

Ćwiczenie 3

Badania autonomicznego systemu fotowoltaicznego współpracującego z regulatorami ładowania oraz układem zabezpieczającym magazyn energii przed rozładowaniem

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze współpracą elementów fotowoltaicznych z magazynami energii (kondensatorami) i odbiornikami z wykorzystaniem regulatorów ładowania (szeregowego i bocznikowego) oraz modułu zabezpieczającego magazynu energii przed rozładowaniem.

Opis stanowiska pomiarowego

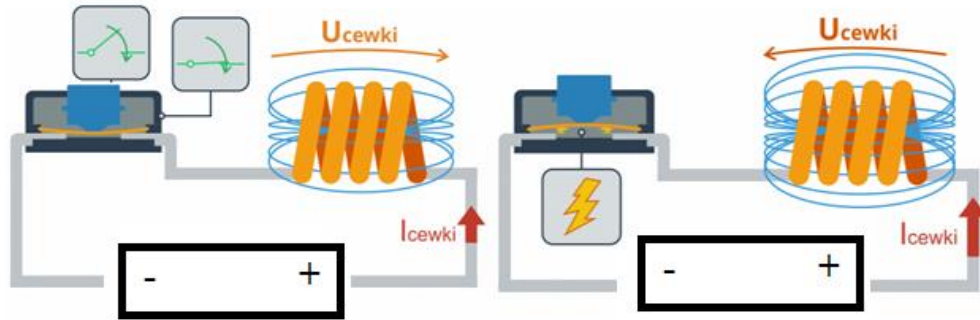
W skład stanowiska do badań zestawu autonomicznego („off-grid”) wchodzi: moduł fotowoltaiczny polikrystaliczny, lampa halogenowa, regulatory ładowania (szeregowy, bocznikowy), magazyn energii - kondensator, odbiornik (układ półprzewodnikowy - dioda elektroluminescencyjna, żarówka), układ zabezpieczający przed głębokim rozładowaniem, przewody łączeniowe, mierniki uniwersalne.

Przed przystąpieniem do badań wszystkie elementy powinny znajdować się w odpowiednich miejscach podstawy stanowiska, które wskazuje prowadzący zajęcia. Nie należy rozpoczynać pomiarów bez sprawdzenia poprawności połączeń przez prowadzącego zajęcia.

Wiadomości teoretyczne

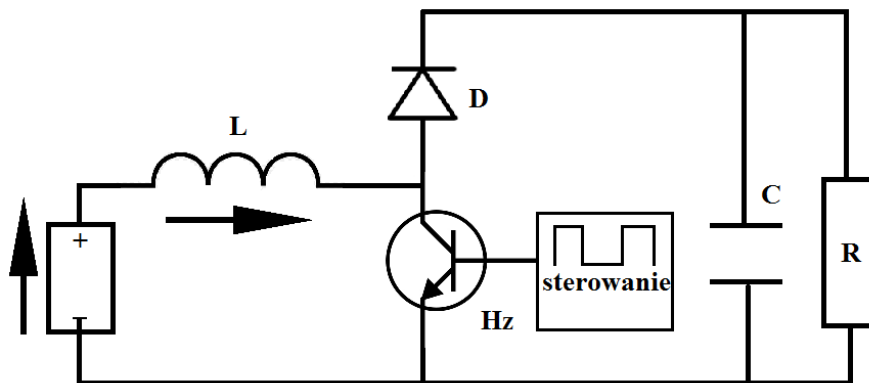
Regulator ładowania to urządzenie elektryczne/elektromechaniczne umożliwiające zasilanie odbiorników energii elektrycznej z układów, których parametry prądowo - napięciowe nie spełniają warunków bezpośredniego połączenia stron zasilanie - odbiornik. Zadaniem układu jest zmiana wartości natężenia prądu i napięcia elektrycznego w sposób odpowiadający wymaganiom zasilanego odbiornika, z możliwie najmniejszymi stratami.

Podstawą działania przetwornic impulsowych jest zjawisko samoindukcji w elementach indukcyjnych. Przerwanie obwodu elektrycznego uniemożliwia przepływ prądu elektrycznego przez dotychczasowe elementy obwodu. Zgromadzona w polu magnetycznym cewki energia musi zostać oddana do obwodu elektrycznego, podtrzymując w ten sposób przepływ zanikającego prądu, poprzez indukujące się napięcie na zaciskach elementu. Energia pola magnetycznego zanika i po chwili zanika również napięcie samoindukcji. Przetwornice impulsowe zmieniają, więc napięcie stałe określonej wartości na napięcie stałe o innej wartości (lub biegunowości) za pośrednictwem zmiany napięcia stałego na ciąg impulsów, z których następnie „odzyskuje się” składową stałą.



