



Fundusze Europejskie  
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita  
Polska

Dofinansowane przez  
Unię Europejską



**NCBR**  
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

# Odnawialne źródła energii

Ćwiczenia projektowe II

## Energia elektryczna

### Ogniwa fotowoltaiczne PV

**Materiały dydaktyczne dla studentów kierunku ELEKTROTECHNIKA**

**Opracował:**

**dr inż. Michał Łanczont**

**Lublin 2025 r.**



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.  
Utwór dostępny jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowe.

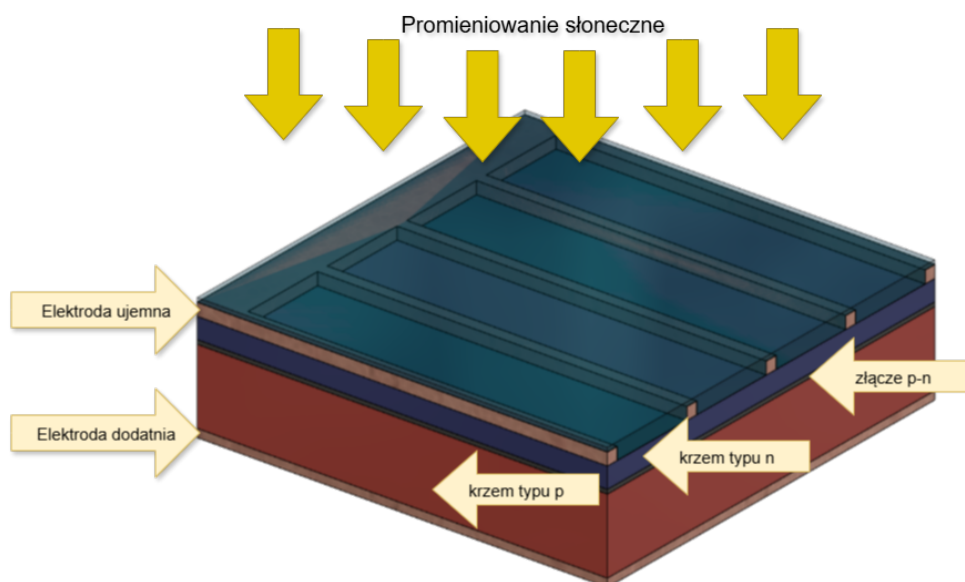
Projekt pn. „*POLLUB zieloną transformację*” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Projektowanie instalacji z ogniwami fotowoltaicznymi stanowi ważny element rozwoju energetyki odnawialnej i poprawy efektywności energetycznej budynków. Celem ćwiczeń projektowych jest nabycie praktycznych umiejętności w zakresie doboru komponentów, obliczania uzysków energii oraz oceny opłacalności inwestycji.

## Wprowadzenie

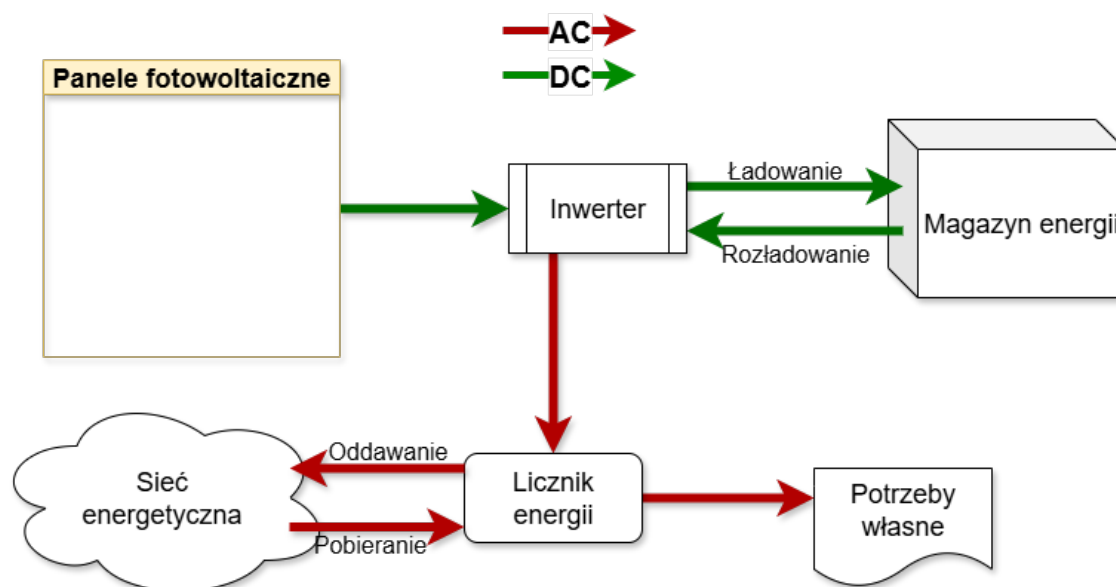
Podstawowym elementem każdej instalacji **PV** jest ogniwo fotowoltaiczne które jest źródłem energii elektrycznej dzięki konwersji promieniowania słonecznego.

