



Dokument szkoleniowy Fotowoltaika - Planowanie i wymiarowanie autonomicznych systemów fotowoltaicznych

Dr. Barbara Tomaszewska

(PAS MEERI Krakow - Polska)

Aleksandra Kasztelewicz

(PAS MEERI Krakow - Polska)

Prof. Dr. Michael Hartmann

(SRH Hochschule Berlin – Niemcy)

Ing. Ec. Jürgen Weinreich

(SRH Hochschule Berlin – Niemcy)



Dokument szkoleniowy Fotowoltaika - Planowanie i wymiarowanie autonomicznych systemów fotowoltaicznych

Autonomiczne systemy fotowoltaiczne składają się z

- **Modułów fotowoltaicznych**, które bezpośrednio przekształcają energię słoneczną w energię elektryczną podawaną w **watach (W)**. Moduły pracują przy danym **napięciu U (w voltach)** i dostarczają **prąd elektryczny I (w amperach)**. Relacja pomiędzy tymi wielkościami wynosi **$P = U I$** .
- **Baterii** do przechowywania energii wytwarzanej przez moduły fotowoltaiczne. Pojemność baterii podawana jest w **Ah (amperogodziny)**.
- **Regulatora ładowania** do ochrony akumulatora przed przeładowaniem przez moduły fotowoltaiczne przy silnym świetle słonecznym oraz przed głębokim rozładowaniem przez obciążenia (akumulatory słoneczne ołowiowo-kwasowe nie powinny być rozładowywane powyżej 50%, ponieważ prowadzi to do znacznego zmniejszenia ich żywotności). Moc regulatora ładowania zależy od jego **wartości prądu w amperach (A)**.
- **Falownika** do konwersji prądu 12 VDC (lub wyższych, np. 24 VDC lub 48 VDC) z baterii do 230 VAC. Moc falownika zależy od jego **mocy w watach (W)**.

Opisane niżej kroki pokazują sposób określania wielkości poszczególnych komponentów, tj. odpowiednich, opisanych powyżej parametrów.

Wymiarowanie autonomicznych systemów fotowoltaicznych

A) Przeanalizuj zużycie energii przez wszystkie obciążenia, takie jak lampy, telewizory, itp.

Przykład

Obciążenia	Napięcie U (V)	Prąd stały P _{DC} (W)	Prąd zmienny P _{AC} (W)	Dzienny czas pracy (h)	Dzienne zużycie energii E (Wh/d)
2 diody po 12 W w części mieszkalnej	12 lub 24	2x12 = 24		3	72
1 dioda LED po 12 W w warsztacie	230		1x12 = 12	3	36
Lodówka	230		50		300
Telewizor	230		50	2	100
Pompa wody	230		60	3	180
Laptop	230		50	5	250
Razem		24	222		938

Aby wykonać taki system i zasilić wszystkie odbiorniki o łącznej mocy systemu 24 W + 222 W = 246 W, potrzebne będzie zużycie energii na poziomie 938 Wh.

Obie wielkości w następujący sposób określają niezbędne rozmiary komponentów autonomicznych systemów fotowoltaicznych.

B) Napięcie systemowe i wielkość regulatora ładowania

Standardowe regulatory ładowania pracują przy napięciu 12 V lub 24 V i muszą być dobrane zgodnie z maksymalną wartością prądu w amperach podaną przez

$$I = \frac{P}{U} = \frac{246 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 20.5 \text{ A}$$

jeśli pracujemy przy napięciu 12 V. Na potrzeby rezerwy (zalecane 25%) użylibyśmy regulatora ładowania 30 A przy napięciu 12 V.

Jeśli zdecydujemy się na pracę przy napięciu 24 V, wówczas otrzymamy

$$I = \frac{P}{U} = \frac{246 \text{ W}}{24 \text{ V}} = 10.25 \text{ A}$$

i my możemy dobrać regulator ładowania 15 A przy napięciu 24 V.

Uwaga: W tym przypadku początkowe wymiarowanie regulatora ładowania bazowało wyłącznie na wartości po stronie obciążenia. Na koniec należy sprawdzić tę wartość także po stronie systemu fotowoltaicznego. Obie wartości muszą być mniejsze od znamionowej wartości prądu w amperach dla wybranego regulatora ładowania.