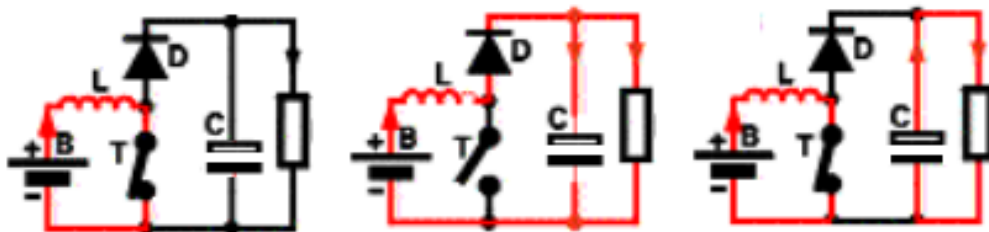
Rys.1. Zjawisko samoindukcji w obwodzie elektrycznym

Praktyczna implementacja zjawiska samoindukcji została przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 2. Zasada działania regulatora napięcia

Możliwe stany pracy regulatora boost przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Stanu pracy regulatora DC/DC

Jeżeli tranzystor zostaje włączony, prąd dławika narasta liniowo do wartości szczytowej (dioda w tym czasie znajduje się w stanie zaporowym). W momencie przerywania obwodu – tranzystor wyłączony - energia pola magnetycznego cewki indukuje SEM o przeciwnym znaku, dioda D zaczyna przewodzić i zgromadzona energia jest przenoszona do obciążenia R. Kondensator C, jako filtr dolnoprzepustowy, ogranicza tętnienia napięcia i podtrzymuje zasilanie w przypadku, gdy obwody składowe są odseparowane – tranzystor załączony. W ten sposób, gdy napięcie źródła zasilania spada poniżej 12 V (dla systemów o napięciu znamionowym 12 V) występuje możliwość takiego sterowania układem, aby odpowiednio sumować napięcia składowe (napięcie zasilania, napięcie samoindukcji). W zależności od sposobu podłączenia cewki występuje możliwość uzyskania układu podwyższającego lub obniżającego napięcie wejściowe.

Tranzystor w układzie pełni rolę klucza (załączony/wyłączony) i może to być tranzystor bipolarny albo MOSFET (ryzyko uszkodzenia klucza wysokim napięciem

samoindukcji, równoległe włączenie diody do elementu kluczującego w celu wytracenia energii). Wymiary cewki wynikają z częstotliwości sterowania układem. Regulacja napięcia polega na zmianie czasu włączenia klucza tranzystorowego (regulacja czasu „ładowania” cewki). Gdy napięcie wyjściowe nadmiernie obniży się, tranzystor będzie włączany na dłużej, ilość przekazywanej energii będzie większa i napięcie wyjściowe podwyższy się do założonego poziomu.

Maksymalny prąd ładowanie zasobnika energii (prąd wyjściowy regulatora) musi być odpowiednio skorelowany z parametrami elektrycznymi magazynu energii.

Sterowanie z wykorzystaniem modulacji szerokości impulsu PWM posiada następujące zalety:

- ✓ możliwość przywrócenia początkowej pojemności akumulatora,
- ✓ większa akceptacja prądu przez akumulator,
- ✓ akumulator można naładować do 90-95% jego pojemności przy 60% dla typowych rozwiązań,
- ✓ niższy wzrost temperatury akumulatora,
- ✓ automatyczne dostosowanie do procesów starzeniowych akumulatora,
- ✓ dłuższa żywotność akumulatora,
- ✓ zmniejszenie częstotliwości odłączania się urządzeń,
- ✓ możliwość zastosowania mniejszej baterii w celu zmniejszenia kosztów,
- ✓ możliwość zmniejszenia rozmiaru systemu.

W przypadku ładowania zasobnika energii w postaci akumulatora kwasowo – ołowiowego napięcie ładowania formowane przez regulator ładowania zmienia się jak na rysunku 4.