Fotoogniwo jest zbudowane z półprzewodnika ze złącem p-n, na które pada światło, jak pokazano na Rys. 1. Padające na złącze fotony o energii większej od szerokości przerwy energetycznej półprzewodnika powodują powstanie par elektron-dziura. Pole elektryczne wewnątrz półprzewodnika, związane z obecnością złącza p-n, przesuwa nośniki różnych rodzajów w przeciwne strony. Elektrony trafiają do obszaru n, dziury do obszaru p. Rozdzielenie nośników ładunku w złączu powoduje powstanie na nim zewnętrznego napięcia elektrycznego



Rysunek 1: Schemat budowy ogniwa **PV**

Instalacja z ogniwami fotowoltaicznymi **PV** zazwyczaj składa się z kilku elementów, podzielonych na obwód stały i zmiennoprądowy, jak pokazano na 2.



Rysunek 2: Uogólniony schemat instalacji fotowoltaicznej

Układ taki składa się z:

1. System paneli fotowoltaicznych - liczba uzależniona od zapotrzebowania na energię elektryczną.
2. System montażowy - układ elementów konstrukcyjnych, opcjonalnie sterujących położeniem paneli na dachu lub powierzchni gruntu.
3. sterownik - układ zarządzający pracą paneli PV, procesem ładowania baterii akumulatorów, zintegrowany z inwerterem konwertującym prąd DC na AC, synchronizujący instalację z siecią
4. bateria akumulatorów - opcjonalna, akumulująca nadmiar energii elektrycznej w dzień i zapewniająca dostęp do energii w czasie gdy panele **PV** nie pracują.
5. obciążenie stało-prądowe, instalacja z elementami zasilanymi prądem DC
6. obciążenie zmiennoprądowe, instalacja z elementami zasilanymi prądem AC
7. licznik energii



## Projekt instalacji PV

Projekt instalacji PV sprowadza się do dobrania poszczególnych elementów systemu tak aby spełniały wymogi założonego zapotrzebowania na energię elektryczną. Proces projektowy składa się z etapów:

1. analiza potrzeb energetycznych
2. ocena warunków lokalnych
3. dobór mocy instalacyjnej
4. dobór paneli PV
5. dobór inwertera (falownika)
6. dobór baterii akumulatorów
7. dobór przewodów łączeniowych

### Analiza potrzeb energetycznych

Analiza potrzeb energetycznych może być przeprowadzona na kilka sposobów. Jeżeli inwestycja jest dla nowo budowanego obiektu lub nie ma wiedzy o historii zużycia energii elektrycznej konieczna jest analiza stylu życia domowników (użytkowników obiektu). Numeryczne wyliczenie potencjalnego zapotrzebowania na energię.

Jeżeli inwestycja jest użytkowana procedura jest znacznie prostsza, analizę można oprzeć na:

