

*bryg. dr inż. Waldemar Jaskółowski*

Katedra Podstaw Procesów Spalania, Wybuchu i Gaszenia

Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

*ppłk. w st. spocz. mgr inż. Julian Wiatr*

Rzecznawca-audytora SPE

## **Instalacje fotowoltaiczne.**

### **Podstawy fizyczne działania.**

### **Ochrona odgromowa. Zasady neutralizacji zagrożeń porażenia prądem elektrycznym w czasie pożaru**

#### **Streszczenie**

Wyczerpujące się złoża węgla, stanowiącego podstawowy surowiec kopalny w energetyce, zmuszają do poszukiwania nowych źródeł energii. Od kilku lat odnotowuje się duże zainteresowanie energetyką odnawialną, do której należy zaliczyć również energię słoneczną. W naszym kraju coraz bardziej powszechna jest instalacja paneli fotowoltaicznych, tworzących przydomowe elektrownie słoneczne. Występujące na konstrukcji dachu budynku panele fotowoltaiczne, bardzo pożyteczne w warunkach normalnej eksploatacji, stwarzają duże zagrożenie porażenia prądem elektrycznym ratowników podczas działań ratowniczo-gaśniczych w przypadku powstania pożaru. W celu ochrony ratowników, koniecznym jest zabezpieczenie instalacji fotowoltaicznej przed możliwością porażenia prądem elektrycznym. Ponieważ w panelach fotowoltaicznych generacja energii elektrycznej w dzień odbywa się bez względu na stopień nasłonecznienia, na zaciskach wyjściowych generatora PV pojawia się napięcie o wartości znacznie przekraczającej wartości dopuszczalne długotrwale. W panelach fotowoltaicznych, w odróżnieniu od innych źródeł energii elektrycznej, nie ma możliwości przerwania produkcji energii elektrycznej w dzień. Sytuacja ta spowodowała konieczność poszukania innych rozwiązań, które pomimo ciągłej produkcji energii elektrycznej, umożliwiają obniżenie napięcia do wartości bliskiej zero na zaciskach całej elektrowni lub w poszczególnych panelach stanowiących elementy konstrukcyjne jej generatora.

W artykule przedstawiono sposób pożarowego wyłączenia generatora przydomowej elektrowni fotowoltaicznej. W tym przypadku wykorzystana została charakterystyka prądowo-napięciowa panelu fotowoltaicznego, z której wynika, że

zwarcie na zaciskach poszczególnych paneli lub na zaciskach poszczególnych gałęzi tworzących generator PV powoduje sprowadzenie napięcia do wartości bliskiej zero przy boku zagrożenia przez prądy zwarciove płynące w obwodzie zwartych gałęzi generatora PV lub każdego z jego paneli. Wymuszone zwarcie powoduje neutralizację zagrożeń porażenia prądem ratowników uczestniczących w akcji ratowniczo-gaśniczej budynku, na którym zainstalowano panele PV.

**Słowa kluczowe:** panel fotowoltaiczny, instalacja fotowoltaiczna, porażenie prądem

## **Photovoltaic Installations. Basis for Physical Operating. Lighting Protection and Neutralization Rules in Case of Fire**

The natural resources of the coal are depleting. As it used to be the most important energy source, the society was forced to search for new energy sources. For many years, growing interest in renewable energy sources has been observed, including solar energy. In our country, the photovoltaic systems are becoming popular 'household' power plants. The panels placed on the roof are useful during the normal operation conditions, but in case of a fire operation, they become dangerous for the firemen. In purpose to protect the rescuers, it is necessary to use electric shock prevention measures. As photovoltaic panels produce the energy during the whole day, under any exposure to sunlight, at the connectors of the panel, the voltage is expected, which value exceeds the acceptable thresholds. It is not possible to stop the generation of the energy during daytime. This situation has forced the explorations of the solutions, that might lower the voltage to close to zero values. The article presents the solution to be used as safety switch in case of fire. The current-voltage characteristics of the photovoltaic panel has been used. The short circuit caused within the installation will reduce the voltage on the connectors, without increasing the danger level itself. Forced short-circuit will effectively neutralize electric shock risk of the firemen.

**Keywords:** photovoltaic panel, photovoltaic installation, electric shock

### WPROWADZENIE

Bezpieczeństwo pożarowe jest jednym z najważniejszych wymagań stawianych współczesnym budynkom. Wiąże się z nim szereg wymagań tech-

nicznych, które należy spełnić na etapie projektowania. Ponieważ najważniejszym elementem działań ratowniczych jest ewakuacja ludzi z budynku objętego pożarem, stawia się określone wymagania dla konstrukcji budynku oraz instalowanych w nim urządzeń elektrycznych i instalacji zasilającej te urządzenia.

Wśród instalacji elektrycznych stanowiących wyposażenie budynku wstępują obwody zasilające urządzenia elektryczne, które muszą funkcjonować w czasie pożaru. Przewody tych instalacji narażone są na działanie wysokiej temperatury, przez co muszą one zapewnić ciągłość dostaw energii elektrycznej przez czas niezbędny dla funkcjonowania zasilanych urządzeń.

Towarzysząca pożarowi temperatura powoduje zmniejszenie przewodności elektrycznej przewodów, co skutkuje pogorszeniem jakości dostarczanej energii elektrycznej objawiającej się nadmiernym spadkiem napięcia oraz pogorszeniem warunków ochrony przeciwporażeniowej tych urządzeń.

## 1. NASŁONECZNIENIE I JEGO UWARUNKOWANIA

Słońce to rozżarzona kula gazowa o masie  $2 \cdot 10^{30}$  kg, temperaturze powierzchni około 5800 K i średniej odległości od Ziemi 149,6 mln km, która emituje w czasie jednej sekundy energię o wartości  $3,8 \cdot 10^{26}$  J. Z wypromieniowanej przez słońce energii do górnych warstw atmosfery ziemskiej dociera rocznie około  $5,4 \cdot 10^{24}$  J energii słonecznej.

W promieniowaniu słonecznym, które dociera do powierzchni Ziemi, wyróżnia się trzy podstawowe składniki:

- promieniowanie bezpośrednie, pochodzące od widocznej tarczy słonecznej,
- promieniowanie rozproszone, powstające w wyniku wielokrotnego załamania promieni słonecznych na składnikach atmosfery,
- promieniowanie odbite, powstające wskutek odbić od elementów krajobrazu i otoczenia.

Okolo 30% energii przenoszonej przez to promieniowanie odbija się od atmosfery otaczającej kulę ziemską, 47% pochłaniają morza i oceany, a 23% zużywa się w obiegu hydrologicznym (parowanie, opady). W fotowoltaice definiuje się średnią gęstość strumienia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię płaską ustawioną prostopadle do kierunku biegu promieni na zewnątrz atmosfery ziemskiej. Jest ona nazywana stałą słoneczną (ang. *Solar Constant*) –  $G_{SC} = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Jej wartość liczbową

jest korygowana oraz podawana przez Światowe Centrum Promieniowania (ang. *World Radiation Center*) w Davos (Szwajcaria). Zmienia się ona w ciągu roku w granicach  $\pm 3,4\%$ , zależnie od rzeczywistej odległości Ziemi od Słońca. Dla n-tego dnia w roku można ją oszacować dokładniej z zależności:

$$G_{Sn} = G_{SC} \cdot \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \quad (1)$$

gdzie:

n – kolejny dzień w roku;

$G_{Sn}$  – gęstość promieniowania słonecznego w n-tym dniu roku, w [W/m<sup>2</sup>].

Całkowity strumień energii promieniowania, docierający do zewnętrznych warstw atmosfery, dla przyjętej stałej słonecznej i średniego promienia Ziemi, możemy obliczyć wg zależności:

$$E = \pi \cdot R^2 \cdot G_{SC} = \pi \cdot 6371000^2 \cdot 1367 = 174 \cdot 10^{15} [W] \quad (2)$$

gdzie:

R – promień kuli ziemskiej, w [km].

Do biosfery wnika zaledwie około 72% tego strumienia, co oznacza, że średnia gęstość strumienia promieniowania wyniesie:

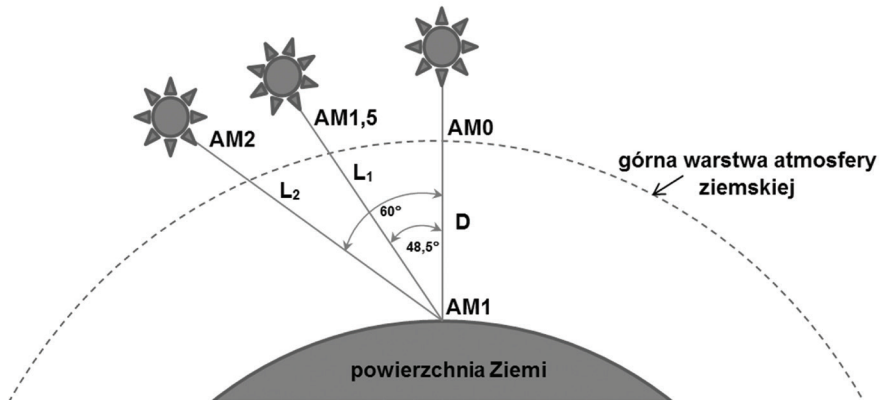
$$G_{sr} = \frac{0,72 \cdot E}{4\pi \cdot R^2} = 246 [W \cdot m^{-2}] \quad (3)$$

W praktyce jest to maksymalna wartość teoretyczna, możliwa do osiągnięcia bez koncentratorów promieniowania, których stosowanie w przydomowych systemach PV jest zabronione.