C) Wielkość baterii

Zakładamy średnią głębokość rozładowania na poziomie 50% (DoD = 0,5), ponieważ w przeciwnym razie żywotność baterii uległaby skróceniu. Ponadto należy dodać bufor na dni pochmurne (zwykle 3 dni, współczynnik D = 3). W dalszej kolejności szacujemy pojemność baterii w amperogodzinach (Ah) na podstawie

$$C = \frac{D \times E}{U \times DoD}$$

DoD - głębokość rozładowania (średnio 0,5)

D - liczba rezerwowych dni pochmurnych (w d), zwanych również dniami autonomicznymi

E - zapotrzebowanie na energię (w Wh/d)

U - napięcie (typowe 12 V, 24 V, 48 V)

Przykład:

$$C = \frac{3 \text{ d} \times 938 \text{ Wh/d}}{12 \text{ V} \times 0.5} = 469 \text{ Ah}$$

przy napięciu 12 V. Można użyć np. 4 baterii po 120 Ah i wszystkie połączyć równolegle. (Zalecenie: nie należy podłączać równolegle więcej niż 4 baterii).

Jeśli zdecydujemy się na pracę przy napięciu 24 V, wówczas otrzymamy

$$C = \frac{3 \text{ d} \times 938 \text{ Wh/d}}{24 \text{ V} \times 0.5} = 234.5 \text{ Ah}$$

W tym przypadku można zainstalować dwa połączone równoległe ciągi baterii, które są łączone szeregowo w ramach każdego ciągu.

D) Wymiarowanie falownika:

Wszystkie obciążenia pracujące przy napięciu 230 V muszą być zasilane przez falownik o całkowitej mocy 222 W. Typowa wielkość falownika to 300 W. Dostępne są falowniki dla napięcia wejściowego 12 V_{DC} oraz 24 V_{DC}.

E) Wymiarowanie modułu fotowoltaicznego:

Wielkość modułu fotowoltaicznego jest szacowana według

$$P_{Peak} = \frac{E}{(1 - V_{temp})(1 - V_{sys}) E_{d,0}} = \frac{E}{E_d}$$

gdzie

E - Zapotrzebowanie na energię w kWh

E_{d,0} – Średnie dzienne napromieniowanie słoneczne w kWh dla modułu referencyjnego 1 kWp uzyskanego z bazy danych

V_{temp} – Średnie straty modułu wynikające z efektów temperaturowych (im wyższa temperatura, tym niższa sprawność modułu).

V_{sys} - Całkowite straty systemowe (zwykle 14% = 0,14) obejmujące straty omowe przewodów łączących, straty regulatora ładowania, falownika i baterii oraz potencjalne straty modułów fotowoltaicznych, jeśli nie pracują w architekturze MPP.

W przypadku wartości E_d podanej w drugim wzorze powyżej, wszystkie straty (V_{temp} i V_{sys}) zostały już uwzględnione, tj.

$$E_d = (1 - V_{temp})(1 - V_{sys})E_{d,0}$$

W przypadku korzystania z PVGIS jako bazy danych <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>, straty mogą być podane w macierzy wejściowej (patrz przykład poniżej), natomiast wartość E_d otrzymuje się bezpośrednio z parametru mocy wyjściowej.

Przykład:

Za pomocą PVGIS możemy wybrać regiony w Europie lub Afryce-Azji, aby uzyskać dane dotyczące napromieniowania. W przypadku miasta Tema (Ghana), w sekcji „PV Estimation” po prawej stronie maski wejściowej znajdują się następujące dane wejściowe (patrz widok ekranu poniżej):

- Baza danych promieniowania, jak podano
- Technologia fotowoltaiczna: Krzem krystaliczny
- Zainstalowana moc szczytowa systemu fotowoltaicznego: 1 kWp
- Szacunkowe straty systemowe: 14% (w powyższym wzorze jest to V_{sys})
- Pozycja montażowa: Zintegrowany z budynkiem
- Nachylenie: Optymalne nachylenie

- Opcja śledzenia nie jest brana pod uwagę (pozostawić puste)
- Opcja wyjściowa: Strona internetowa, plik tekstowy lub pdf

Należy pamiętać, że strata temperatury (V_{temp}) jest automatycznie uwzględniana w PVGIS.

