

KOMPLEKSOWA OCHRONA ODGROMOWA PANELI FOTOWOLTAICZNYCH INSTALOWANYCH NA OBIEKTACH BUDOWLANYCH

Streszczenie: Omówiono specyfikę ochrony paneli fotowoltaicznych zainstalowanych na dachu lub ścianie obiektu budowlanego przed skutkami wyładowań atmosferycznych – zasady ochrony tych urządzeń przed bezpośrednim uderzeniem pioruna i sposoby ograniczenia przepięć powstających w instalacjach elektroenergetycznych oraz sterujących i pomiarowych współpracujących z panelami. Wskazano konieczność indywidualnego rozwiązywania systemów ochronnych.

1. Wstęp

Panele fotowoltaiczne PV (ang.: *photovoltaic cell*) należą do odnawialnych źródeł energii elektrycznej, które przetwarzają bezpośrednio energię promieniowania słonecznego na energię elektryczną, bez negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne w tej fazie. Aktualnie obserwuje się coraz szersze stosowanie PV w związku z istotnym obniżeniem kosztów inwestycyjnych oraz znacznym zwiększeniem sprawności procesu przetwarzania, umożliwiającym stosowanie PV również w strefach o średnim nasłonecznieniu [1]. Przewiduje się, że PV mogą stać się w stosunkowo niedalekiej przyszłości znaczącym odnawialnym źródłem energii elektrycznej, szczególnie w przypadku zaistnienia spodziewanych zmian klimatycznych. Wymagałoby to powstania dużej liczby rozproszonych źródeł w postaci PV zainstalowanych na niewykorzystywanych w takim celu powierzchniach obiektów budowlanych. Na rysunku 1. pokazano przykład instalacji fotowoltaicznej zamontowanej na budynku mieszkalnym.

Najczęściej wymaga się instalowania paneli PV na jak największych otwartych powierzchniach o dobrym nasłonecznieniu, na przykład na dachach i/lub na ścianach budynków, czy niezabudowanych płaskich lub pochyłych (o kierunku południowym) terenach, czyli w miejscach o jak najdłuższym w ciągu doby, bezpośrednim działaniu promieni słonecznych. Takie czynniki jak: stosunkowo duża powierzchnia elementów PV, zwykle znaczne wysokości ich instalowania, mała uderowa wytrzymałość elektryczna systemu i ich duża wartość ekonomiczna, powodują, że w rozumieniu normy [8] PV są obciążone znacznym ryzykiem szkód piorunowych. Mogą to być zarówno uszkodzenia wynikające ze skutków bezpośredniego przepływu prądu pioruna w elementach konstrukcyjnych, jak i efekty działania przepięć indukowanych w panelach PV oraz instalacjach elektrycznych i sterowniczych współdziałających z systemem PV, które powstają w wyniku wyładowań atmosferycznych w okolicy obiektu budowlanego. W tej sytuacji, w każdym przypadku, występuje konieczność

dokładnego opracowania środków ochrony urządzeń PV, ich układów sterowania i instalacji elektrycznych budynku zarówno przed bezpośrednim uderzeniem pioruna, jak i przed przepięciami atmosferycznymi działającymi na nie.

Ważnym problemem w fazie projektowania układu fotowoltaicznego jest ocena rentowności systemu i wynikającego z zagadnień ekonomicznych okresu amortyzacji urządzeń – jest to najczęściej podstawa wyboru konkretnego systemu PV [2]. Niestety, w praktyce z różnych względów, obliczenia kosztów systemu często nie obejmują oszacowania zagrożenia piorunowego występującego w układzie i możliwych szkód z tym związanych. Tymczasem nieoczekiwane uszkodzenie, na przykład falownika z powodu uderzenia pioruna może spowodować wzrost kosztów układu nawet o 20%. Prewencyjna kompleksowa ochrona odgromowa systemu PV zwiększa niezawodność systemu i zapewnia osiągnięcie jego oczekiwanej rentowności.