## 2. ROZKŁAD WIDMA PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

Definiuje się optyczną masę atmosfery AM, która jest stosunkiem długości drogi promieniowania słonecznego przez atmosferę ziemską przy promienowaniu padającym pod pewnym kątem ( $L_x$ ), do długości drogi przy przejściu przez atmosferę prostopadłym do powierzchni Ziemi (D). Wielkość AM można oszacować za pomocą poniższego wzoru, który wynika bezpośrednio z rys. 1.

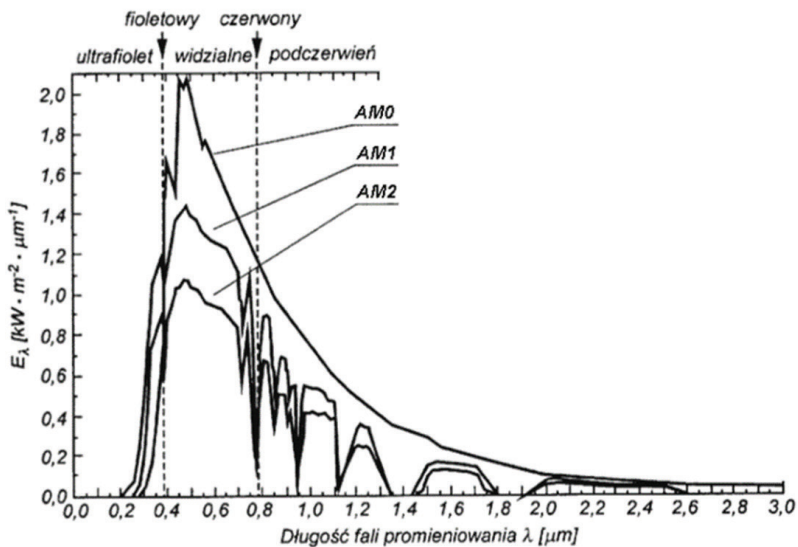
$$AM = \frac{L_x}{D} = \frac{1}{\sin \alpha_s} = \frac{1}{\cos \theta_z}$$



Rys. 1. Interpretacja geometryczna optycznej masy atmosfery AM

Źródło: [1]

Na rys. 2 zostały przedstawione rozkłady widmowe promieniowania słonecznego dla różnych wartości AM.

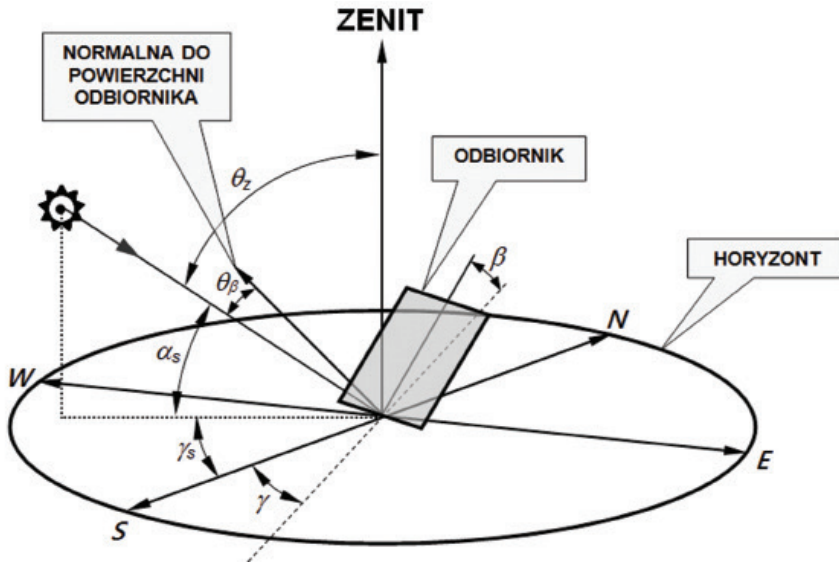


Rys. 2. Rozkłady widmowe promieniowania słonecznego dla AM0, AM1 i AM2

Źródło: [1]

## 3. WYKRES POZYCJI SŁOŃCA

Położenie Słońca określa się przez szereg kątów w horyzontalnym układzie współrzędnych, pokazanym na rys. 3.



Rys. 3. Geometria układu Słońce – odbiornik

Źródło: [1]

gdzie:

$\beta$  – pochylenie odbiornika względem horyzontu (od 0 do 180 [st], pow. 90-do Ziemi),

$\gamma$  – azymut odbiornika – odchylenie od lokalnego południka mierzone względem kierunku południowego (na wschód – ujemne, na zachód – dodatnie);

$\gamma_s$  – azymut słoneczny – odchylenie rzutu kierunku bezpośredniego promieniowania słonecznego na powierzchni Ziemi od kierunku południowego (na wschód – ujemne, na zachód – dodatnie),

$\theta_\beta$  – kąt padania promieniowania na powierzchnię odbiornika, mierzony między kierunkiem promieniowania bezpośredniego a normalną do odbiornika,

$\theta_z$  – kąt zenitu, będący zarazem kątem padania promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą,

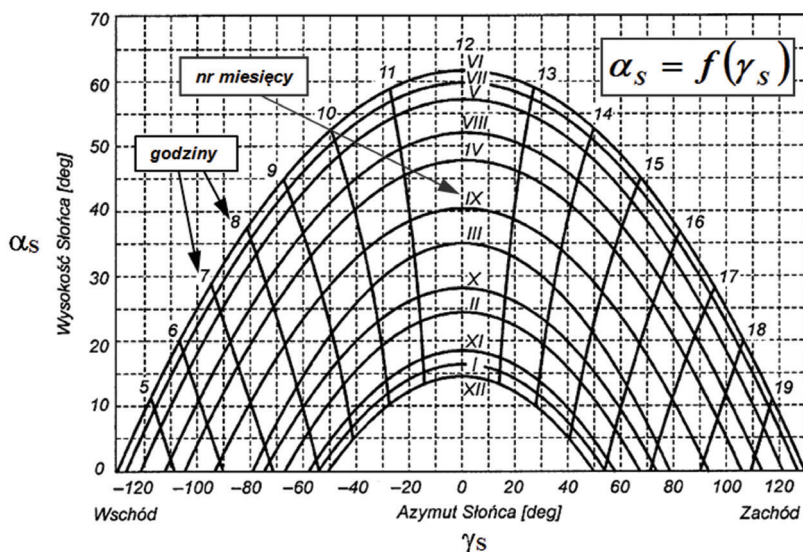
$\alpha_s$  – wysokość Słońca, kąt między kierunkiem promieniowania bezpośredniego, a płaszczyzną horyzontu ( $\theta_z = 90^\circ - \alpha_s$ ).

Dodatkowo do określenia dokładnej pozycji Słońca na nieboskłonie niezbędne będą jeszcze:

$\phi$  – szerokość geograficzna, przyjmowana jako dodatnia dla półkuli północnej i ujemna dla południowej,

$\delta$  – deklinacja słoneczna – kątowe położenie Słońca względem płaszczyzny równika w południe astronomiczne, jest ona zmienna w zakresie: od  $-23,45^\circ$  do  $23,45^\circ$  ( $23^\circ 27'$ ).