Uzyskuje się następujące dane wyjściowe:

Szerokość geograficzna: 5°42'32" północ,
 Długość geograficzna: 0°1'7" wschód
 Moc nominalna systemu fotowoltaicznego: 1 kWp
 Nachylenie modułów: 7 st.
 Orientacja (azymut) modułów: 0 st.

Miesiąc	Kąt stały					
	Ed	Em		Hd	Hm	
1		4,43	137		6,45	200
2		4,34	122		6,37	178
3		4,64	144		6,83	212
4		4,24	127		6,28	188
5		3,87	120		5,58	173
6		3,49	105		4,99	150
7		3,60	112		5,18	161
8		3,82	118		5,51	171
9		4,10	123		5,92	178
10		4,41	137		6,43	199
11		4,34	130		6,31	189
12		4,31	134		6,25	194
Rok	4,13	126		6,01		183

Ed: Średnia dzienna produkcja energii elektrycznej z danego systemu (kWh)

Em: Średnia miesięczna produkcja energii elektrycznej z danego systemu (kWh)

Hd: Średnia dzienna suma natężenia napromieniowania globalnego na metr kwadratowy odebrana przez moduły danego systemu (kWh/m²)

Hm: Średnia suma natężenia napromieniowania globalnego na metr kwadratowy odebrana przez moduły danego systemu (kWh/m²)

PVGIS c) Wspólnoty Europejskie, 2001-2012

W efekcie otrzymujemy średnią roczną wartość promieniowania słonecznego wynoszącą około $E_d = 4,13 \text{ kWh}/(\text{kW}_p \cdot \text{d})$ (patrz żółta liczba w wartościach wyjściowych), co daje dla wskazanej wielkości modułu

$$P_{Peak} = \frac{0.938 \text{ kWh}/d}{4.13 \frac{\text{kWh}}{\text{kW}_p \cdot \text{d}}} = 0.23 \text{ kW}_p$$

Do wyboru mamy np. dwa moduły 130 W_p po 12 VDC , połączone równolegle. Prąd wynosi wtedy $I = 260 \text{ W}_p / 12 \text{ V} = 22 \text{ A}$, co odpowiada podanemu powyżej regulatorowi ładowania [patrz uwaga w pkt. B)].

Możemy zamiennie zastosować jeden moduł 250 W_p dla napięcia 24 V , który również pasuje do wskazanego regulatora ładowania 15 A .

F) Wymiarowanie kabli

Wymiarowanie kabli oznacza określenie odpowiedniego przekroju poprzecznego lub długości, aby zminimalizować straty kabli.

Każdy przewód ma określoną oporność opisaną symbolem R , która utrudnia swobodny przepływ ładunków elektrycznych. Prowadzi to do spadku napięcia wzdłuż przewodu. Jednostką oporu elektrycznego R jest Ohm, symbolizowany przez Ω , który definiuje spadek napięcia (w woltach) przy określonym prądzie 1 ampera :

$$1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

Rezystancja jest ściśle określona dla każdego materiału i zależy od długości L i przekroju poprzecznego A przewodu zgodnie z

$$R = \frac{L \rho}{A}$$

gdzie ρ to tzw. opór właściwy materiału, z którego wykonany jest przewód o długości 1 m i przekroju poprzecznym 1 mm^2 . Wartości standardowe można odczytać w tabelach. W przypadku miedzi lub aluminium, jest to np.

$$\text{Miedź: } \rho_{Cu} = 0.0179 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$$

$$\text{Aluminium: } \rho_{Al} = 0.0294 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$$

Dzięki temu miedź lepiej nadaje się do wykonania przewodów elektrycznych niż aluminium, ponieważ ma mniejszy opór właściwy, co skutkuje wyższą przewodnością. (Przewodność κ jest odwrotnością oporu właściwego, a więc jest to $\kappa_{Cu} = 56 \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2}$ i $\kappa_{Al} = 34 \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2}$). Poniższy przykład przedstawia straty wydajności wynikające z rezystancji w odniesieniu do różnych przekrojów poprzecznych kabli.