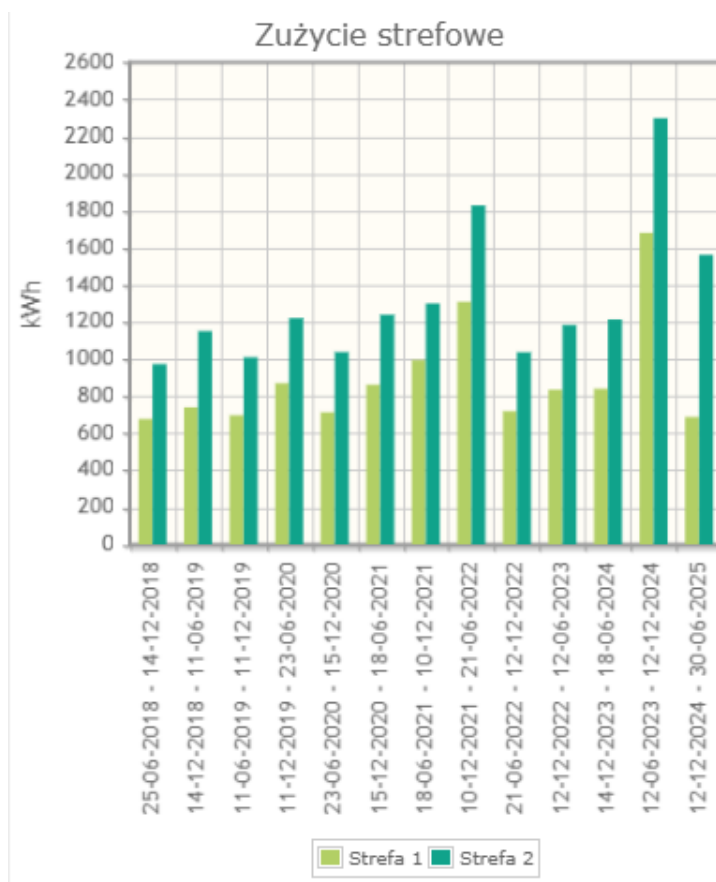
- analizie rachunków na energię, np eBOK PGE, jak pokazano na Rys.3.
- Z licznika energii – inteligentny licznik energii pozwala na uzyskanie danych miesięcznych, dobowych

Ostatecznością może być oparcie się na wartościach statystycznych dostarczanych przez instytucje krajowe czy europejskie, np:

- 1. Główny Urząd Statystyczny (GUS), <https://stat.gov.pl>
  - Roczne zużycie energii elektrycznej w gospodarstwach domowych ( $\frac{kWh}{rok}$ )
  - Zużycie energii w podziale na cele (oświetlenie, gotowanie, ogrzewanie itp.)



- Przekroje regionalne i socjoekonomiczne Przykład dokumentu:
  - Zużycie energii w gospodarstwach domowych – publikacja GUS (wydawana co kilka lat)
  - Rocznik statystyczny energii
  - Urząd Regulacji Energetyki (URE), <https://ure.gov.pl>
  - Statystyki krajowego zużycia energii w grupach taryfowych (np. G11, G12)
  - Informacje o liczbie odbiorców, strukturze zużycia, mikroinstalacjach PV
  - Eurostat – baza danych unijnych, <https://ec.europa.eu/eurostat>
- Dane do porównań międzynarodowych:
- Średnie roczne zużycie energii elektrycznej na gospodarstwo domowe ( $\frac{kWh}{rok}$ )
  - Dane porównawcze dla Polski i innych krajów UE



Rysunek 3: Wykres zużycia energii z panelu klienta eBOK PGE



Przykładowe dane statystyczne zestawiono poniżej:

- Małe gospodarstwo (1–2 osoby): 2000–3000  $\frac{kWh}{rok}$
- Mieszkanie w bloku (2 os.) 1800–2500  $\frac{kWh}{rok}$
- Średnie gospodarstwo (3–4 osoby): 3000–5000  $\frac{kWh}{rok}$
- Dom z pompą ciepła: 6000–12000  $\frac{kWh}{rok}$
- Dom + samochód elektryczny 9000–15000+  $\frac{kWh}{rok}$

Dla przykładowego gospodarstwa z danych pokazanymi na charakterystyce z Rys. 3, po ich analizie można powiedzieć że w latach od 2019 do 2024 średnie roczne zapotrzebowanie wynosiło około 4134  $\frac{kWh}{rok}$ , co pokrywa się ze statystycznym zapotrzebowaniem 4 osobowego gospodarstwa domowego. Wartość tę można zaokrąglić do 4300  $\frac{kWh}{rok}$ .

Należy przyjąć następnie cel stawiany instalacji **PV**, czy ma zapewnić pełne czy częściowe pokrycie zapotrzebowania. Należy ustalić profil zużycia (równomierny, sezonowy, dzienny/nocny). Dla Przykładowego obiektu dane pokazane na Rys.3 pozwalają określić zapotrzebowanie dziennego i nocnego (1712  $\frac{kWh}{rok}$  / 2422  $\frac{kWh}{rok}$ ), co można zaokrąglić do 1800  $\frac{kWh}{rok}$  / 2500  $\frac{kWh}{rok}$ .