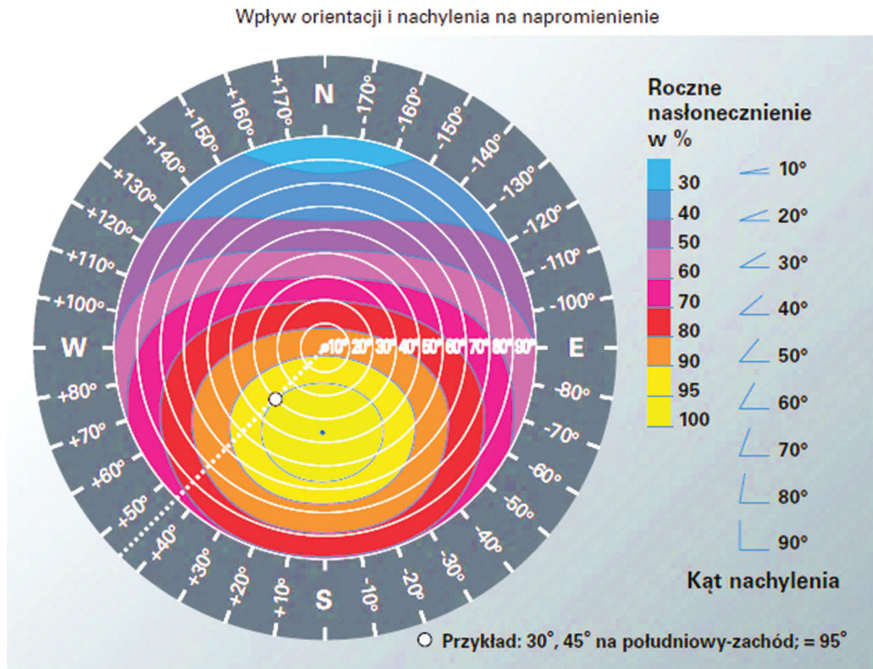
Odwzorowanie drogi Słońca po nieboskłonie w ciągu dnia można przedstawić graficznie we współrzędnych:  $\alpha_s = f(\gamma_s)$ , otrzymując tzw. wykresy pozycji Słońca. Przykładowy wykres pozycji Słońca dla Warszawy przedstawiono na rys. 4. Wykres pozycji Słońca dostarcza bardzo użytecznych danych, wykorzystywanych przy planowaniu lokalizacji systemów PV. Na podstawie wykresu pozycji Słońca można oszacować, czy istniejące przeszkody będą zasłaniały bezpośrednie promieniowanie słoneczne.



**Rys. 4.** Wykres pozycji Słońca dla Warszawy ( $\phi = 52^\circ$ ) dla rekomendowanych dni miesiący, czyli takich ze średnią w danym miesiącu deklinacją  $\delta$

Źródło: [1]

Natomiast na rys. 5 przedstawiono wpływ orientacji i nachylenia modułu PV na potencjał promieniowania słonecznego. W przypadku stacjonarnych instalacji PV, kąt nachylenia paneli powinien być zbliżony do kąta szerokości geograficznej, na której planowana jest instalacja.



**Rys. 5.** Wpływ orientacji i nachylenia modułu PV na potencjał promieniowania słonecznego

Źródło: [5]

#### 4. SYSTEM FOTOWOLTAICZNY (PV)

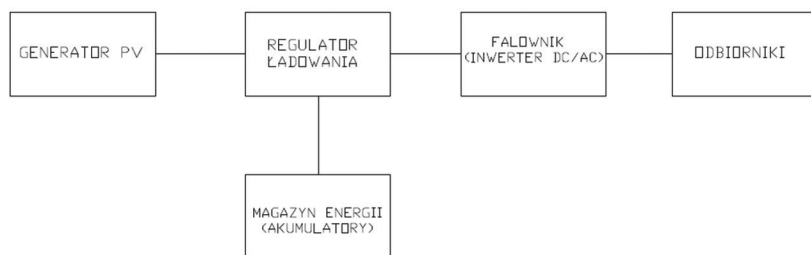
Przez System Fotowoltaiczny, w rozumieniu niniejszej publikacji, należy rozumieć elektrownię słoneczną, która z wykorzystaniem paneli fotowoltaicznych realizuje przemianę energii słonecznej w energię elektryczną. Do realizacji tego zadania konieczna jest budowa układu składającego się z generatora PV (panel lub zestaw paneli fotowoltaicznych), magazynu energii wraz z regulatorem oraz falownik (przekształtnik prądu stałego w przemienny o parametrach sieci elektroenergetycznej zasilającej budynek).

W praktyce ograniczonej do budynków mieszkalnych, funkcjonują dwa systemy PV:

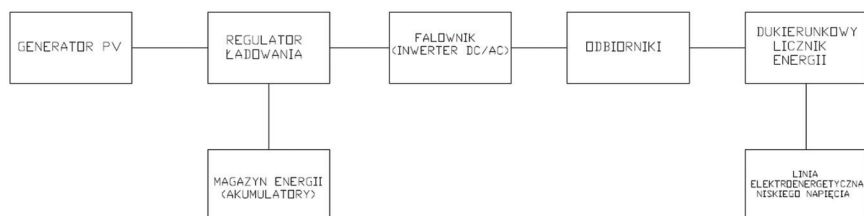
- autonomiczne, niedołączone do sieci (oddalone od sieci oraz z możliwym dostępem do sieci tzw. praca wyspowa),
- dołączane do sieci (rozproszone lub scentralizowane).



Schematy blokowe systemu autonomicznego i dołączanego do sieci przedstawiono na rys. 6 oraz rys. 7.



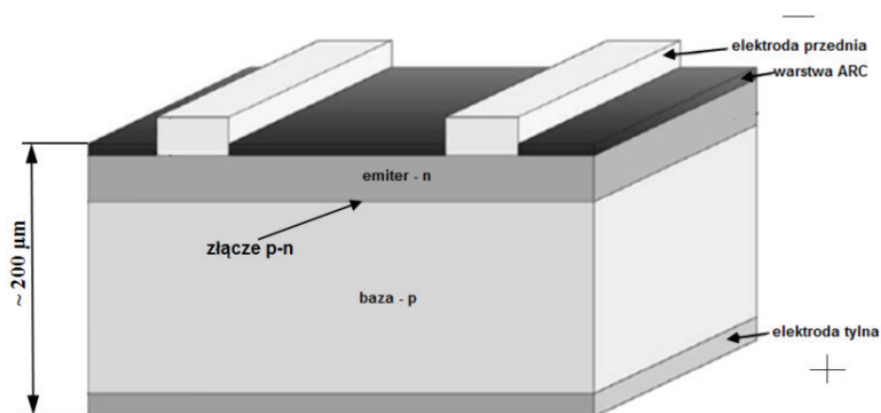
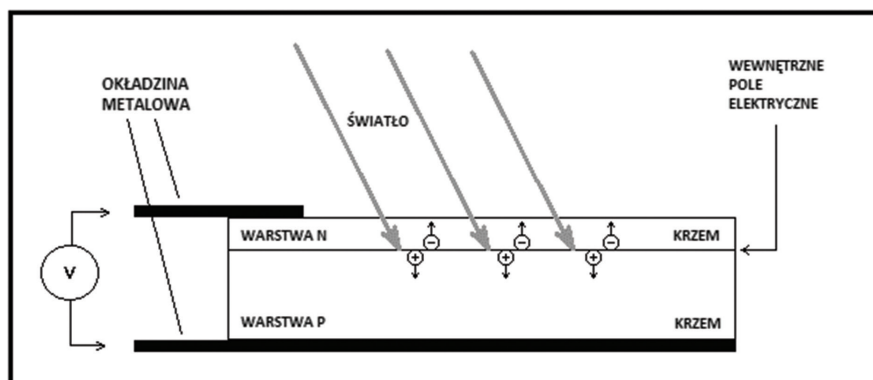
Rys. 6. Schemat blokowy autonomicznego systemu PV



Rys. 7. Schemat blokowy systemu PV dołączanego do sieci

## 5. CHARAKTERYSTYKA OGNIWA PV

Zjawisko fotowoltaiczne polega na bezpośredniej konwersji energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną prądu stałego. Najważniejszymi elementem systemu PV jest generator PV, zbudowany z ogniw fotowoltaicznych, których budowa przypomina budowę diody półprzewodnikowej. Pod wpływem promieniowania słonecznego wytwarza ono stałe napięcie elektryczne. Schemat budowy typowego ogniwa PV, wykonanego z krzemu krystalicznego przedstawiono na rys. 8. Zaznaczono na nim złącze p-n, obszary bazy i emitera z domieszkowanego krzemu, elektrody oraz warstwę antyrefleksyjną (tzw. ARC). Elektrody przednie wykonane są najczęściej techniką sitodruku z pasty na bazie srebra, elektrody tylne z pasty z dodatkiem aluminium.



Rys. 8. Schemat budowy typowego krzemowego ogniwa PV

Źródło: [4]

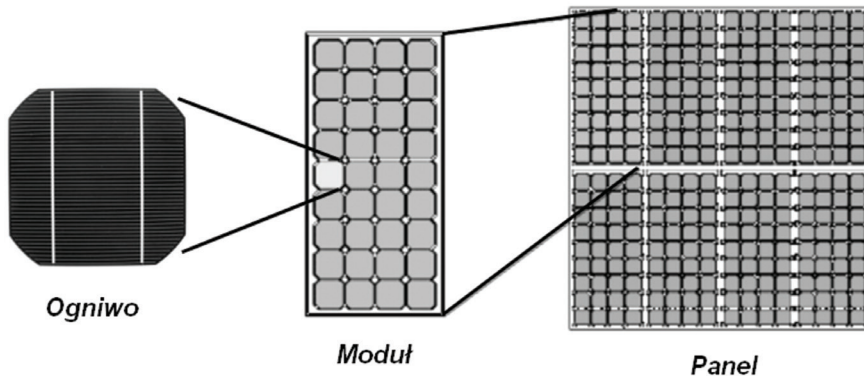
Pojedyncze ogniwa, w celu uzyskania większych napięć, łączone są w moduły a te z kolei w panele PV, dzięki czemu uzyskuje się elementy handlowe o określonych wymiarach i mocy.