Rys. 1. *Przykład instalacji fotowoltaicznej zamontowanej na dachu i ścianie budynku mieszkalnego*

2. Ochrona odgromowa systemów PV przed bezpośrednim uderzeniem pioruna

Zgodnie z wymogami aktualnych przepisów [5] każdy obiekt budowlany, w tym również obiekty z systemami PV umieszczonymi na dachu, należy chronić przed skutkami wyładowań atmosferycznych bezpośrednich i pobliskich, jeżeli ryzyko wystąpienia szkód piorunowych, wyznaczone zgodnie z zaleceniami normy [8], jest większe niż ryzyko tolerowane. W takim przypadku najczęściej zagrożony obiekt budowlany, a więc i zainstalowane na nim systemy PV, chroni się przed bezpośrednim uderzeniem pioruna za pomocą układu zwodów (LPS) tworzących strefę ochronną o takich rozmiarach, aby całość urządzeń zamontowanych na dachu mieściła się we-

wnętrz tej strefy [7, 9]. Zbudowany układ LPS zapewnia zarówno ochronę systemu PV przed uszkodzeniem w wyniku przepływu prądu piorunowego, jak i brak możliwości wpłynięcia jego części do wnętrza budynku, co mogłoby być niebezpieczne dla ludzi, samego budynku lub urządzeń w nim zainstalowanych.

Najczęściej systemy PV instaluje się na dachach ze spadkiem (przy czym należy wybierać połąć dachu skierowaną na południe). Jeżeli spadek dachu jest większy niż 1/10, to ochronę PV przed bezpośrednim uderzeniem pioruna powinny zapewniać zwody poziome ułożone na kalenicy i krawędziach dachu, ewentualnie uzupełnione zwodami pionowymi. W przypadku systemów PV montowanych na dachach płaskich należy zawsze stosować odpowiednio zaprojektowany system zwodów pionowych. Czyli, właściwy system ochrony przed bezpośrednim uderzeniem pioruna (przeznaczony do przejścia prądu pioruna i odprowadzenia go do ziemi w sposób bezpieczny dla ludzi i urządzeń) tworzy się zawsze za pomocą odpowiedniego układu zwodów pionowych, poziomych lub ich kombinacji – zależnie od konstrukcji budynku i systemu PV. Do określenia wielkości i kształtu strefy ochronnej systemu odgromowego należy wykorzystać według normy [9] metody:

- toczącej się kuli (RSM), w pierwszej kolejności, lub
- kąta ochronnego.

Ilustrację zastosowania metody RSM w przypadku dachów pochyłych pokazano na rysunkach 2 i 3. Metoda ta wykorzystuje zasadę, że elementy niedotykane przez toczącą się w każdym kierunku, po chronionym budynku, kulę o promieniu R , nie są narażone na bezpośrednie uderzenie pioruna. Promień kuli R stosowanej w tej metodzie dobiera się według [9] zależnie od wyznaczonej klasy LPS dla chronionego budynku – tablica 1. W projekcie systemu ochronnego należy tak dobrać ilość zwodów, ich wysokości i rozmieszczenie, aby wszystkie elementy PV nie miały styczności z kulą. Prawidłowy dobór wysokości h_z i odległości l_z między zwodami pionowymi ułatwia obliczenie głębokości p wnikania kuli między zwody (rys. 3), którą można wyznaczyć z zależności (1):

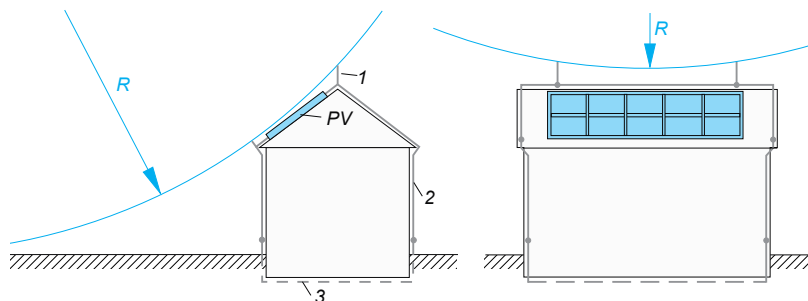
$$p = R - \sqrt{R^2 - (l_z/2)^2} \quad (1)$$

Tablica 1. Wartości promienia kuli do metody RSM według [9]

