświetlania ogniw słonecznych. Oświetlenie można regulować za pomocą oprogramowania, wprowadzając określoną wartość wyrażoną w $[W/m^2]$. Po wprowadzeniu wartości należy wyregulować natężenie lampy przy pomocy źródła zasilania jednostki oświetleniowej do momentu osiągnięcia pożądanego oświetlenia. Natężenie oświetlenia jest regulowane w zakresie $200 W/m^2$ - $800 W/m^2$. Jeśli uzyskanie wybranej wartości jest niemożliwe, wyświetlony zostanie komunikat o błędzie.

3B. Ogniwa słoneczne

W układzie ogniw słonecznych znajdują się cztery monokrystaliczne ogniwa. Przód i tył ogniw słonecznych zostały połączone za pomocą powlekanej cyną taśmy miedzianej. Ze styków ogniw słonecznych poprowadzono kable do gniazd tablicy połączeń.

Referencyjne ogniwo słoneczne zamontowano pomiędzy ogniwami. Jego zadaniem jest pomiar natężenia oświetlenia. Wartość mierzona steruje natężeniem lampy.

Przewodząca ciepło podstawa montażowa zapewnia przewodnictwo cieplne pomiędzy ogniwami słonecznymi a zamocowanym poniżej modułem chłodniczym/grzewczym Peltiera, który służy do chłodzenia lub podgrzewania ogniw słonecznych w zależności od zadanej temperatury.

3C. Tablica połączeń

Tablica połączeniowa umożliwia wykonanie różnych połączeń elektrycznych przy użyciu dołączonych kabli. W celu utworzenia połączeń elektrycznych dostępne są kable czerwone i niebieskie o dwóch różnych długościach, jak również wtyczki zwarciove.

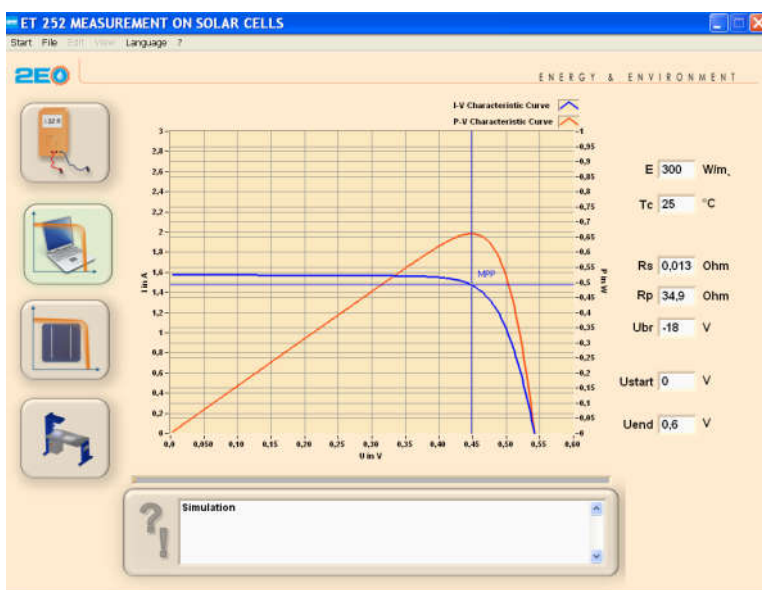
W każdym ogniwie ze styków przednich i tylnych poprowadzono kable do gniazd tablicy połączeniowej.

3D. Jednostka pomiarowa i sterownicza z automatycznym odpływem prądu



Skrzynka rozdzielcza zawiera wszystkie główne komponenty do sterowania i pobierania danych. Podczas pracy nie ma potrzeby jej otwierania.

Wykonanie pomiarów możliwe jedynie po podłączeniu poprzez złącze USB komputera, na którym zainstalowano odpowiednie oprogramowanie. Z przodu skrzynki rozdzielczej znajduje się przełącznik główny jednostki oraz przełączniki jednostki oświetleniowej i modułu Peltiera, które można włączyć tylko raz po uruchomieniu oprogramowania, które służy do sterowania wszystkimi funkcjami urządzenia.