Przykład:

Przyjmijmy, że kabel miedziany biegnący od modułu fotowoltaicznego do regulatora ładowania ma długość 5 m. Ponieważ stosujemy przewody „+” i „-”, całkowita długość wyniesie $L = 10m$. W poniższych przykładach przeanalizowano rezystancję i straty napięcia dla dwóch kabli o różnych przekrojach poprzecznych:

a) $A = 1,5 \text{ mm}^2$

$$R = \frac{L \rho}{A} = \frac{10m \times 0.0179 \Omega \text{ mm}^2/m}{1.5 \text{ mm}^2} = 0.12 \Omega$$

Zakładamy, że moduł fotowoltaiczny ma napięcie $U = 12V$ oraz moc $P = 250W$. Daje to prąd równy $I = \frac{P}{U} = \frac{250W}{12V} = 20.8A$

Strata napięcia U_{loss} spowodowana rezystancją wynosi wówczas $U_{\text{loss}} = R \times I = 0.12 \Omega \times 20.8 A = 2.5 V$

Skutkuje to również utratą mocy $P_{\text{loss}} = U_{\text{loss}} \times I = 2.5 V \times 20.8 A = 52 W$, co stanowi około 21% strat mocy w porównaniu do mocy znamionowej (250 W).

b) Teraz przeanalizujemy większy przekrój poprzeczny $A = 6 \text{ mm}^2$

$$R = \frac{L \rho}{A} = \frac{10m \times 0.0179 \Omega \text{ mm}^2/m}{6 \text{ mm}^2} = 0.03 \Omega$$

Powoduje to utratę napięcia $U_{\text{loss}} = R \times I = 0.03V \times 20.8A = 0.624 V$, która skutkuje utratą mocy jedynie o $P_{\text{loss}} = U_{\text{loss}} \times I = 0.624 V \times 20.8A = 13 W$ tj. tylko 5,2%.

Wnioski: Im większy przekrój poprzeczny przewodu, tym niższe napięcie i straty mocy. W praktyce straty mocy powinny być ograniczone do 1-3%.

W efekcie odpowiedni przekrój poprzeczny otrzymujemy z powyższych wzorów

$$A = \frac{L P_{PV} \rho}{0.03 U^2} = \frac{L P_{PV}}{0.03 \kappa U^2} = \frac{L I^2}{0.03 \kappa P_{PV}}$$

P_{PV} - moc znamionowa modułu

U - napięcie znamionowe modułu

I - znamionowe natężenie prądu modułu w amperach

Przykład: $L = 10 \text{ m}$, $P = 250 \text{ W}$, $U = 12 \text{ V}$

$$A = \frac{L P_{PV}}{0.03 \kappa U^2} = \frac{10m \cdot 250W}{0.03 \cdot 56m/\Omega \text{ mm}^2 \cdot 12^2 V^2} = 10 \text{ mm}^2$$

Aby ograniczyć straty kabla do 3%, wymagany jest przekrój poprzeczny 10 mm^2 , jeżeli system pracuje przy napięciu sieciowym 12 V.

Pracując przy napięciu 24 V, otrzymujemy

$$A = \frac{L P_{PV}}{0.03 \kappa U^2}$$

$$= \frac{10m \cdot 250W}{0.03 \cdot 56m/\Omega mm^2 \cdot 24^2 V^2} = 2.6 mm^2$$

Standardowe rozmiary kabli w systemach fotowoltaicznych, to:

0,75 mm²

1,5 mm²

2,5 mm²

4,0 mm²

6,0 mm²

10,0 mm²

16,0 mm²

35,0 mm²

W praktyce poniższe schematy mogą być stosowane odpowiednio dla systemu fotowoltaicznego 12 V lub 24 V, aby określić przekrój poprzeczny kabla.

Zazwyczaj moduły fotowoltaiczne są dostarczane z kablami o przekroju poprzecznym 4 mm² lub 6 mm². Przy zastosowaniu kabli o stałych przekrojach poprzecznych, ich długość od modułów fotowoltaicznych do regulatora ładowania powinna być jak najmniejsza. Można to również oszacować na podstawie powyższego wzoru zgodnie z