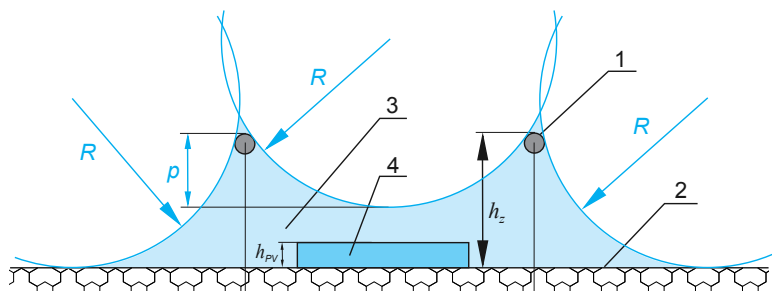
Klasa LPS	R [m]
I	20
II	30
III	45
IV	60

Zarówno wysokość h_z zwodów pionowych, jak i ich odległość l_z muszą być tak dobrane, aby spełniona była nierówność (2):

$$p < h_z - h_{PV} \quad (2)$$



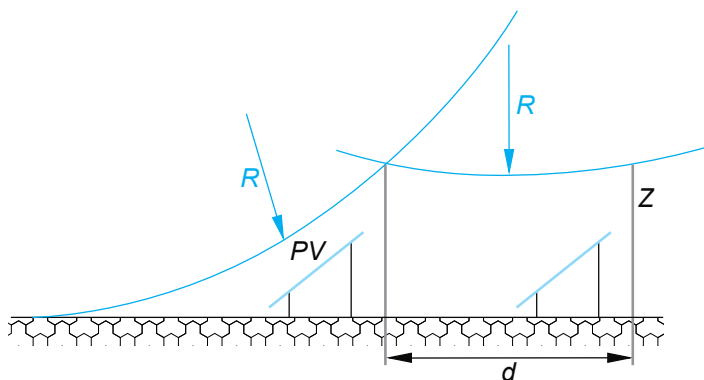
Rys. 2. Ilustracja zasady wyznaczania strefy ochronnej metodą RSM; PV – obiekt chroniony, R – promień kuli wynikający z projektowanej klasy LPS, 1 – zwód pionowy, 2 – przewód odprowadzający, 3 – uziemienie odgromowe



Rys. 3. Ilustracja zasady wyznaczania strefy ochronnej zwodów metodą RSM; 1 – zwody, 2 – płaszczyzna odniesienia, 3 – strefa ochronna, 4 – element PV o wysokości h_{PV} , R – promień kuli, p – głębokość wnikanía kuli, h_z – wysokość zwodu, l_z – odległość między zwodami

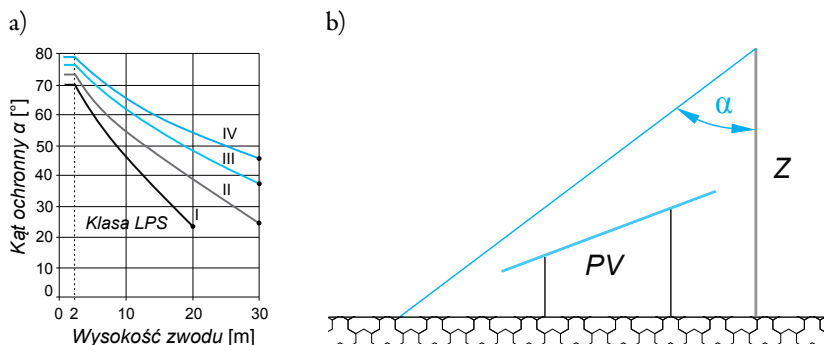
Analogiczne obliczenia projektowe można zastosować do innego zastosowania elementów PV – na rozległym płaskim dachu obiektu budowlanego. Metoda RSM zastosowana tutaj umożliwi również właściwy dobór elementów ochronnych z uwzględnieniem specyfiki tego przypadku. W wyniku obliczeń według tej metody możemy jednoznacznie określić geometrię układu zwodów pionowych Z (rys. 4) rozmieszczonych na dachu, czyli wyznaczyć wysokość zwodów, ich ilość oraz miejsce zainstalowania. Zaprojektowany układ zwodów należy optymalizować biorąc pod uwagę następujące, w części przeciwstawne warunki:

- wszystkie panele PV muszą mieścić się w strefach ochronnych zwodów, wyznaczonych przez kulę o średnicy R ,
- wysokość i liczbę zwodów należy ograniczyć do minimum z uwagi na koszt urządzenia,
- odległość d między daną linią zwodów a następnym szeregiem paneli PV (patrząc w kierunku padania promieni słonecznych) musi być wystarczająco duża, aby panele następne nie były zasłaniane cieniem paneli poprzednich i ich zwodów, co znacznie mogłoby zmniejszyć efektywność systemu PV.