Rys.4. Etapy procesu ładowania magazynu energii z wykorzystaniem regulatora ładowania metodą PWM

Gdy napięcie akumulatora znajduje się poniżej zadanego progu „BOOST” (napięcie na celę) regulator ładuje akumulator pełną mocą dostępną z ogniw fotowoltaicznych (ładowanie prądem o dużym natężeniu). Po uzyskaniu przez akumulator napięcia „BOOST” regulator przechodzi do pracy w trybie pulsacyjnym (impulsowe ładowanie przy stałym napięciu). W tej fazie regulator ogranicza moc ładowania tak, aby nie dopuścić do przegrzania akumulatora lub uszkodzenia przez nadmierne nagromadzenie gazu, który powstaje w trakcie intensywnego ładowania (wydzielanie wodoru). Czas trwania trybu jest uzależniony od pojemności akumulatora i występujących warunków zewnętrznych. Po tym czasie regulator przechodzi do fazy doładowania wyrównawczego „FLOAT”. W tej fazie akumulator jest już tylko doładowywany niewielkim prądem w celu podtrzymania stanu naładowania. Poprzez niewielkie podwyższanie napięcia ładowania uzyskuje się wyrównanie pojemności poszczególnych cel oraz przedłuża się żywotność akumulatora.

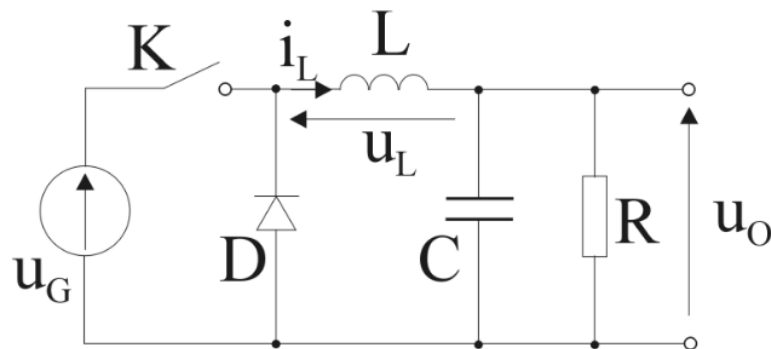
W zależności od typu akumulatora następuje zróżnicowanie dopuszczalnych parametrów ładowania/rozładowania. Wynika to z warunków termicznych pracy urządzenia. Wyróżnia się głównie maksymalny dopuszczalny prąd ładowania i rozładowania oraz górne i dolne napięcie pracy akumulatora. W przypadku, gdy napięcie obwodu otwartego zastosowanego modułu fotowoltaicznego przekracza ~ 20 V (35 V) system jest odpowiednio 12 V lub 24 V. Jest to istotne przy doborze ilości akumulatorów i ich konfiguracji pracy.

W zależności od stanu naładowania/rozładowania akumulatora efektywny proces ładowania PWM powinien przebiegać w różny sposób. Przy silnie rozładowanym zasobniku energii prąd ładowania jest niemal stały (duży współczynnik wypełnienia impulsu). W miarę zbliżania się do stanu naładowania prąd ładowania ma przebieg impulsowy (częste o mniejszej mocy, ale większej amplitudzie, aż do momentu osiągnięcia pełnego naładowania).

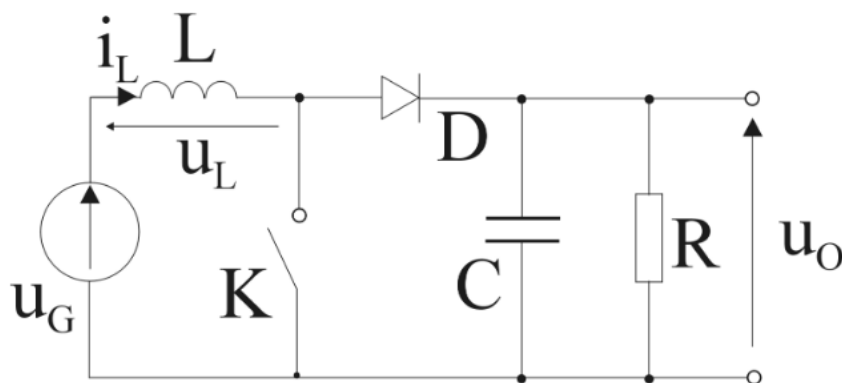
W praktyce najczęściej wykorzystywane są przetwornice typu buck/boost. Wynika to z normalizacji napięć stosowanych akumulatorów. W większości przypadków producenci regulatorów ładowania podają optymalne napięcie zasilania (moduł fotowoltaiczny) na poziomie napięcia akumulatora tj. akumulator 12 V odpowiada modułowi o napięciu U_{oc} ok. $20 - 22$ V. Możliwe jest podłączenie zasilania o większej wartości napięcia. W takim przypadku kontroler ładowania akumulatorów będzie obniżał napięcie zasilania lub podwyższał do poziomu optymalnego dla baterii akumulatorów. Napięcie wejściowe musi jednak przyjmować wartości z określonego zakresu, co wynika z konstrukcji regulatora.