Schematycznie budowę modułu oraz panelu PV przedstawiono na rys. 9.

W celu umożliwienia porównania prowadzonych prób i pomiarów paneli PV, wprowadzono tzw. warunki standardowe STC, gdzie przyjęto następujące dane:

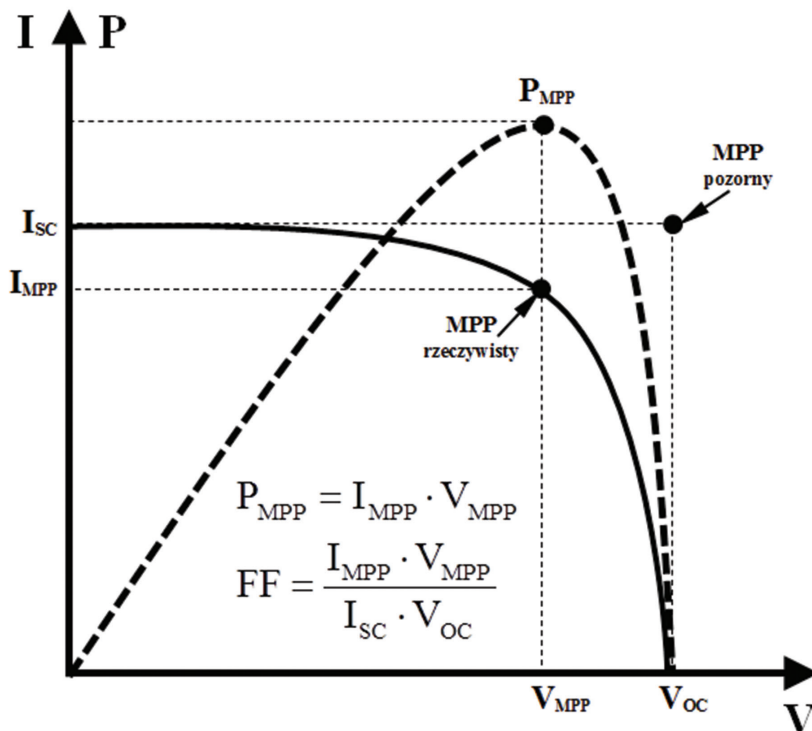
- temperatura pomiaru 25° C,
- natężenie promieniowania  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ,
- optyczna masa atmosfery AM 1,5.

Na rys. 10 została przedstawiona charakterystyka  $I = f(U)$  złącza PV.



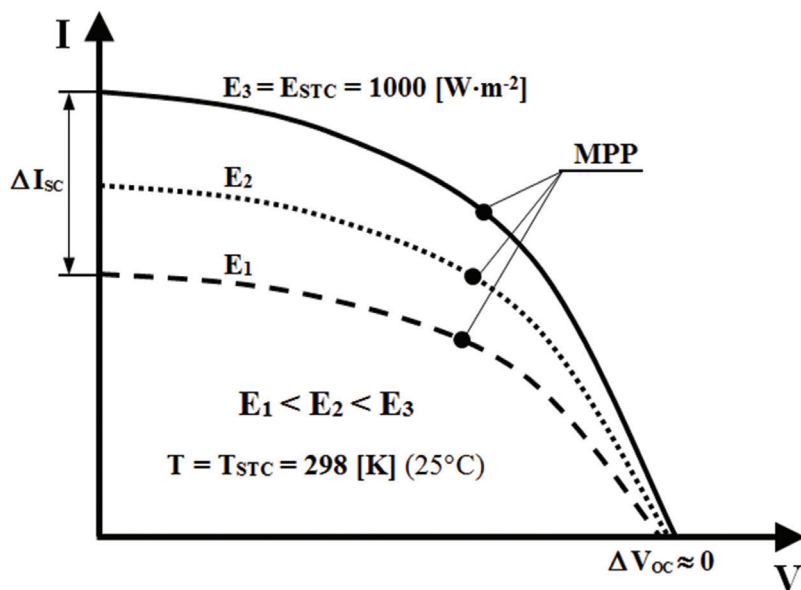
Rys. 9. Budowa modułu oraz panelu PV

Źródło: [4]

Rys. 10. Charakterystyka  $I = f(U)$  złącza PV $(U_{oc}$  – napięcie ogniwa otwartego, nieobciążonego;  $I_{sc}$  – prąd zwarcioowy; $P_{MPP}$  – moc maksymalna;  $I_{MPP}$  – prąd przy maksymalnej mocy ogniwa; $U_{MPP}$  – napięcie przy mocy maksymalnej ogniwa), PF – współczynnik wypełnienia

Źródło: [1]

Parametry ogniwa fotowoltaicznego są uzależnione od natężenia oraz widma promieniowania słonecznego i temperatury. Wpływ natężenia promieniowania słonecznego na wartość prądu i napięcia przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Wpływ natężenia promieniowania słonecznego na wartość prądu i napięcia  
Źródło: [1]

## 6. BUDOWA GENERATORÓW PV

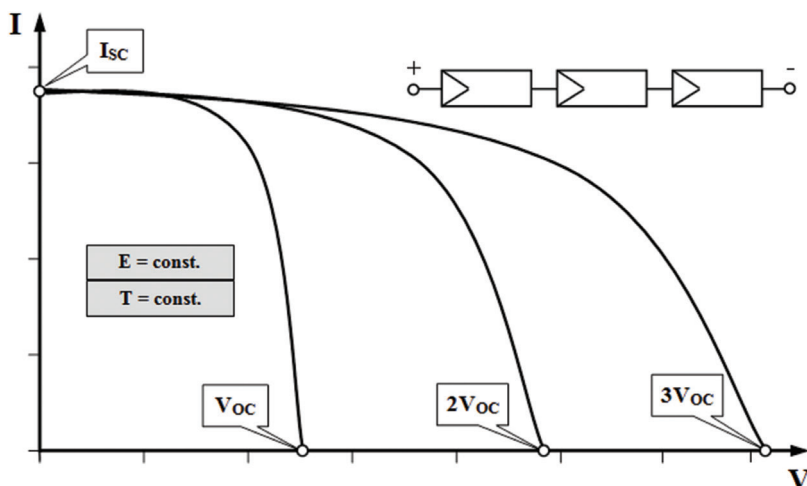
Podstawową jednostką budowy generatora PV jest moduł PV, który stanowi zbiór szeregowo połączonych identycznych ogniw PV. Moduły PV wchodzące w skład generatora PV można łączyć ze sobą na różne sposoby tak, aby dopasować ich parametry wyjściowe do innych elementów systemu PV, a w szczególności bezpośrednio z nimi współpracujących falowników.

Połączenia szeregowo modułów PV wykonuje się celem uzyskania wyższego napięcia. Ma ono jednak jedną zasadniczą wadę – „najsłabsze ogniwo” które determinuje jakość całego łańcucha, co przekłada się na pewność działania układu.

W połączeniu szeregowym – prąd wszystkich modułów jest jednakowy, a wypadkowe napięcie jest sumą napięć poszczególnych modułów PV.

Poważnym problemem pracy układu jest np. zacinienie lub zabrudzenie jednego z ogniw, np. przez osiadanie kurzu.

Kształtowanie charakterystyki połączenia szeregowego na przykładzie trzech ogniw PV przedstawiono na rys. 12.