Rys. 4. Ilustracja zasady wyznaczania strefy ochronnej metodą RSM na dachu płaskim; PV – obiekt chroniony, Z – zwód pionowy, R – promień kuli wynikający z projektowanej klasy LPS, d – odległość między sąsiednimi liniami zwodów liczona w kierunku padania promieni słonecznych

Drugą metodą projektowania ochrony odgromowej systemów PV, łatwiejszą w zastosowaniu, jest metoda kąta ochronnego, której zasada jest pokazana na rysunku 5b. W projekcie systemu ochronnego dobieramy wysokość zwodu pionowego Z tak, aby elementy PV mieściły się całkowicie w jego strefie ochronnej wyznaczonej przez kąt ochronny α – o wartości zależnej (rys. 5a) od wysokości zwodu nad płaszczyznę odniesienia oraz projektowanej klasy LPS systemu ochronnego budynku [9]. Zmianę wymiarów strefy ochronnej łatwo osiągnąć przez zwiększanie liczby lub wysokości zwodów pionowych.



Rys. 5. Zależność kąta ochronnego α od wysokości zwodu nad płaszczyznę dachu płaskiego i klasy LPS; a) ilustracja zasady wyznaczania strefy ochronnej metodą kąta ochronnego, b) PV – obiekt chroniony, Z – zwód pionowy, α – kąt ochronny wynikający z projektowanej klasy LPS obiektu oraz wysokości zwodu

Kolejny bardzo istotny problem prawidłowego projektu systemu ochrony odgromowej układu paneli PV zamontowanych na dachu obiektu budowlanego to koniecz-

ność uwzględnienia zaleceń norm [7, 8, 9] dotyczących zachowania bezpiecznych odstępów izolacyjnych s uniemożliwiających powstanie przeskoków odwrotnych (od instalacji LPS do uziemionej konstrukcji wsporczej paneli PV), które mogłyby zniszczyć panele i spowodować wniknięcie części prądu piorunowego do wnętrza budynku – groźne dla ludzi przebywających w budynku i zainstalowanych tam urządzeń. Określenie niezbędnych odstępów izolacyjnych s w projektowanej konstrukcji LPS jest postępowaniem dość złożonym ze względu na liczne drogi przepływu prądu piorunowego do ziemi. Trudności obliczeniowe rosną zasadniczo wraz z liczbą elementów LPS. W obliczeniach dla prostej konstrukcji LPS można stosować wzór ogólny według [9] z zastrzeżeniem, że jest to tylko szacunkowe ujęcie, ograniczone do głównej drogi przepływu prądu piorunowego. Zgodnie z tym bezpieczny odstęp izolacyjny s w metrach oblicza się z zależności (3):

$$s = k_i \frac{k_c}{k_m} l, \quad (3)$$

w której k_i jest współczynnikiem zależnym od wybranej klasy LPS (tablica 2), k_c jest współczynnikiem zależnym od wartości prądu płynącego w elementach LPS (tablica 3), k_m jest współczynnikiem zależnym od rodzaju materiału izolacyjnego w odstępach s (tablica 4), natomiast l jest długością w metrach, mierzoną wzdłuż zwodu lub przewodu odprowadzającego od punktu, w którym jest rozpatrywany odstęp izolacyjny s , do punktu najbliższego połączenia wyrównawczego.