W ogólnym ujęciu wyróżnia się 3 podstawowe typy regulatorów ładowania:

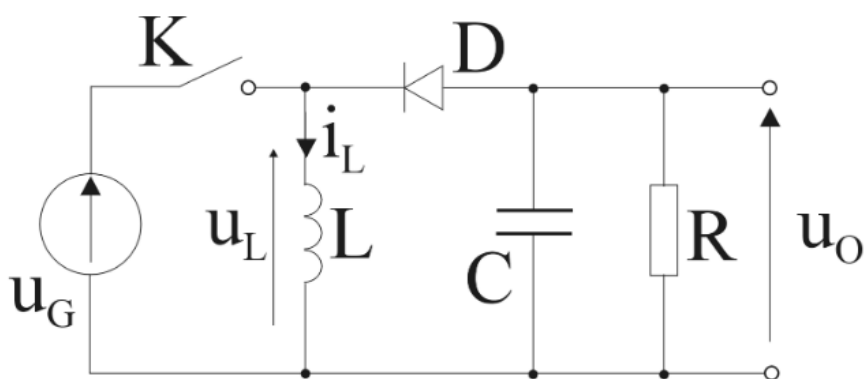
- buck



- boost



- buck/boost

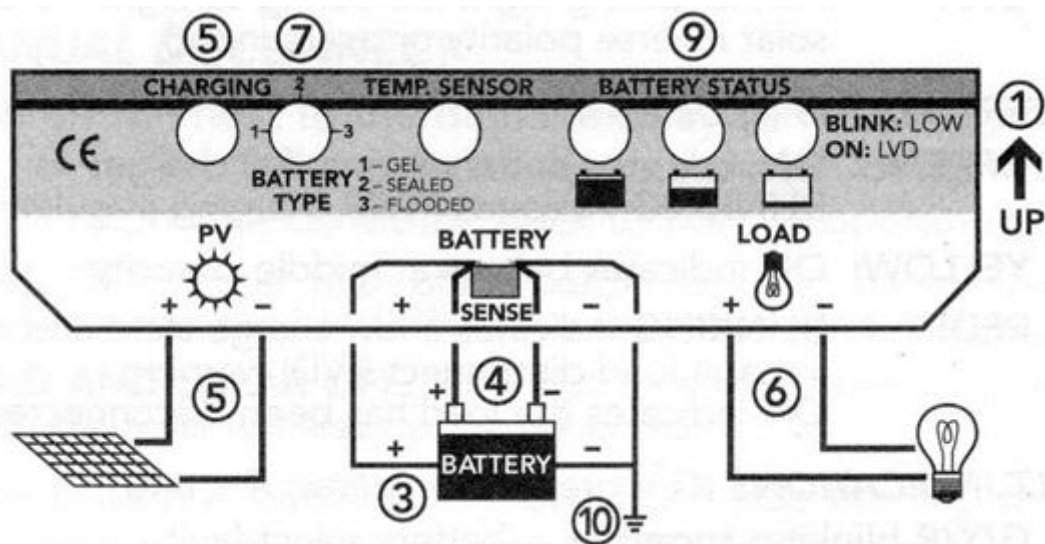


Po zamknięciu łącznika K napięcie zasilania jest przyłożone do indukcyjności L, prąd płynący przez cewkę narasta liniowo. W tym czasie dioda D jest spolaryzowana zaporowo. Odbiornik jest zasilany energią zgromadzoną w kondensatorze C. Dioda D zabezpiecza przed zwarcie kondensatora przez łącznik K. Po otwarciu łącznika prąd w cewce płynie pod wpływem napięcia samoindukcji przez diodę D do obciążenia. Napięcie U_L na indukcyjności L jest stałe i równe napięciu U_o na obciążeniu, co powoduje, że prąd w indukcyjności L maleje liniowo. Biegunowość napięcia wyjściowego U_o jest przeciwna względem napięcia wejściowego U_z . Prąd I_D płynący przez diodę D rozplywa się na dwie składowe: stałą I_o płynącą przez rezystancję obciążenia R_o i zmienną I_C płynącą przez kondensator C.