## Ocena warunków lokalnych

Warunki lokalne odnoszą się do warunków nasłonecznienia, określenie rocznej sumy promieniowania na powierzchnię  $\frac{kWh}{m^2}$ , kąta nachylenia i azymutu. Procedura przebiega analogicznie jak w przypadku instalacji z kolektorem. Wygodnie jest tu skorzystać z danych dostarczanych przez stronę NOAA - [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/). Dla analizowanej lokalizacji będzie to azymut  $0^{\circ}$  ( $180^{\circ}$ ) z deklinacją  $+7^{\circ}$ , kąt nachylenia między  $35^{\circ}$  a  $45^{\circ}$  z sumą roczną promieniowania  $H = 1348 \frac{kWh}{m^2}$ .





## Dobór mocy instalacji

Na podstawie przeprowadzonej analizy potrzeb energetycznych i oceny warunków lokalnych pozwala określić wymaganą moc instalacji tak aby spełnione były wymagania energetyczne. Moc instalacji określana jest ze wzoru  $P_{PV} = \frac{E_{rok}}{H \cdot \eta_{PR}}$ . W podanej zależności niewiadomą jest sprawność systemu  $\eta_{PR}$ , przyjmuje ona wartość w zakresie od 0.7 do 0.95. Wartość ta jest dobierana jako założenie projektowe na podstawie:

- jakości komponentów,
- warunkach montażu,
- lokalizacji,
- oraz sposobie użytkowania instalacji.

Konieczne jest więc przeanalizowanie poszczególnych elementów systemu i określenie dla nich strat cząstkowych na podstawie określenie sprawności całego układu. Poniżej zestawiono w tabeli 1 typowe zakresy wartości strat związanych z poszczególnymi częściami systemu.

Tabela 1: Przegląd zakresów strat dla elementów systemu PV

Strata	Wartość orientacyjna
Moduły – temperatura	5–10%
Falownik – sprawność	2–5%
Okablowanie DC/AC	1–3%
Zabrudzenie paneli	1–5%
Niedopasowanie modułów	1–2%
Zacienienie (lokalne)	0–15% (lub więcej)
Bateria – ładowanie/rozł.	10–20%

W praktyce w zależności o typu obiektu inwestycji sprawność ta przyjmuje wartości jak pokazano w tabeli 2.

Ze względu na zakładane wykorzystanie magazynu energii do zasilania budynku w czasie gdy moduły PV nie pracują (w nocy) przyjmuje się zakładaną sprawność układu na  $\eta_{PR} = 0.75$ . Na tej podstawie wymagana moc instalacji  $P_{PV}$  wynosi:





Tabela 2: Przegląd zakresów strat dla elementów systemu PV

Typ instalacji	Wartość orientacyjna
Teoretycznie idealna (modelowa)	0,90–0,95
Nowoczesna, dobrze zaprojektowana	0,80–0,88
Zwykła instalacja w Polsce	0,75–0,85
Z magazynem energii	0,70–0,80

$$P_{PV} = \frac{E_{rok}}{H \cdot \eta_{PR}} = \frac{4300}{1348 \cdot 0,75} = 4,25 \text{ kWp}$$

Ze względu na planowaną akumulację energii zaleca się zwiększenie zakładanej mocy instalacji o 10 do 20%, co odpowiada zakresowi od 4.7 do 5.1 kWp. Do dalszych obliczeń przyjęta zostaje wartość 5 kWp.

## Dobór paneli PV

Do określenia liczby paneli PV konieczna jest wyznaczona wcześniej wartość całkowita mocy instalacji  $P_{PV}$  i moc pojedynczego modułu. Parametry wybranych modułów zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3: Zestawienie parametrów wybranych paneli PV