Tablica 2. Wartości współczynnika k_i

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

Tablica 3. Wartości współczynnika k_c

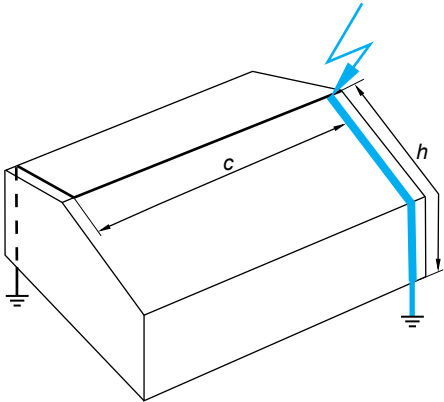
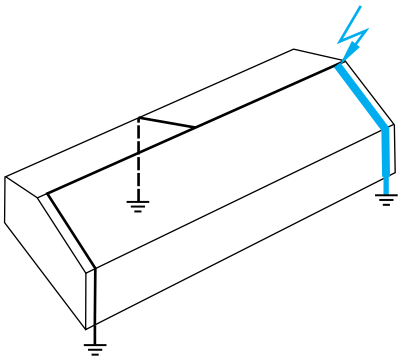
Liczba przewodów odprowadzających n	k_c
1	1
2	1 ... 0,5
4 i więcej	1 ... 1/ n

Tablica 4. Wartości współczynnika k_m

Materiał izolacyjny	k_m
Powietrze	1
Beton, cegły	0,5

Jeżeli występuje szeregowo kilka różnych materiałów, to należy przyjąć mniejszą wartość k_m .

Tablica 5. Wartości współczynnika k_c w zależności od liczby przewodów odprowadzających i wymiarów obiektu budowlanego – wybrane przykłady według [9]

Konstrukcja LPS	c/h	0,33	0,50	1,00	2,00
	k_c	0,57	0,60	0,66	0,75
	k_c	0,47	0,52	0,62	0,73

Oznaczenia:

- c – odległość od miejsca uderzenia do najbliższego przewodu odprowadzającego,
- h – długość przewodu odprowadzającego od kalenicy do miejsca najbliższego połączenia wyrównawczego lub uziemienia,
- k_c – odnosi się do zaznaczonego przewodu odprowadzającego i miejsca uderzenia,
- c/h – jeżeli ma inne wartości niż podane w kolumnach, to k_c można obliczyć przez interpolację wartości sąsiednich

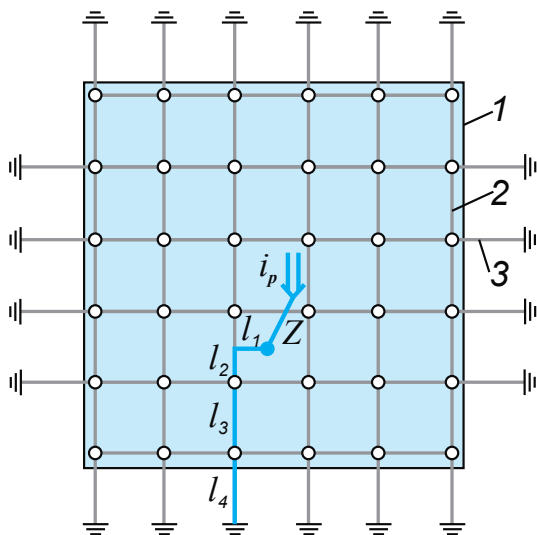
Obliczenia dla prostych układów LPS można również wykonać wykorzystując wskazówki zawarte w normie [9], których wybrane dwa przykłady (z 12 różnych układów LPS zawartych w normie) podano w tabeli 5 – określającej wartości współczynnika k_c w przypadku budynków z dachem pochyłym, ze zwodem na kalenicy oraz uziemieniem typu A.

Te obliczenia wydają się proste, ale możliwość dokładnego obliczenia wartości odstępu s staje się w miarę komplikowania układu przewodów urządzenia LPS coraz

bardziej problematyczna. Jest to szczególnie widoczne w przypadku obiektów budowlanych o płaskim dachu mających rozległą sieć LPS z wieloma węzłami, dającą rozpyły prądu pioruna na wiele równoległych dróg. W takim przypadku można sugerować wykorzystanie uproszczonej metody wyznaczania współczynnika k_c zawartej w normie [10]. Metoda ta wykorzystuje fizyczną interpretację współczynnika k_c , która wskazuje, że ten współczynnik jest stosunkiem wartości części prądu piorunowego płynącego w danym elemencie LPS do całkowitej wartości prądu pioruna. Obliczenia sprowadzają się do:

- określenia najkrótszej drogi (a więc o najmniejszej impedancji) w sieci zwodów i przewodów odprowadzających, którą sływa do ziemi zasadnicza część prądu piorunowego, przy znanych wymiarach poszczególnych elementów,
- przyjęcia zasady, że w skomplikowanym układzie LPS do kolejnego odcinka drogi sływu prądu piorunowego wpływa połowa prądu płynącego w odcinku poprzednim.