Stosowanie regulatorów ładowania w systemie fotowoltaicznym ma następujące zalety:

- ✓ poprawia charakterystyki ładowania akumulatora i zabezpiecza przed głębokim rozładowaniem lub przeładowaniem,
- ✓ zabezpieczenie przed tzw. prądem "ciemnym" pobieranym przez moduł PV przy braku oświetlenia (przy braku diody bocznikującej),
- ✓ zabezpieczenie akumulatora przed głębokim rozładowaniem i zasiarczeniem elektrod (min. 11.1 V), proces odłączania odbiornika od akumulatora w celu jego ochrony przed głębokim rozładowaniem, automatyczne załączenie odbiornika, gdy zasobnik zostanie podładowany (ze zwłoką czasową w celu uniknięcia pulsowania napięcia),
- ✓ regulacja spadków napięcia i efektów temperatury w systemach fotowoltaicznych - podczas ładowania akumulatora, na przewodach łączących regulator z akumulatorem występuje spadek napięcia. Jest on zależny od grubości i długości przewodów oraz wartości prądu. Ten spadek może być przyczyną niewłaściwego ładowania. Kompensacja temperatury to korekta parametrów ładowania akumulatora, wynikająca ze zmiany temperatury. Punktem odniesienia jest temperatura 25°C . Kompensacja napięcia wynikająca ze zmiany temperatury wynosi $-5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ na 1 celę. Oznacza to, że dla 12 V akumulatora wynosi ona $-30 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Dla przykładu, przy temperaturze otoczenia 15°C regulator podniesie górne napięcie ładowania o 0,3 V (dla nap. nominalnego 12 V),
- ✓ możliwość równoległego łączenia regulatorów w celu ładowania jednego zestawu akumulatorów,
- ✓ ograniczone generowanie szumów i zakłóceń radiowych.

Optymalna kolejność postępowania przy praktycznym podłączeniu regulatora ładowania do układu (na podstawie instrukcji ruchowej regulatora ProStar firmy Morningstar):



1. Zamontować regulator w pionowej pozycji. Zapewnić swobodny przepływ powietrza chłodzącego.
2. Sprawdzić, czy dopuszczalny prąd modułu PV oraz odbiornika nie przekraczają danych znamionowych regulatora ładowania.
3. W pierwszej kolejności podłączyć akumulator. Układ sterowania regulatora jest zasilany z akumulatora (nie modułu PV), uaktywniają się wyświetlacze (informacja) i aktywny staje się system zabezpieczeń. Należy stosować krótkie przewody między regulatorem i akumulatorem ze względu na spadek napięcia na rezystancji przewodów połączeniowych. Kolejno podłącza się moduł PV i odbiornik energii elektrycznej.
4. Ustawić właściwy typ użytego akumulatora.
5. Wybór napięcia znamionowego 12 V lub 24 V jest dokonywany automatycznie.
6. Dla bezpieczeństwa system fotowoltaiczny powinien być uziemiony.
7. Inne odbiorniki energii elektrycznej należy podłączać bezpośrednio do akumulatora stosując przeznaczone do nich regulatory i systemy zabezpieczeń.

Przebieg ćwiczenia

Eksperyment 1

Badanie regulatora szeregowego oraz bocznikowego w układzie pracy z modułem słonecznym i odbiornikiem