3E. Oprogramowanie



Oprogramowanie pozwala na odczyt wyników i obserwację wykresów oraz prowadzenie symulacji. Ikony, którymi przełączamy funkcje programowe:

-  **Multimetr** - wartości mierzone
-  **Symulacja**
-  **Wykres charakterystyki I-U i P-U**
-  **Przycisk** aktywujący moduł szkoleniowy

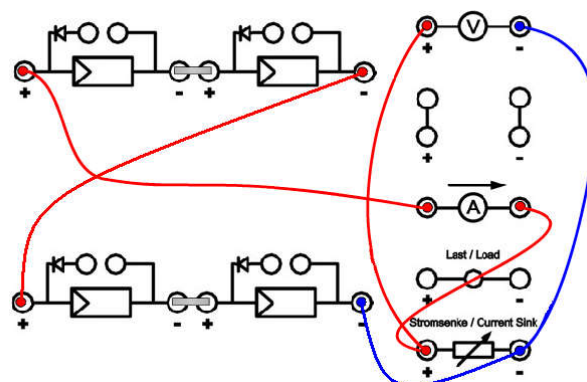
4. Przebieg ćwiczenia

A. Pomiary charakterystyk $I-U$ przy różnych natężeniach oświetlenia. Moc i optymalny punkt pracy jako funkcja natężenia oświetlenia

C1. Wykonać wszystkie połączenia kablowe do pomiarów automatycznych na 4 ogniwach słonecznych połączonych szeregowo.

C2. Wybrać oświetlenie 200 W/m^2 , temperaturę 25°C .

C3. Obserwować krzywą charakterystyki natężeniowo-napięciowej po naciśnięciu ikony **Wykres Charakterystyki** (3 od góry), i powtórzyć pomiar dla 400 W/m^2 i 600 W/m^2 . Zapisać dane w plikach odpowiedniej nazwie (file → save graph) np. IU_szereg_4_200.dat.

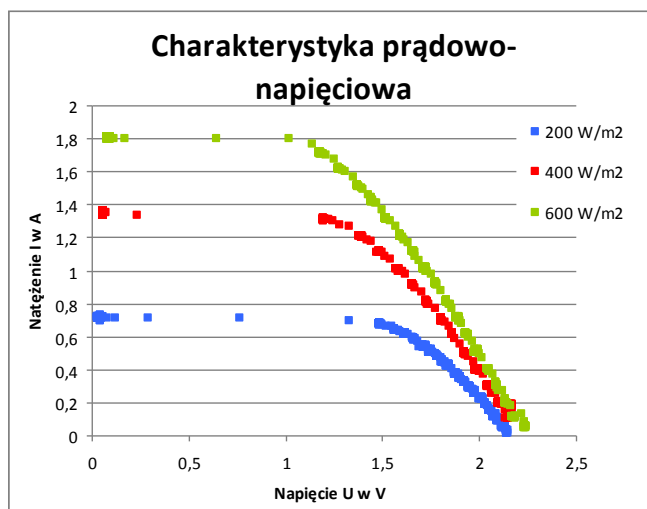


Po zakończeniu pomiaru automatycznego należy w trybie manualnym zmierzyć U_{oc} i I_{sc} (zgodnie z pkt. A4) dla 200 W/m^2 , 400 W/m^2 i 600 W/m^2 .

Rysunek przedstawia wyniki pomiarów dla natężenia prądu zwarcia w funkcji napięcia.

Otrzymane wyniki należy skopiować po zakończeniu ćwiczeń z pliku dat do programu EXEL i stworzyć wykres punktowy przedstawiający krzywe charakterystyki prądowo-napięciowej.

Natężenie prądu zwarcia jest w przybliżeniu proporcjonalne do oświetlenia. Napięcie otwartego obwodu wykazuje mniejszą zależność od oświetlenia.



C4. Analizując wyniki obliczyć moc maksymalną i współczynnik wypełnienia charakterystyki dla różnych wartości natężenia oświetlenia.