Ten sposób szacowania wartości współczynnika k_c można zilustrować konkretnym przykładem pokazanym na rysunku 6, przypadkiem uderzenia pioruna w zwód pionowy Z umieszczony w sieci LPS.



Rys. 6. Sposób obliczania współczynnika k_c na obiekcie budowlanym o płaskim dachu; 1 – krawędzie dachu, 2 – siatka zwodów poziomych, 3 – przewody odprowadzające, Z – zwód pionowy o wysokości h , $\Downarrow$ – wyładowanie atmosferyczne

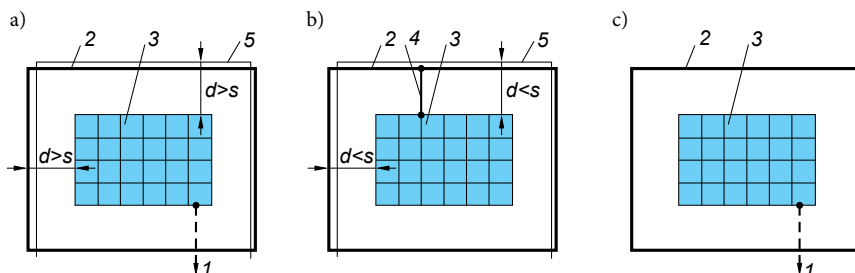
Najkrótsza droga sływu prądu piorunowego związana z wyładowaniem $\Downarrow$ to odcinki: $h - l_1 - l_2 - l_3 - l_4$. Prądy płynące w poszczególnych odcinkach tej drogi to odpowiednio: $i_p - i_p - 0,5i_p - 0,25i_p - 0,125i_p$. Pamiętając, że współczynnik k_c oznacza stosunek wartości części prądu piorunowego płynącego w danym przewodzie do całkowitej wartości tego prądu, mamy kolejne wartości szukanego współczynnika:

1 – 1 – 0,5 – 0,25 – 0,125. Stosując do obliczeń zależność (3), otrzymamy ostateczną wartość odstępu równą:

$$s = \frac{k_i}{k_m} (1 \cdot h + 1 \cdot l_1 + 0,5 \cdot l_2 + 0,25 \cdot l_3 + 0,125 \cdot l_4) \quad (4)$$

lub wzór w postaci ogólnej, dla innych miejsc uderzenia pioruna:

$$s = \frac{k_i}{k_m} (k_{c1} \cdot l_1 + k_{c2} \cdot l_2 + \dots + k_{cn} \cdot l_n) \quad (5)$$



Rys. 7. Ochrona paneli PV zainstalowanych na pochylonych dachach obiektów budowlanych przed bezpośrednim uderzeniem pioruna; 1 – przewód wyrównawczy bezpośredni do szyny wyrównania potencjału, 2 – krawędzie dachu budynku, 3 – panel PV, 4 – połączenie konstrukcji wsporczej PV z LPS, 5 – zwody poziome na kalenicy i krawędziach dachu

Na rysunku 7. pokazano trzy typowe przypadki związane z omówionym wyżej problemem zachowania odstępu bezpiecznego s w ochronie odgromowej paneli PV zainstalowanych na dachu obiektu budowlanego:

1. Jeżeli budynek jest wyposażony w LPS, to jako zasadę przyjmujemy takie usytuowanie PV (rys. 7a), aby z każdej jego strony odstęp d między krawędzią metalowej konstrukcji wsporczej panelu a najbliższym zwodem był większy od odstępu izolacyjnego bezpiecznego s – wyznaczanego według zaleceń normy [9]. W takim przypadku konstrukcję wsporczą panelu należy łączyć przewodem wyrównawczym bezpośrednim (1 – rys. 7a) z główną szyną wyrównania potencjału w budynku, co pokazano na rysunku 8.
2. Jeżeli jednak ze względów:
 - technicznych nie możemy zapewnić odpowiednio dużych odstęgów d (np. na dachu krytym blacho-dachówką lub w obiekcie budowlanym o konstrukcji stalowej),
 - ekonomicznych w budynku zastosowano całkowite pokrycie powierzchni dachu panelami PV,

to mamy sytuację, że $d < s$. W takim przypadku musimy połączyć konstrukcję wsporczą paneli PV z najbliższymi zwodami (rys. 7b). Przy czym tutaj nadal obowiązuje zasada takiego zaprojektowania LPS, aby system paneli PV znajdował się w jego strefie ochronnej – czyli należy wykluczyć również i w tym przypadku możliwość bezpośredniego wyładowania piorunowego w panel PV.