$$L = \frac{0.03 A \kappa U^2}{P_{PV}}$$

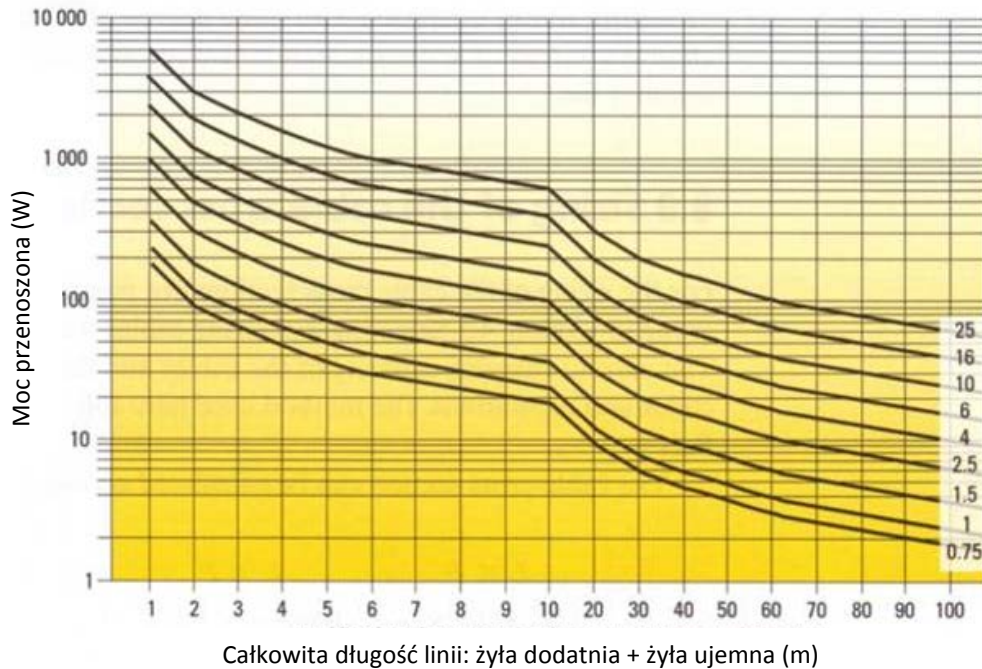
Przykład: Dla kabla o przekroju poprzecznym 4 mm², dostajemy np.

Napięcie systemowe 12 V: L_{max} = 3,8 m

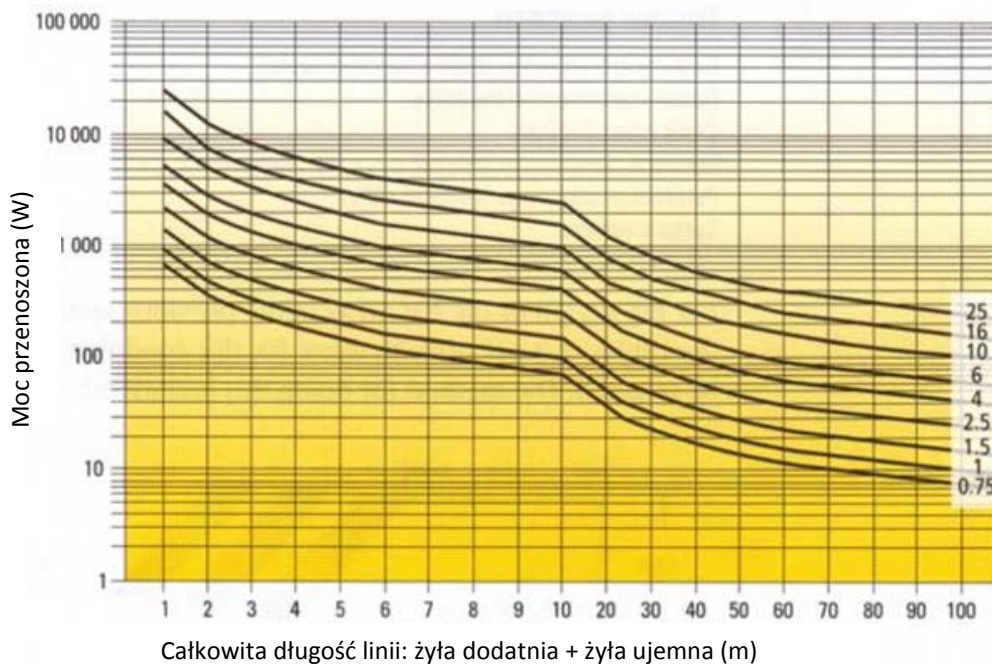
Napięcie systemowe 24 V: L_{max} = 15 m

Z tego względu, jeśli wymagane jest użycie długiego przewodu pomiędzy modułami fotowoltaicznymi i regulatorem ładowania, należy zastosować napięcie systemowe 24 V.