	200 W/m^2	400 W/m^2	600 W/m^2
Napięcie otwartego obwodu [V]	2,15	2,2	2,22
Natężenie prądu zwarcia [A]	0,71	1,37	1,83
Maksymalna moc [W]	1,03	1,7	2,12
Współczynnik wypełnienia [%]	67	56	52

C5. Sformułować wnioski.

Jak wynika z analizy tabeli, współczynnik wypełnienia spada wraz ze wzrastającym oświetleniem. Efekt ten można wyjaśnić rosnącym wpływem opornika szeregowego.

B. Pomiary charakterystyk $I-U$ przy różnych temperaturach pracy ogniw słonecznych. Moc i optymalny punkt pracy układu PV jako funkcja temperatury ogniw

Nacisnąć ikonę multimetru (1 od góry).

D1. Wykonać wszystkie połączenia zgodnie z rysunkiem.

Wybrać oświetlenie 1000 W/m^2 i temperaturę 60°C .
Odczekać do osiągnięcia temperatury 55°C .

D2. Zmniejszyć oświetlenie do 250 W/m^2 i zanotować pierwszą krzywą charakterystyki $I-U$ po wystawieniu ogniw słonecznych na działanie temperatury 55°C przez ok. 5 minut.

D3. Zmniejszyć nastawę temperatury ogniw o 5°C .

D4. Zapisać kolejną krzywą charakterystyki $I-U$ nie wcześniej niż 2 minuty po osiągnięciu nastawy.

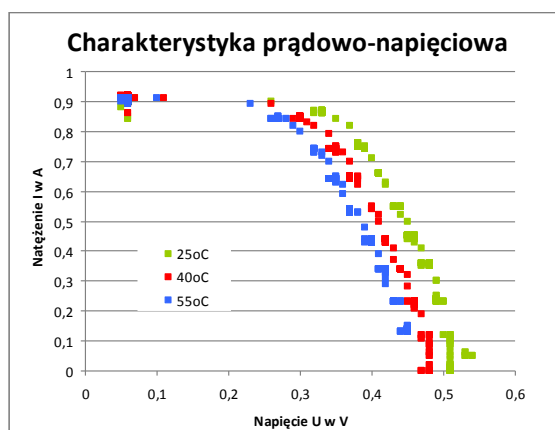
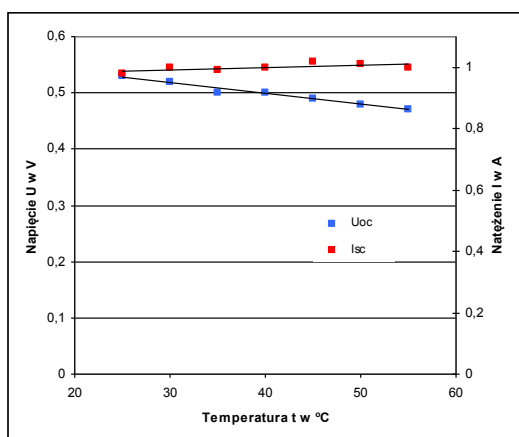
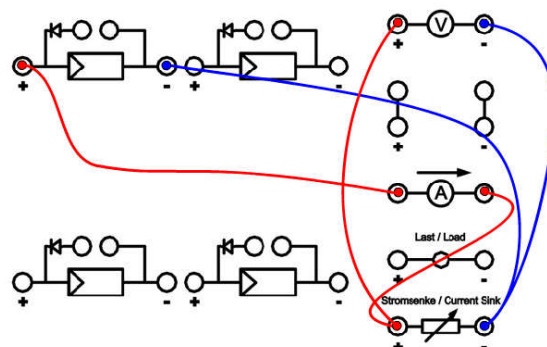
Podczas chłodzenia należy w trybie manualnym zmierzyć U_{oc} i I_{sc} (zgodnie z pkt. A4) dla każdej temperatury.

D5. Powtórzyć punkty D3 i D4 do osiągnięcia temperatury 25°C .

Zapisać dane w plikach odpowiedniej nazwie (file → save graph) np. IU_55.

Otrzymane wyniki należy skopiować po zakończeniu ćwiczeń z pliku dat do programu EXEL i stworzyć wykres punktowy przedstawiający krzywe charakterystyki prądowo-napięciowej.