**Rys. 12.** Przykład kształtowania charakterystyki prądowo-napięciowej  $I = f(U)$  przy połączeniu szeregowym ogniw PV

Źródło: [1]

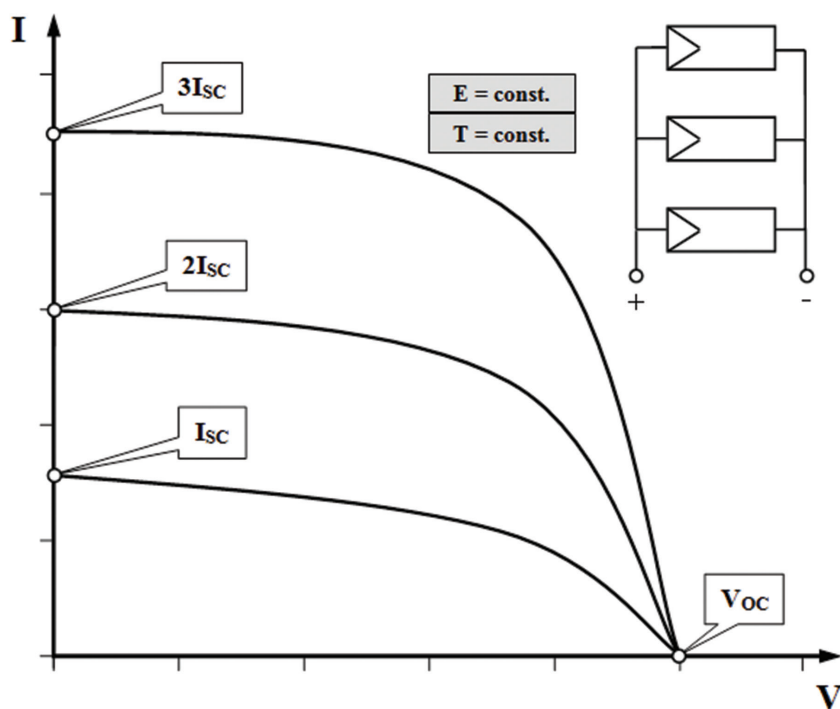
Połączenie równoległe wykonuje się w przypadku konieczności zwiększenia wydajności prądowej. Przy takim połączeniu na wszystkich modułach PV jest takie samo napięcie, a prąd uzyskiwany na wyjściu jest sumą prądów poszczególnych modułów.

W tym przypadku zacinienie pojedynczego ogniwa ma mniejszy wpływ na charakterystykę całego układu. Wpływ połączenia równoległego dla trzech modułów PV na wypadkową charakterystykę prądowo-napięciową takiego układu przedstawiono na rys. 13.

Moduły połączone w kombinacji szeregowo-równoległej mają charakterystyki, których kształt i punkty charakterystyczne zależą od liczby połączonych ze sobą modułów i sposobu ich połączenia. Wpływ na charakterystykę wyjściową połączenia szeregowego i równoległego modułów PV przedstawiono na rys. 14.

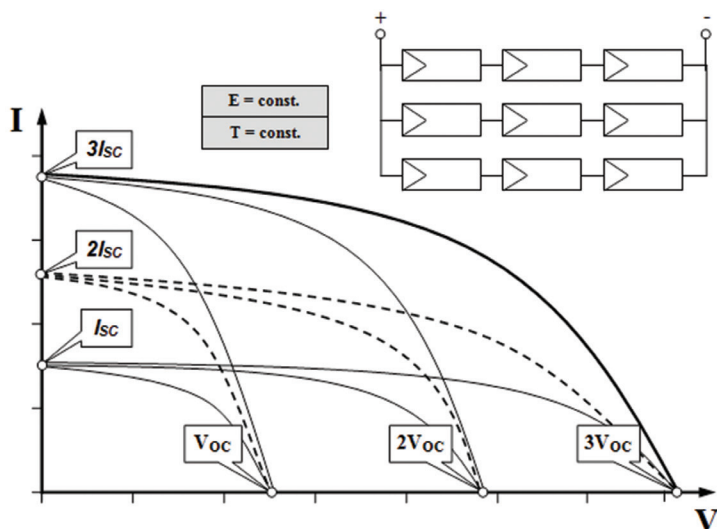
Istotnym problemem przy połączeniu szeregowym modułów PV jest częściowe zacinienie, które powinno być wyeliminowane w jak najwyższym

stopniu. Powody takiego zaciemnienia to np. słupy energetyczne, przewody, drzewa, liście, ptasie odchody czy kurz. Jeżeli choć jedno ogniwo modułu zostanie zaciemnione, to napięcie na tym ogniwie zmienia kierunek polaryzacji i ogniwo takie staje się dla pozostałych obciążeniem. Złącze ogniwa może ulec przebiciu już przy kilku woltach (5÷25 V). W celu uniknięcia tych zagrożeń, ogniwa bocznikuje się przez przyłączenie równoległe diod stanowiących bypass w przypadku zaciemnienia ogniwa. Podczas normalnej pracy diody te są spolaryzowane w kierunku zaporowym i nie powodują żadnych strat mocy. Podczas zaciemnienia diody bypass zostają spolaryzowane w kierunku przewodzenia i prąd generowany przez pozostałą część ogniwa zaczyna przez nie płynąć „omijając” zaciemnione ogniwa. Zasadę działania diody bocznikującej i jej wpływ na kształtowanie charakterystyki  $I = f(U)$  przedstawiono na rys. 13.



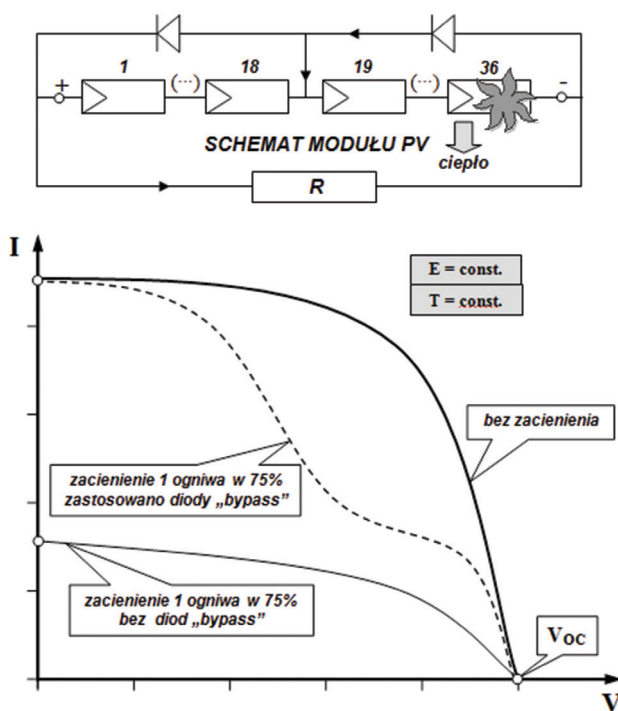
Rys. 13. Wpływ połączenia równoległego dla trzech modułów PV na wypadkową charakterystykę prądowo-napięciową  $I = f(U)$

Źródło: [1]



Rys. 14. Charakterystyki modułów PV połączonych w kombinacji szeregowo-równoległej

Źródło: [1]



Rys. 15. Wpływ diod bypass na charakterystykę  $I = f(U)$  modułu PV częściowo zacienionego

Źródło: [1]

## 7. OCHRONA ODGROMOWA I PRZEPIĘCIOWA INSTALACJI FOTOWOLTAICZNYCH

### 7.1. Ochrona odgromowa

Ochrona odgromowa systemów PV służy do ochrony od bezpośredniego oddziaływania wyładowań atmosferycznych. Ochronę tę realizuje się za pomocą układów zwodów tworzących strefę ochronną tak, by w wyznaczonej przez nie bryle geometrycznej znalazło się chronione urządzenie.

Określenie wielkości oraz kształtu strefy ochronnej, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 62305-3:2009 „Ochrona odgromowa. Część 3. Uszkodzenia fizyczne obiektów budowlanych i zagrożenie życia”, należy wykonywać metodą:

- toczącej się kuli lub,
- kąta ochronnego.

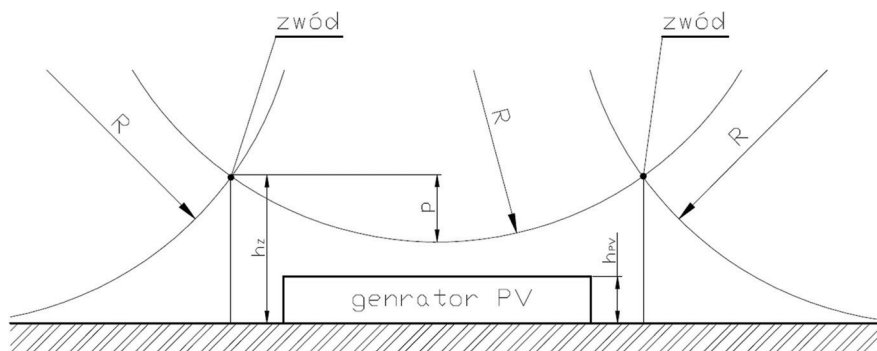
Na rys. 16 przedstawiono zasadę wyznaczania strefy ochronnej metodą toczącej się kuli, przy której elementy niedotykane przez toczącą się kulę o promieniu  $R$ , nie są narażone na bezpośrednie uderzenie pioruna. Promień kuli dobiera się w zależności od klasy LPS (tabela 1).

**Tabela 1.** Wartości promienia toczącej się kuli w zależności od klasy LPS

Klasa LPS	Promień toczącej się kuli [m]
I	20
II	30
III	45
IV	60

Projektowane zwody odgromowe należy tak dobrać, aby ich ilość i wysokość oraz rozmieszczenie tworzyły bryłę geometryczną, wewnątrz której znajdują się wszystkie elementy PV.