Przekroje poprzeczne przewodów dla systemu 12 V: straty kabli 3%



Przekroje poprzeczne przewodów dla systemu 24 V: straty kabli 3%



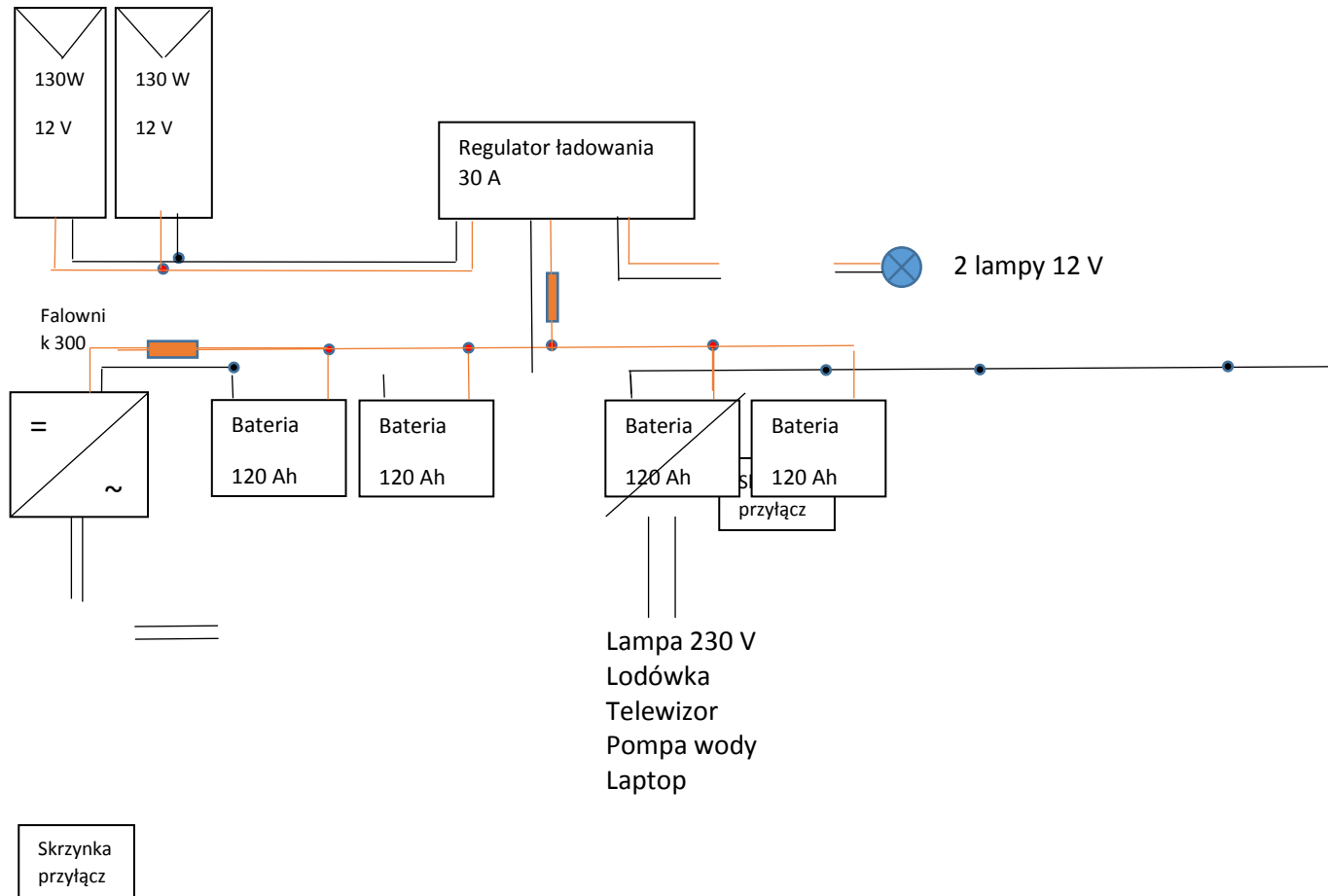
G) Bezpieczniki

Bezpieczniki są stosowane do ochrony systemu przed przetężeniami spowodowanymi awarią działania. Wartość prądu w amperach dla bezpieczników musi być dobrana tak, aby odpowiadała maksymalnemu dopuszczalnemu natężeniu prądu, tj. w naszym przykładzie 30 A dla napięcia systemowego 12 V i 15 A dla napięcia systemowego 24 V.