Producent	Model	Wymiary (mm)	Moc (Wp)	$V_{mp}$ (V)
LONGi Solar	Hi-Mo 6 LR5-72HTH-575 Wp	2278 × 1134	575	~43.91
LONGi Solar	Hi-Mo 6 LR5-72HTH-580 Wp	2278 × 1134	580	~44.06
Trina Solar	Vertex S 435 Wp dual-glass	1762 × 1134	435	~43.6
Trina Solar	Vertex S 440 Wp full-black	1762 × 1134	440	~44.0
Trina Solar	Vertex S 425 Wp	1762 × 1134	425	~41.5
LONGi Solar	Hi-Mo 6 LR5-72HTH-570 Wp	2278 × 1134	570	~43.76
LONGi Solar	Hi-Mo 6 LR5-72HTH-565 Wp	2278 × 1134	565	~43.61
LONGi Solar	Hi-Mo 6 LR5-72HTH-560 Wp	2278 × 1134	560	~43.46
Trina Solar	Vertex S 400 Wp	1762 × 1134	400	~40.3-40.7
Trina Solar	Vertex S 420 Wp	1762 × 1134	420	~40.9

Liczba wymaganych modułów liczona jest z zależności  $n = \frac{P_{PV}}{P_{mod}}$ . Wybór modułu do obliczeń podyktowany może być ceną, dostępnością, wymaganiami montażowymi (powierzchnia i rozkład dachu, itp. W analizowany przypadku wybrano moduł LONGi Solar o mocy 560 Wp -  $n = \frac{5000}{560} = 9,93 \simeq 9$  modułów.





## Dobór inwertera -falownika

Inwerter dobiera się tak aby jego moc zawierała się w zakresie od 90 do 110% mocy PV. Co dla przykładowej instalacji odpowiada zakresowi od 4.5 do 5.5 kW. W tabeli 4 zestawiono przykłady komercyjnie dostępnych inwerterów hybrydowych zapewniających współpracę z baterią akumulatorów.

Tabela 4: Zestawienie parametrów wybranych inwerterów hybrydowych

Producent	Model	Moc AC (kW)	$MPPT_{PV}$ (V)	Baterii (V)
Sungrow	SH5K-30	5	ok. 125–560	48 (32–70)
Sungrow	SH10RT (3-faza)	10	200–950	150–600
Sungrow	SH6K RT	6	200–950	150–600
PowMr	SP5K (split-phase)	5	do ~500	48
GoodWe	seria 5 kW hybrid	5	ok. 80–550	zwykle 48
Deye	SUN-8 kW hybrydowy	8	ok. 200–425	typowo 48–60
EG4	18kPV-12LV	12	1800 (maks)	48
Sofar Solar	HYD 5 kW (3-faza)	5	~150–800	48
SolaX	X1-Hybrid 5 kW	5	~125–550	48
Huawei	SUN2000 5KTL-L1	5	90–560	48

Dla dobranej liczby paneli PV (9 sztuk) łączonych szeregowo o mocy 5040 Wp i maksymalnym napięciu na poziomie 392.5 V zastosować można pierwszy model inwertera z tabeli 4. Pozwala on na podpięcie baterii akumulatorów o napięciu roboczym 48 V.

## Dobór baterii akumulatorów

Baterie akumulatorów stosuje się w celu zapewnienia, w miarę możliwości, niezależności energetycznej obiektu. W ciągu dnia budynek zasilany jest z ogniw fotowoltaicznych, a w nocy z baterii akumulatorów naładowanych nadmiarem energii dostarczanej z paneli w ciągu dnia.

Dobór pojemności baterii wymaga analizy potrzeb dziennych i nocnych obiektu. W analizowanym przypadku potrzeby dzienne są na poziomie  $1800 \frac{kWh}{rok}$ , a nocnych 2500





$\frac{kWh}{rok}$ , przy całkowitych wynoszących 4300  $\frac{kWh}{rok}$ . Co pozwala na określenie średniego dziennego zapotrzebowania:

$$\text{dziennie} - \frac{1800}{365} \simeq 4.93 \frac{kWh}{\text{dzień}}$$

$$\text{nocne} - \frac{2500}{365} \simeq 6.85 \frac{kWh}{\text{noc}}$$

W efekcie potrzebny jest magazyn energii na poziomie 7-8 kWh, aby zapewnić zaspokojenie potrzeb własnych w czasie gdy ogniwa fotowoltaiczne nie pracują (wieczór, noc, itd). Można zastosować gotowy magazyn energii spełniający określone wymogi napięcie 48V i pojemność 7-8 kWh, przykładowe zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5: Zestawienie parametrów wybranych magazynów energii

Nazwa magazynu	Napięcie nominalne	Pojemność	Prąd rozładowania
Pylontech US5000 + US2000	51,2V	7,2 kWh	100A
Green Cell PowerNest 48V	51,2V	7,68 kWh	100A
SOK Battery 48V 138Ah	51,2V	7,06 kWh	100A
BYD Battery-Box LVS 7.7	51,2V	7,68 kWh	120A
PGEnergy $LiFePO_4$ 48V 140Ah	51,2V	7,17 kWh	100A

Pierwszy z wymienionych magazynów w pełni spełnia założenia projektowe.