D6. Wyniki przedstawić na wykresach.



Wniosek: Obserwuje się niewielki wzrost natężenia prądu zwarcia i znaczny spadek napięcia otwartego obwodu.

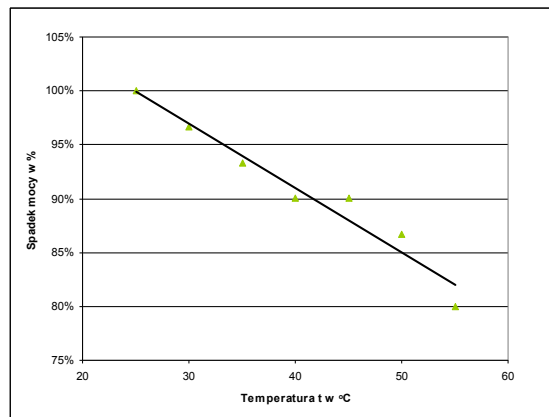
D7. W celu przedstawienia zależności maksymalnej mocy $PMPP$ ogniwa słonecznego od temperatury wykreślić procentowy spadek mocy w funkcji temperatury, przy czym przyjąć moc ogniwa słonecznego jako 100% w temperaturze 25°C jako wartość referencyjną.

D8. Obliczyć liniowy współczynnik temperaturowy maksymalnej mocy wyjściowej (TC) [%/K] z równania:

$$TC = \frac{1}{P_{\max}} \cdot \frac{dP_{\max}}{dT}$$

Na przykład:

$$TC = -0,65 \text{ [%/K]}$$



C. Pomiary charakterystyk $I-U$ przy ogniwach zaciemionych.

E1. Połączyć szeregowo 4 ogniwa słoneczne i aktywować wszystkie diody bocznikowe poprzez włożenie wtyczki zwarciowej.

E2. Nastawę sterowania temperaturą modułu Peltiera ustawić na 25°C . Ustawić oświetlenie na 200 W/m^2 .

E3. Zapisać krzywą charakterystyki $I-U$ ogniw niezaciemionych (file \rightarrow save graph).

E4. Powtórzyć pomiar po usunięciu wtyczki zwarciowej, co powoduje dezaktywację jednej z diod bocznikowych.

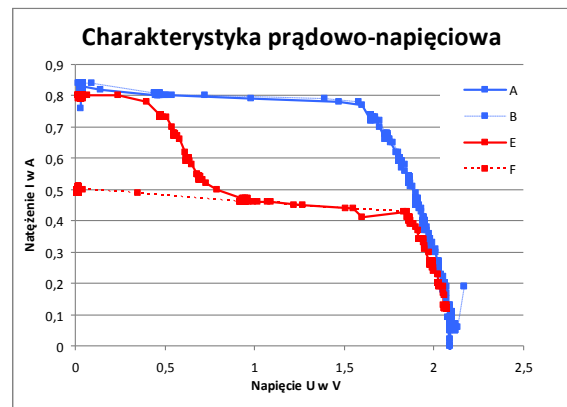
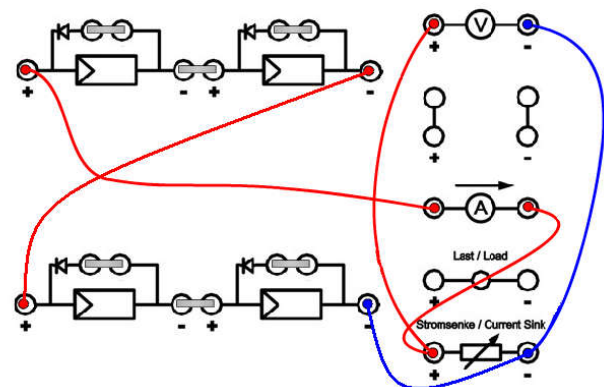
E5. Umieścić najmniejszą pokrywkę na ogniwie słonecznym, którego dioda bocznikowa została uprzednio dezaktywowana na tablicy połączeń. Zaciemnienie powinno objąć około $\frac{1}{4}$ ogniwa.

E6. Zapisać otrzymaną krzywą charakterystyczną $I-U$.