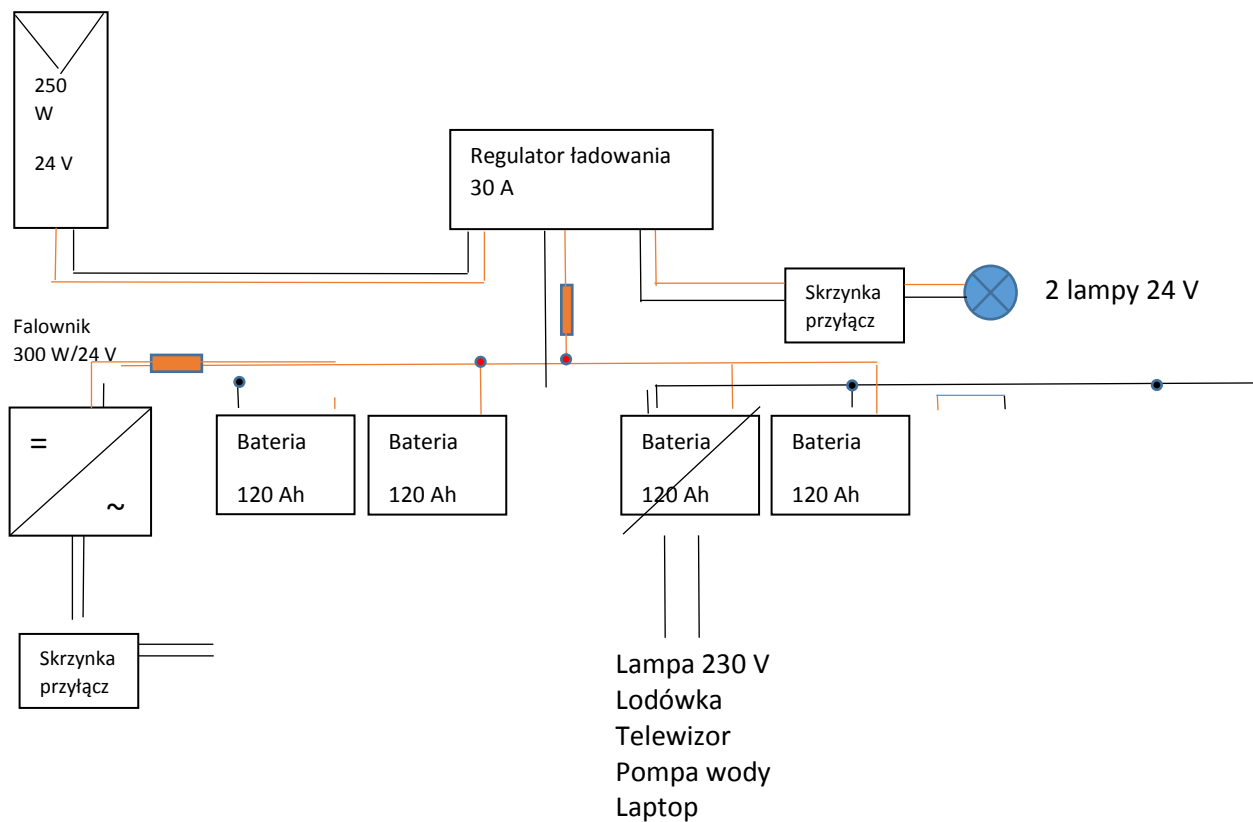
H) Schemat systemu

Przykład:

a) Kompletny autonomiczny system fotowoltaiczny, 12 V



b) Kompletny autonomiczny system fotowoltaiczny, 24 V



B) Napięcie systemowe i wielkość regulatora ładowania

$$I = \frac{P}{U}$$

C) Wielkość baterii

$$C = \frac{D \times E}{U \times DoD}$$

- DoD - głębokość rozładowania (średnio 0,5)
D - liczba rezerwowych dni pochmurnych (w d)
E - zapotrzebowanie na energię (w Wh/d)
U - napięcie (zwykle 12 V, 24 V, 48 V)

D) Wymiarowanie falownika:E) Wymiarowanie modułu fotowoltaicznego:

$$P_{Peak} = \frac{E}{E_d}$$

F) Wymiarowanie kabli

G) Bezpieczniki

H) Schemat systemu