Alternatywnie można zbudować własny w oparciu o pojedyncze ogniwa lub akumulatory.

Pojemność takiego magazynu energii można policzyć z zależności zapisanej poniżej:

$$C = \frac{E_D \cdot n}{V \cdot DoD \cdot \eta}$$

, gdzie:

$E_D$  - nocne zużycie energii

$n$  - liczba dni autonomii - liczba dni(nocy) zasilania jakie magazyn ma zapewnić przy braku doładowania przez system PV

$V$  - napięcie baterii

$DoD$  - poziom dopuszczalnego rozładowania baterii

$\eta$  - sprawność magazynowania





Sprawność akumulatorów typowo mieści się w zakresie 0.9-0.95. W tabeli 6 zestawiono parametry przykładowych akumulatorów stosowanych przy budowie magazynów energii dla instalacji PV.

Tabela 6: Zestawienie parametrów wybranych akumulatorów

Producent	Model	Napięcie (V)	Pojemność (Ah)	DoD (%)
EG4 Electronics	LifePower4 V2	51,2	100	80 %
BigBattery	HUSKY 2	51,2	100	80–90 %
Howell	Power HWE-16F100	51,2	100	100 %
Rich Solar (Alpha5)	48 V 100 Ah	48 / 51,2	100	typ. 80%–90%

Pojemność magazynu energii dla projektowanej instalacji przy założeniu sprawności magazynu  $\eta = 0.95$  i 2 dniach autonomii wynosi:

$$C = \frac{E_D \cdot n}{V \cdot DoD \cdot \eta} = \frac{7000 \cdot 2}{48 \cdot 0.8 \cdot 0.95} = 405.7 \simeq 400 \text{ Ah}$$

W tym przypadku magazyn uzyskujemy poprzez połączenie równoległe akumulatorów o napięciu 48 V i pojemności 100Ah. Do uzyskania pojemności 400Ah potrzeba więc 4 akumulatorów. Nominalnie uzyskamy magazyn energii o mocy  $P = 48 \text{ V} \cdot 400 \text{ Ah} = 19.2 \text{ kWh}$  Przy DoD=80% dostępna moc magazynu to 15.36 kWh.

## Dobór przewodów łączeniowych

Ostatnim elementem projektu jest dobór przewodów łączeniowych dla projektowanej instalacji. Do dobrania są parametry dla dwóch obwodów prądu stałego:

1. obwód z panelami fotowoltaicznymi,
2. obwód z magazynem energii.

W obu przypadkach należy oszacować wymaganą dla danej sekcji długość przewodów. Należy więc zaplanować rozmieszczenie paneli **PV**, inwertera i magazynu energii. Zazwyczaj odległość między inwerterem a panelami PV jest zdecydowanie większa jak





między inwerterem a magazynem energii. Dla przykładowego projektu przyjęto 20 metry dla pierwszego obwodu i 3 metry dla drugiego.

## 1. obwód z panelami **PV**

### Parametry:

Liczba paneli - 9

Moc pojedynczego panelu **PV** -  $P_{PV}=560$  Wp

Napięcie pojedynczego panelu **PV** -  $U=43.46$  V

Długość przewodów -  $L=20$  m

Dopuszczalny spadek napięcia - 1.5 %

Materiał - miedź, przewodność elektryczna miedzi  $\gamma \simeq 56$  [ $\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$ ]

### Obliczenia:

Napięcie całkowite -  $U_c = 9 \cdot 43.46 \simeq 391$  V

Moc łańcucha -  $P = 9 \cdot 560 = 5040$  W

Prąd łańcucha -  $I = \frac{P}{U_c} \simeq 12.9$  A

Dopuszczalny spadek napięcia -  $\Delta U = 0.015 \cdot 391 \simeq 5.9$  V

Pole przekroju przewodu -  $S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\gamma \cdot \Delta U} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 12.9}{56 \cdot 5.9} \simeq 1.56$  mm<sup>2</sup>

W tabeli 7 zestawiono przekroje typowych przewodów stosowanych w instalacjach PV.