E7. Powtórzyć punkty E5 i E6, stosując większą pokrywkę tak, aby zaciemnienie objęło $\frac{1}{2}$ i $\frac{3}{4}$ powierzchni ogniwa.

E8. Następnie ponownie przyłączyć kabel połączeniowy diody bocznikowej. Powtórzyć pomiary zawarte w punktach E5 i E7 z podłączoną diodą bocznikową.

E9. Zapisać dane w plikach odpowiedniej nazwie (file \rightarrow save graph). Po zakończeniu pomiaru automatycznego należy w trybie manualnym zmierzyć U_{oc} i I_{sc} (zgodnie z pkt. A4)



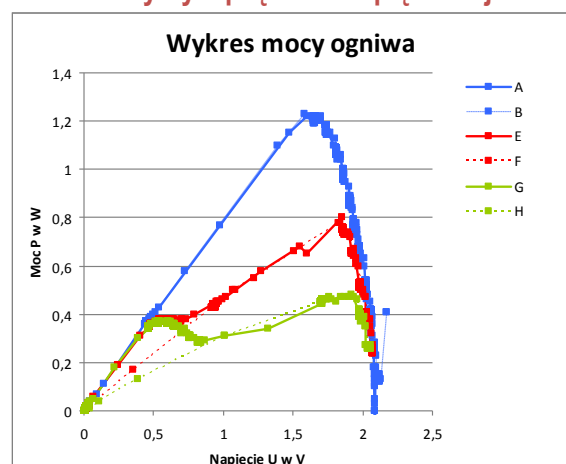
A - Krzywa charakterystyki $I-U$ z diodą bocznikową, brak zaciemnienia
 B - Krzywa charakterystyki $I-U$ bez diody bocznikowej, brak zaciemnienia
 E - Krzywa charakterystyki $I-U$ z diodą bocznikową, zaciemnienie $\frac{1}{2}$ powierzchni ogniwa
 F - Krzywa charakterystyki $I-U$ bez diody bocznikowej, zaciemnienie $\frac{1}{2}$ powierzchni ogniwa

Otrzymane wyniki należy skopiować po zakończeniu ćwiczeń z pliku dat do programu EXEL i stworzyć wykres punktowy przedstawiający krzywe charakterystyki prądowo-napięciowej.

Sporządzić wykresy $I-U$ dla różnych stopni zaciemnienia.

Wniosek: wpływ zaciemnienia połowy ogniwa można zaobserwować na krzywych charakterystyki E i F. Dioda bocznikowa nie dopuszcza, aby prąd płynący w odwrotnym kierunku miał wpływ na zaciemnione ogniwo.

E10. Sporządzić krzywe zależności mocy od napięcia przy różnych stopniach zaciemnienia



A - Krzywa charakterystyki $P-U$ z diodą bocznikową, brak zaciemnienia
 B - Krzywa charakterystyki $P-U$ bez diody bocznikowej, brak zaciemnienia
 E - Krzywa charakterystyki $P-U$ z zaciemnieniem $\frac{1}{2}$ powierzchni ogniwa, z diodą bocznikową
 F - Krzywa charakterystyki $P-U$ z zaciemnieniem $\frac{1}{2}$ powierzchni ogniwa, bez diody bocznikowej
 G - Krzywa charakterystyki $P-U$ z zaciemnieniem $\frac{3}{4}$ powierzchni ogniwa, z diodą bocznikową
 H - Krzywa charakterystyki $P-U$ z zaciemnieniem $\frac{3}{4}$ powierzchni ogniwa, bez diody bocznikowej

Wnioski: obserwuje się spadek mocy elektrycznej wraz ze wzrostem stopnia zacielenia.

W przypadku rzeczywistych systemów fotowoltaicznych wymagane jest śledzenie punktu mocy maksymalnej MPP w celu odróżnienia maksymalnej mocy głównej od istniejących maksymalnych mocy lokalnych na otrzymanej krzywej charakterystyki mocy.

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 252 Pomiary na ogniwach słonecznych, G.U.N.T. Gerätebau, Barsbüttel, Germany 2015