**Rys. 16.** Zasada tworzenia strefy ochronnej z wykorzystaniem metody toczącej się kuli

Głębokość „ $p$ ” wnikania kuli należy wyznaczyć z poniższego wzoru:

$$p = R - \sqrt{R^2 - (l_z / 2)^2} \quad (4)$$

gdzie:

$l_z$  – odległość pomiędzy zwodami pionowymi,

$R$  – promień toczącej się kuli

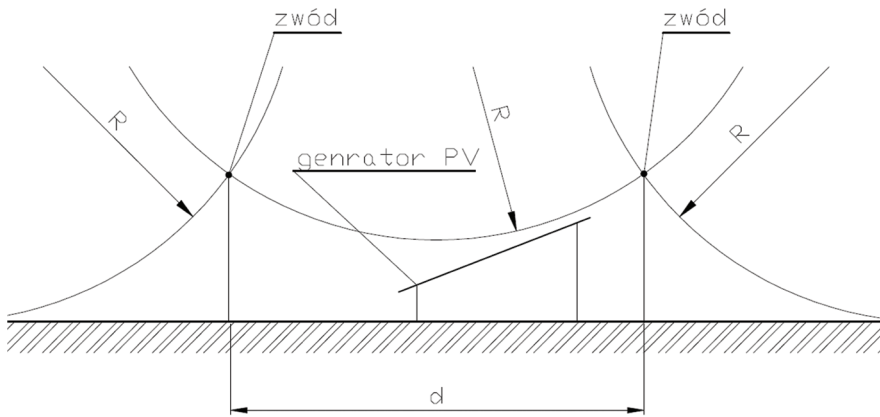
Wysokość zwodów oraz odległość  $l_z$  zwodów pionowych należy dobrać tak, by spełniony był następujący warunek:

$$p < h_z - h_{pv} \quad (5)$$

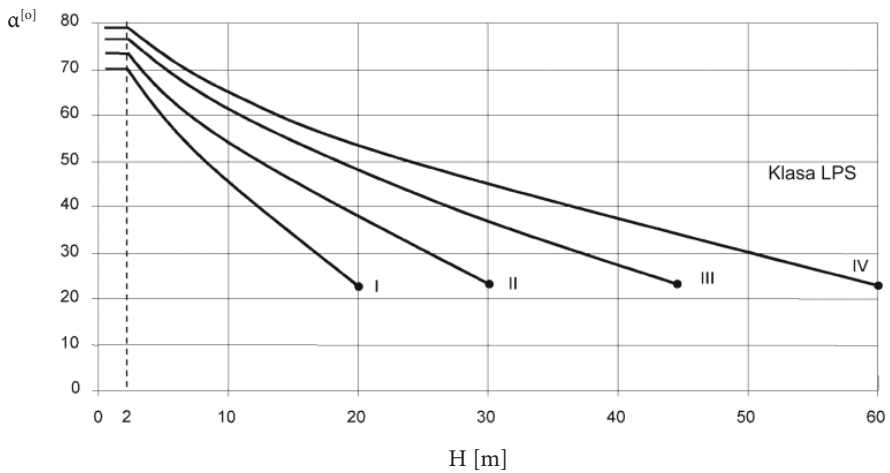
Na rys. 17 została przedstawiona metoda wyznaczania stref ochronnych metodą toczącej się kuli w przypadku instalowania generatorów PV na dachach płaskich.

W przypadku wyznaczania strefy ochronnej metodą kąta ochronnego, wartość kąta ochronnego należy przyjąć w zależności od wysokości zwodu oraz klasy LPS, zgodnie z rys. 18.

Natomiast sposób wyznaczenia strefy ochronnej przy stosowaniu metody kąta ochronnego przedstawiono na rys. 19.

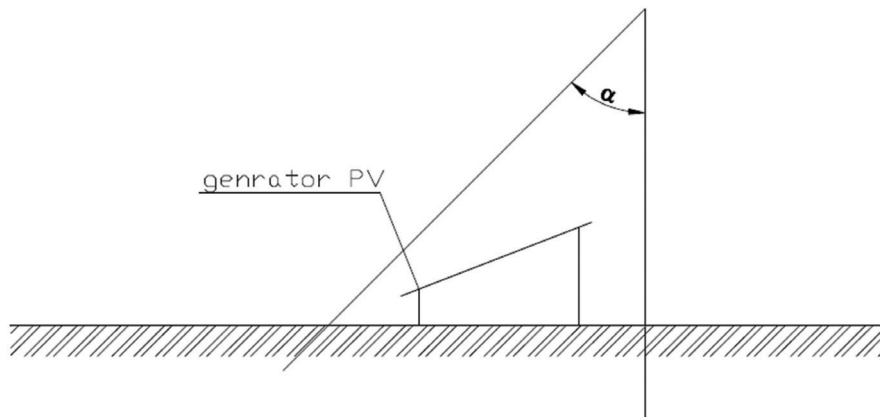


**Rys. 17.** Zasada wyznaczania stref ochronnych metoda toczącej się kuli na dach płaskich



H – wysokość zwodu od płaszczyzny odniesienia przestrzeni poddawanej ochronie

**Rys. 18.** Wartości kąta ochronnego funkcji wysokości w zależności od klasy LPS



Rys. 19. Zasady wyznaczania strefy ochronnej metoda kąta ochronnego

Przy projektowaniu zwodów ochrony odgromowej systemu PV, należy zadbać o ich rozmieszczenie w taki sposób, by nie powodowały one zacielenia chronionych paneli PV.

Zwody te należy instalować w odległości gwarantującej niemożliwość przeskoaku iskry podczas wyładowania bezpośredniego. Odległości te nazywane są odstępami izolacyjnymi, które w przypadku prostych konstrukcji należy wyznaczyć z poniższego wzoru:

$$S \geq k_i \cdot \frac{k_c}{k_m} \cdot l \quad (6)$$

gdzie:

$k_i$  – współczynnik zależy od przyjętej klasy LPS,

$k_c$  – współczynnik uzależniony od wartości prądu płynącego w elementach LPS,

$k_m$  – współczynnik zależy od rodzaju materiału izolacyjnego,

$l$  – odległość mierzona wzdłuż zwodu lub przewodu odprowadzającego do punktu, w którym jest rozpatrywany odstęp izolacyjny „s” do punktu najbliższego połączenia wyrównawczego.

Orientacyjne wartości poszczególnych współczynników przedstawiono w tabelach 2-4. Poprawne wyznaczenie współczynnika  $k_c$  wymaga posługiwania się normą [15].

**Tabela 2.** Wartości współczynnika  $k_i$ 

Klasa LPS	$k_i$
I	0,08
II	0,06
III lub IV	0,04

**Tabela 3.** Wartości współczynnika  $k_c$ 

Liczba przewodów odprowadzających	$k_c$
1	1
2	1...0,5
4 i więcej	1...1/n

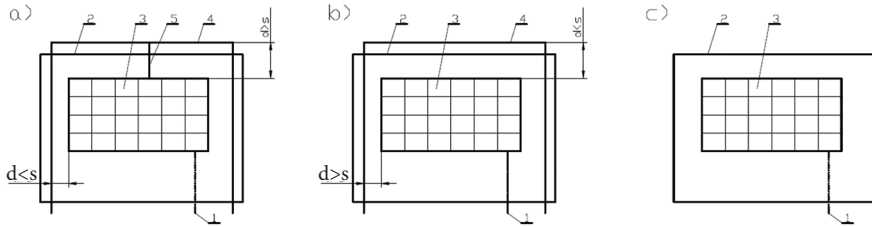
**Tabela 4.** Wartości współczynnika  $k_m$ 

Materiał izolacyjny	$k_m$
Powietrze	1
Beton, cegły	0,5

W praktyce mogą wystąpić trzy przypadki:

- budynek jest wyposażony w LPS, a odległość elementów PV nie spełnia warunku  $d > s$ ; w takim przypadku konstrukcję wsporczą elementów PV należy objąć połączeniami wyrównawczymi (rys. 20a),
- budynek jest wyposażony w LPS, a odległość elementów PV spełnia warunek  $d < s$ ; w takim przypadku konstrukcję wsporczą elementów PV należy połączyć z systemem zwodów odgromowych (rys. 20b),
- budynek nie posiada LPS; w takim przypadku konstrukcję wsporczą elementów PV należy objąć połączeniami wyrównawczymi (rys. 20c).

Poszczególne przypadki zostały przedstawione na rys. 20.