Dla projektowanego układu najbliższą wartością jest spełniającą wymogi jest pierwsza pozycja z tabeli 7 o polu przekroju  $S = 2.5$  mm<sup>2</sup> i prądzie  $I=30$  A.

## 2. obwód z magazynem energii

**Magazyn energii** - napięcie znamionowe  $U=51.2$  V i Prąd rozładowania 100 A, zakładana długość przewodów 3 m i dopuszczalny spadek napięcia 1-2%.

### Obliczenia:

Dopuszczalny spadek napięcia -  $\Delta U = 0.02 \cdot 51.2 \simeq 1$  V

Pole przekroju przewodu -  $S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\gamma \cdot \Delta U} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 100}{51.2 \cdot 1} \simeq 10.7$  mm<sup>2</sup>



Tabela 7: Zestawienie parametrów typowych przewodów do instalacji PV

Przekrój ( $mm^2$ )	Prąd ciągły (A)	Typowe zastosowanie
2,5 $mm^2$	do 30 A	Połączenia szeregowo paneli, krótkie odcinki
4 $mm^2$	do 40 A	Łańcuchy PV do inwertera (małe moce, krótka trasa)
6 $mm^2$	do 55 A	DC między stringami a inwerterem (do 3–4 kW)
10 $mm^2$	do 75 A	Dłuższe trasy, większe systemy (5–7 kW)
16 $mm^2$	do 100 A	Połączenie z magazynem energii
25 $mm^2$	do 130 A	Magazyn – inwerter, główne połączenia DC
35 $mm^2$	do 160 A	Duże systemy bateryjne lub równoległe łańcuchy
50 $mm^2$	do 200 A	Systemy bateryjne powyżej 10 kWh
70 $mm^2$	do 250 A	Duże przepływy energii DC
95 $mm^2$	do 300 A	Profesjonalne instalacje przemysłowe
120–240 $mm^2$	do 400–600 A	Szyny bateryjne (rzadziej jako przewody)

Na podstawie danych z tabeli można stwierdzić że przewód o przekroju  $16mm^2$  będzie spełniał zadane wymagania.

**Bateria akumulatorów** - napięcie znamionowe  $U=51.2$  V, pojemność 100Ah, liczba akumulatorów baterii - 4.

#### Obliczenia:

Pojemność sumaryczna:  $4 \cdot 100 = 400Ah$

Energia całkowita:  $51.2 \cdot 400 \simeq 20.5kWh$

Dopuszczalny spadek napięcia:  $\Delta U = 0.02 \cdot 51.2 = 1.024V$

Prąd rozładowania (w ciągu godziny):  $I=400A$

Pole przekroju przewodu -  $S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\gamma \cdot \Delta U} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 400}{56 \cdot 1.024} \simeq 41.8mm^2$

Na podstawie danych z tabeli można stwierdzić że przewód o przekroju  $50mm^2$  będzie spełniał zadane wymagania.

Dla prądów powyżej 150–200 A, producent akumulatorów często zaleca szyny miedziane (busbary) zamiast kabli. Przyjmujemy prąd dopuszczalny na  $1 mm^2$  miedzi w szynie:  $1,3-1,6 \frac{A}{mm^2}$ , dla analizowanego przypadku można przyjąć wartość uśrednioną  $1.4 \frac{A}{mm^2}$ .



Pole przekroju szyny  $A = \frac{I}{1.4} = \frac{400}{1.4} \simeq 285 \text{ mm}^2$  Na podstawie danych z tabeli 8 można zastosować szynę 10 x 30 mm o polu przekroju  $300 \text{ mm}^2$  i prądzie dopuszczalnym do około 600A.

Tabela 8: Zestawienie parametrów typowych szyn do instalacji PV

Przekrój szyny (mm)	Powierzchnia (mm <sup>2</sup> )	Prąd dopuszczalny (A)
5 × 20	100	~250 A
5 × 30	150	~350 A
5 × 40	200	~450 A
10 × 30	300	~600 A
10 × 40	400	~800 A

## Zadanie

Dla zadanej lokalizacji i podanych warunków użytkowania zaprojektować instalację z fotowoltaiczną PV. Dokument projektowy przygotować zgodnie z wytycznymi i wymogami prowadzącego zajęcia.