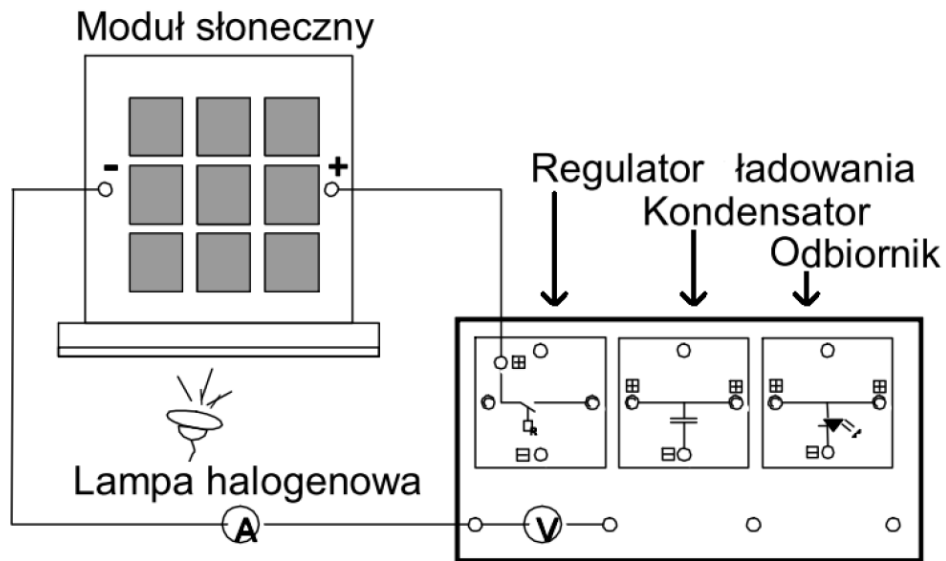
Elementy stanowiska pomiarowego:

- moduł fotowoltaiczny polikrystaliczny,
- lampa halogenowa,
- regulatory ładowania (szeregowy, bocznikowy),
- kondensator,
- odbiornik (układ półprzewodnikowy - dioda elektroluminescencyjna),
- przewody łączeniowe,
- mierniki uniwersalne.

Do badań należy przyjąć następujące ustawienia:

- takie oświetlenie modułu PV, aby wartości początkowe napięcia i prądu były równe odpowiednio: $U_{\text{kondensatora}} \approx 4\text{V}$ oraz $I_{\text{start}} \approx 40\text{mA}$,

- okres między odczytami kolejnych próbek przyjąć 20 sekund.



Rys. Schemat badania regulatora szeregowego oraz bocznikowego w układzie pracy z modułem słonecznym i odbiornikiem

Przebieg eksperymentu:

- po osiągnięciu odpowiednich wartości początkowych prądu i napięcia z oświetlanego modułu PV przystąpić do pomiarów według tabeli 1,
- pomiary wykonywać co 20 sekund, ostatni pomiar zanotować po upływie 600 sekund (10 minut),
- najpierw dokonać pomiarów z zastosowaniem regulatora szeregowego,
- następnie analogicznie (po osiągnięciu wartości początkowych prądu i napięcia – w razie potrzeby kondensator należy rozładować poniżej $U_{\text{kondensatora}} \approx 4V$) wykonać pomiary z regulatorem bocznikowym.

Tabela 1

Zestawienie wyników pomiarów z zastosowaniem różnych regulatorów ładowania

t [s]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]
	Regulator szeregowy		Regulator bocznikowy	
0				
20				
40				
60				
80				
100				
120				
140				
160				
180				
200				
220				
240				
260				

280				
300				
320				
340				
360				
380				
400				
420				
440				
460				
480				
500				
520				
540				
560				
580				
600				

Eksperyment 2

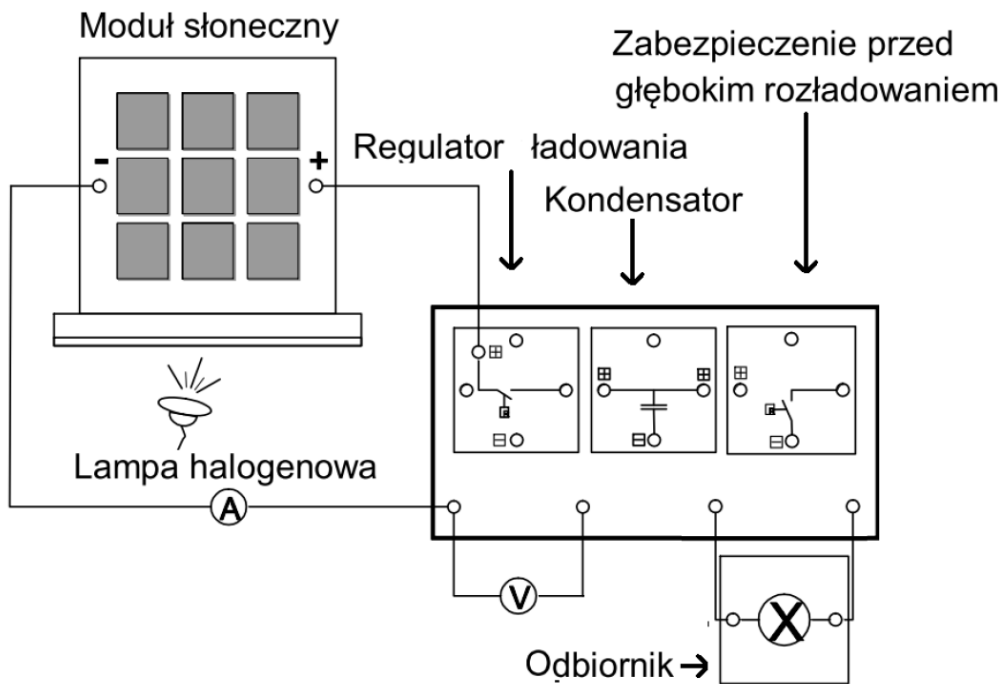
Badanie układu zabezpieczającego kondensator przed głębokim rozładowaniem