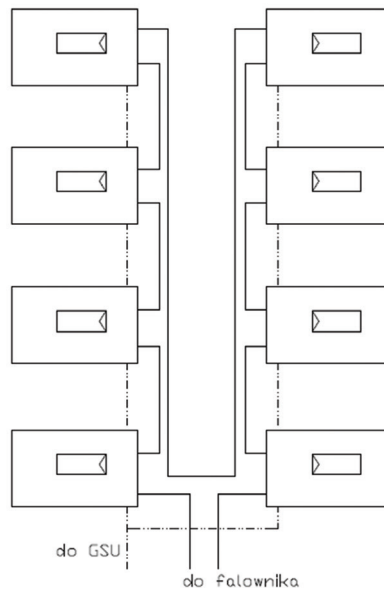
**Rys. 20.** Ochrona paneli PV zainstalowanych na pochylonym dachu przed bezpośrednim uderzeniem pioruna:

- a) budynek posiada LPS i zachowane są odstępów izolacyjne,
- b) budynek posiada LPS ale niezachowane są odstępów izolacyjne,
- c) budynek nie posiada LPS

Oznaczenia:

- 1 – przewód wyrównawczy do GSU;
- 2 – krawędź dachu,
- 3 – generator PV,
- 4 – zwody poziome,
- 5 – połączenie konstrukcji wsporczej PV z LPS

Na rys. 21 przedstawiono zasadę poprawnego oprzewodowania poszczególnych elementów generatora PV.

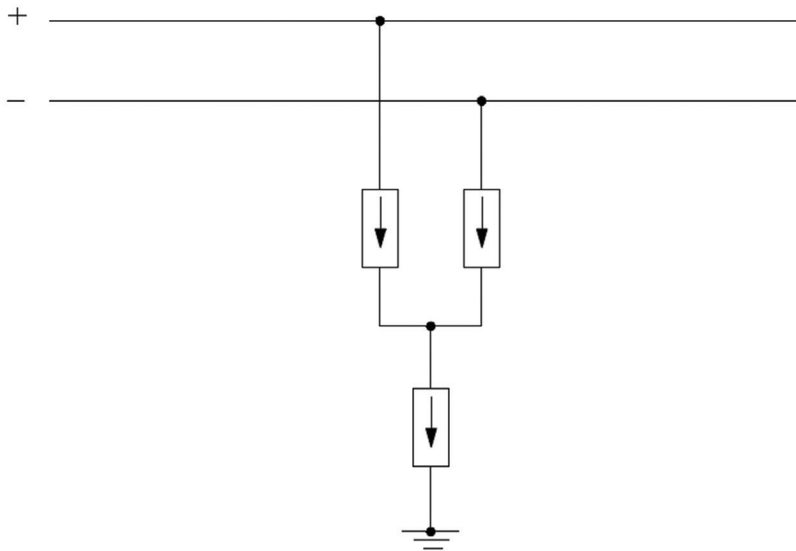


**Rys. 21.** Zasada poprawnego oprzewodowania paneli generatora PV

## 7.2. Ochrona przepięciowa

Ograniczniki przepięć w instalacjach PV należy tak dobierać, aby zapewniony poziom ochrony był niższy niż maksymalne napięcie wytrzymałowe przez falowniki i moduły PV. Ograniczniki przepięć chronią instalację PV przed przepięciami łączeniowymi lub pochodzącymi od wyładowań atmosferycznych bezpośrednich i pośrednich.

Do ochrony instalacji PV po stronie DC należy stosować ograniczniki przepięć DC w układzie „V”, którego układ połączeń przedstawiono na rys. 22.

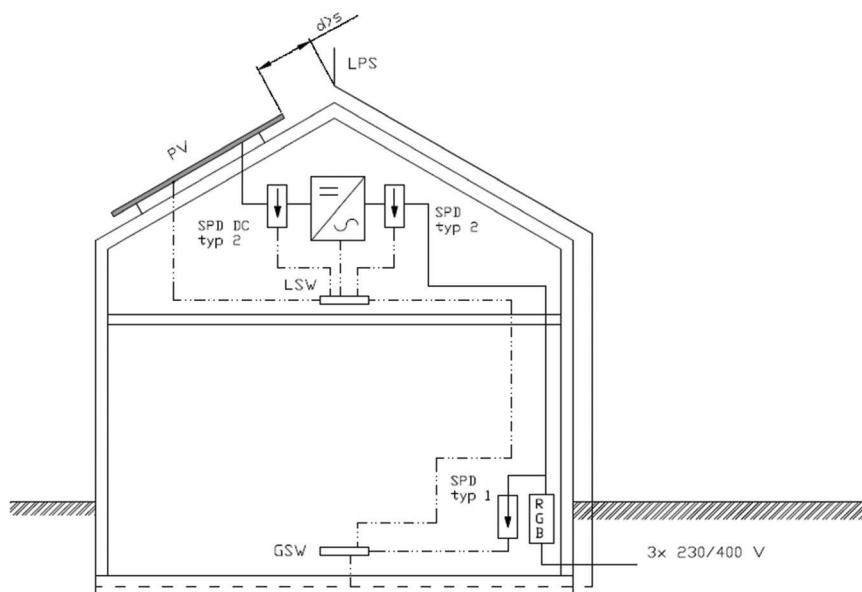


**Rys. 22.** Układ połączeń „V” ogranicznika przepięć DC

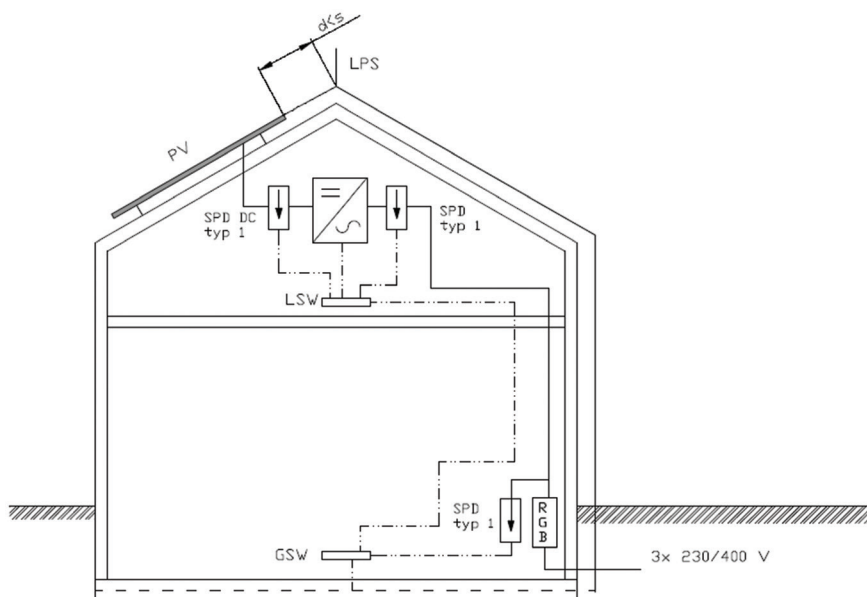
W instalacjach fotowoltaicznych, podczas projektowania ochrony przepięciowej, mogą wystąpić trzy przypadki, podobnie jak przy projektowaniu ochrony odgromowej:

- budynek jest wyposażony w LPS, a odległość elementów PV spełnia warunek  $s > d$ ,
- budynek jest wyposażony w LPS, a odległość elementów PV nie spełnia warunku  $s > d$ ,
- budynek nie posiada LPS.

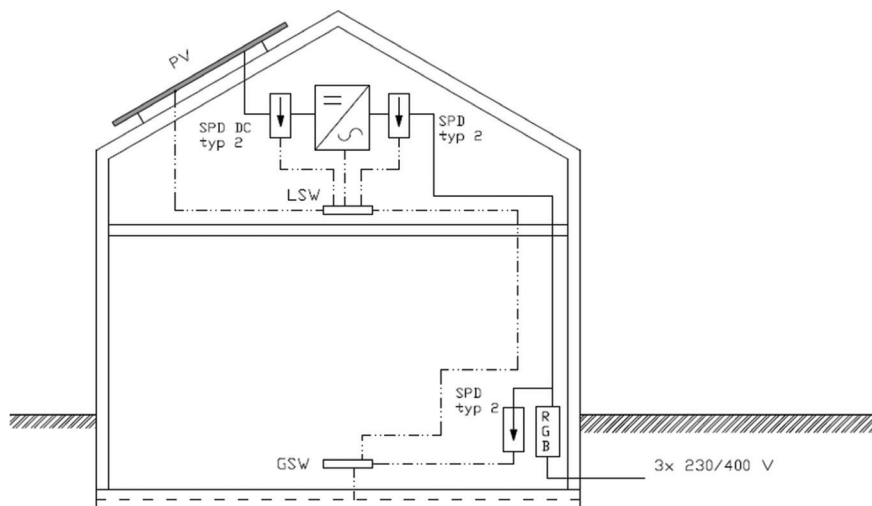
Na rys. 23-25 przedstawiono zasady projektowania dwustopniowej ochrony przepięciowej systemów PV.



Rys. 23. Ochrona przepięciowa systemu PV w budynku z LPS, gdzie  $d > s$ .

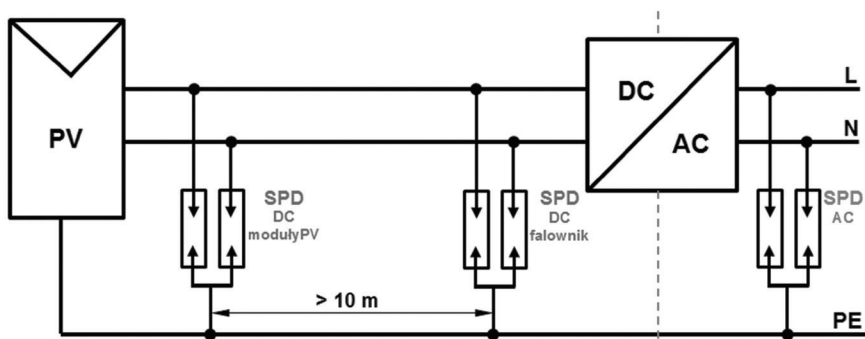


Rys. 24. Ochrona przepięciowa systemu PV w budynku z LPS, gdzie  $d < s$ .



**Rys. 25.** Ochrona przepięciowa systemu PV w budynku nieposiadającym LPS

Należy pamiętać, że przypadku odległości generatora PV od falownika liczonej wzdłuż przewodu większej od 10 m, należy ograniczniki przepięć DC instalować przy generatorze PV oraz przy zaciskach falownika. Wymagania te przedstawiono na rys. 26.



**Rys. 26.** Wymagania instalacyjne przy odległości generatora PV od falownika większej od 10 m

Źródło: [1]

Wymagania dotyczące instalowania ograniczników przepięć w systemach PV zostały przedstawione w tabeli 5.



**Tabela 5.** Ogólne wytyczne doboru typów zabezpieczeń SPD w systemie PV

Czy jest LPS?	Czy zachowano odstępy izolacyjne „s” od LPS?	Odległość pomiędzy modułami PV i falownikiem	SPD DC moduły PV	SPD DC falownik	SPD AC
tak	tak	< 10 m	—	Typ 2	Typ 1
		> 10 m	Typ 2	Typ 2	
	nie	< 10 m	—	Typ 1	
		> 10 m	Typ 1	Typ 1	
nie	—	< 10 m	—	Typ 2	Typ 2
		> 10 m	Typ 2	Typ 2	

## 8. OCHRONA PRZECIWPOŻAROWA W SYSTEMACH PV

Poprawnie zaprojektowany system PV nie stwarza zagrożeń pożarowych. Wybuch pożaru spowodowanego przez system PV należy do rzadkości. Niemniej system ten sprawia szereg kłopotów podczas pożaru budynku, ze względu na wysokie napięcie po stronie DC. Konieczne jest wtedy wyłączenie systemu paneli PV tak, by podczas akcji ratowniczo-gaśniczej zagwarantować bezpieczeństwo ratowników oraz osób ewakuowanych z płonącego budynku.

Najprostszym sposobem wyłączenia systemu paneli PV jest zwarcie bieguna dodatniego i bieguna ujemnego za pomocą zestyku zwiernego wyłącznika zainstalowanego w pobliżu paneli PV. Sterowanie wyłączeniem należy zainstalować w miejscu dogodnym do eksploatacji. Przykład takiego układu przedstawiono na rys. 27. Zgodnie z charakterystyką  $I = f(U)$  generatora PV (rys. 12–14) zwarcie biegunów wyjściowych powoduje przepływ prądu zwarciovego o wartości około 20% większej od prądu znamionowego i spadek napięcia na zaciskach falownika do wartości bliskiej zero. Prąd zwarciovowy w tym przypadku, przy poprawnie dobranych zabezpieczeniach oraz przewodach, nie stwarza zagrożenia.



skład wchodzi dwa typy współpracujących ze sobą modułów: GreenBrain oraz GreenEye. Komunikacja pomiędzy nimi odbywa się przy wykorzystaniu technologii PLC. Elementy GreenEye są montowane przy modułach PV i mogą wyłączać moduły PV na wypadek pożaru oraz ewentualnych prac konserwatorskich.

Układy automatyki systemu gwarantują wyłączenie po przekroczeniu temperatury 115<sup>o</sup> C. W czasie normalnej eksploatacji monitorowanie stanu instalacji jest realizowana z dyskretnością 1 min.

Podstawowe dane techniczne modułu GreenEye to:

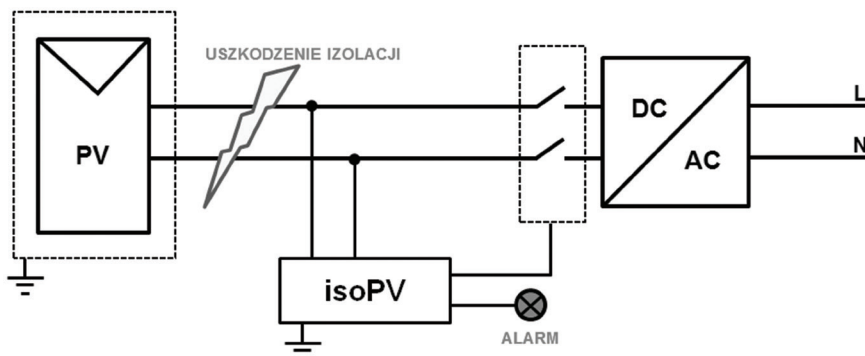
- maksymalne napięcie systemu: 1000 V DC,
- maksymalne napięcie modułu PV: 80 V DC,
- maksymalny prąd linii: 12,5 A.



**Rys. 28.** Makieta systemu przeciwpożarowego firmy Mersen

Źródło: [9]

System jest wyposażony w sygnalizator świetlny, który zadziała, gdy napięcie w systemie przekroczy 60 V DC. W czasie normalnej eksploatacji zagrożenie pożarowe może pojawić się wskutek prądów upływowych, których wartość powinna być monitorowana z wykorzystaniem UKSIPV. Zasadę działania UKSI isoPV przedstawiono na rys. 29.



**Rys. 29.** Zasada funkcjonowania przekaźnika kontroli izolacji UKSI isoPV

Źródło: [1]

Urządzenia te zapewniają system wczesnego reagowania na zagrożenia, zanim nastąpi wyłączenie awaryjne. Wg norm niemieckich, określa się, że w instalacjach PV minimalna wartość rezystancji izolacji nie może być mniejsza niż  $1 \text{ k}\Omega/\text{V}$  zanim generator PV zostanie dołączony do pracy do sieci.

#### LITERATURA

- [1] Sarniak M.T., Budowa i eksploatacja systemów fotowoltaicznych. Medium 2015.
- [2] Pluta Z., Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [3] Szymański B. Solaris – blog Bogdana Szymańskiego poświęcony OZE. <http://solaris18.blogspot.com> (dostęp 15.05.2015).
- [4] Sarniak M. Podstawy fotowoltaiki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
- [5] Viessmann. Energetyka słoneczna – Zeszyty Fachowe 2012.
- [6] Drabczyk K. i Panek P. Silicon-based solar cells. Characteristics and production processes. Institute of Metallurgy and Materials Science of Polish Academy of Sciences, 2012.

- [7] Polskie Towarzystwo Fotowoltaiki. <http://pv-polska.pl/publikacje/> (dostęp 15 kwietnia 2016).
- [8] Szymański B. Instalacje fotowoltaiczne. Wydanie III. Geosystem, Redakcja GLOBEnergia, Kraków 2014.
- [9] Strona Firmy Jean Mueller Polska. <http://www.jeanmueller.pl/> (dostęp 03.04.2016).
- [10] Wincencik K. DEHNcube – gotowy zestaw do ochrony systemów PV. *Magazyn Fotowoltaika* 2.015, nr 1, str. 32-34.
- [11] Sowa A.W., Wincencik K., Ochrona Odgromowa Systemów Fotowoltaicznych. Medium 2014.
- [12] Boroń H., Kompleksowa ochrona paneli fotowoltaicznych instalowanych na obiektach budowlanych. INPE nr 174.
- [13] PN-EN 62305-1:2008 Ochrona odgromowa. Część 1. wymagania ogólne.
- [14] PN-EN 62305-2: 2008 Ochrona odgromowa. Część 2. Zarządzanie ryzykiem.
- [15] PN-EN 62305-3: 2009 Ochrona odgromowa. część 3. Uszkodzenia fizyczne obiektów budowlanych i zagrożenia życia.
- [16] PN-EN 61730-2:2007/A1:2012 „Ocena bezpieczeństwa modułu fotowoltaicznego (PV). Część 2. Wymagania dotyczące badań.
- [17] PN-EN 60269-6:2011 „Bezpieczniki topikowe niskiego napięcia. Część 6. Wymagania dotyczące wkładek topikowych do zabezpieczania fotowoltaicznych systemów energetycznych.