Elementy stanowiska pomiarowego:

- moduł fotowoltaiczny polikrystaliczny,
- lampa halogenowa,
- regulator ładowania (szeregowy),
- kondensator,
- odbiornik (żarówka),
- przewody łączeniowe,
- mierniki uniwersalne.

Do badań należy przyjąć następujące ustawienia:

- jako stan początkowy, przy którym należy rozpocząć pomiary oraz oświetlenie modułu PV lampą halogenową, przyjęto wartość napięcia na kondensatorze $U_{\text{kondensatora}} \approx 3V$ (w razie potrzeby kondensator należy rozładować),
- oświetlenie modułu PV analogiczne do eksperymentu 1 z prądem na poziomie $I_{\text{start}} \approx 40mA$ (położenie lampy halogenowej względem modułu PV pozostaje bez zmian),
- okres między odczytami kolejnych próbek przyjąć 10 sekund lub zastosować się do zaleceń prowadzącego zajęcia.



Rys. Schemat badania układu zabezpieczenia przed głębokim rozładowaniem

Przebieg eksperymentu:

- po osiągnięciu odpowiednich wartości początkowych prądu i napięcia z oświetlanego modułu PV przystąpić do pomiarów według tabeli
- pomiary wykonywać, co 10 sekund, ostatni pomiar zanotować po upływie 300 sekund (5 minut),
- najpierw dokonać pomiarów w obwodzie z regulatorem szeregowym bez zabezpieczenia kondensatora przed rozładowaniem,
- następnie analogicznie (po spełnieniu warunków początkowych, m.in. $U_{\text{kondensatora}} \approx 3\text{V}$) wykonać pomiary z układem zabezpieczającym kondensator przed głębokim rozładowaniem.

Tabela

Zestawienie wyników pomiarów bez i z układem zabezpieczającym

t [s]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]
	Bez zabezpieczenia		Z zabezpieczeniem	
0				
10				
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				
100				
110				
120				
130				
140				

150				
160				
170				
180				
190				
200				
210				
220				
230				
240				
250				
260				
270				
280				
290				
300				

Sprawozdanie z przebiegu ćwiczenia

Sprawozdanie z przebiegu ćwiczenia powinno zawierać:

- wyniki pomiarów (zestawić w tabelach),
- charakterystyki napięcia ładowania kondensatora $U = f(t)$ w funkcji czasu (na podstawie tabeli – dla regulatora szeregowego i bocznikowego w jednym układzie współrzędnych),
- charakterystyki prądu ładowania kondensatora $I = f(t)$ w funkcji czasu (na podstawie tabeli – dla regulatora szeregowego i bocznikowego w jednym układzie współrzędnych),
- wyjaśnienie różnic w funkcjonowaniu regulatora szeregowego i bocznikowego,
- charakterystyki napięcia ładowania kondensatora $U = f(t)$ w funkcji czasu (na podstawie tabeli – bez układu zabezpieczającego i z układem zabezpieczającym kondensator przed głębokim rozładowaniem – w jednym układzie współrzędnych),
- określenie roli układu zabezpieczającego kondensator przed głębokim rozładowaniem,
- wnioski i uwagi wynikające z analizy uzyskanych wyników.