3. Ostatni możliwy przypadek instalowania paneli PV na dachu budynku to obiekt, dla którego nie przewidujemy konieczności ochrony odgromowej, co jest uzasadnione wynikami odpowiedniej analizy ryzyka szkód piorunowych przeprowadzonych według normy [8]. Należy w takim układzie dokonać ekwipotencjalizacji systemu PV, czyli połączyć przewodem wyrównawczym bezpośrednim (1 – rys. 7c) konstrukcję wsporczą panelu PV z główną szyną wyrównania potencjału w budynku, co zaznaczono na rysunku 10.

3. Ochrona przeciwprzepięciowa systemów PV

Panele fotowoltaiczne zainstalowane na dachu budynku współpracują z wieloma innymi instalacjami i urządzeniami tworząc często skomplikowany system elektryczny. Wymaga się więc [5] nie tylko omówionej wyżej ochrony przed uszkodzeniami mechanicznymi i termicznymi wynikającymi z bezpośredniego uderzenia pioruna w panel, ale również ochrony całego systemu przed skutkami działania przepięć powstających w układzie przy wyładowaniach atmosferycznych. Zagrożenia te są efektem przepływu w LPS prądu bezpośredniego wyładowania w obiekt lub indukowania się przepięć w obwodach systemów PV w wyniku pobliskiego wyładowania piorunowego. Innym źródłem podobnych przepięć mogą być zaburzenia wewnętrzne w sieci elektroenergetycznej wynikające z jej działania lub powstających w niej stanów awaryjnych.

Skutki działania przepięć to możliwość uszkodzenia urządzeń elektrycznych i w związku z tym konieczność ich wymiany oraz straty materialne związane z remontem urządzeń i okresowymi przerwami w pracy. Projektując ochronę przeciwprzepięciową systemów PV należy liczyć się z koniecznością ochrony ich elementów składowych, czyli:

- kolektorów fotowoltaicznych,
- falowników,
- układów kontroli i sterowania różnych źródeł energii współpracujących w systemach hybrydowych,
- układów ładowania akumulatorów,

zależnie od przeznaczenia i budowy chronionego systemu PV. Stosowane w praktyce układy ochrony przeciwprzepięciowej systemów PV są jednoznacznie związane z ich przeznaczeniem, miejscem zainstalowania oraz konstrukcją układu ochrony odgromowej.

Ogólne informacje o zalecanych systemach ochrony przepięciowej PV zawiera norma [6], natomiast szczegółowe rozwiązania układów ochronnych podano w normach [9, 11].

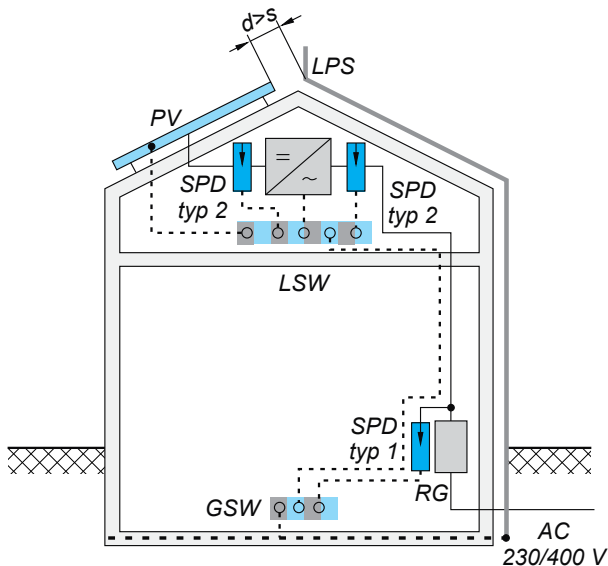
3.1. Ochrona przeciwprzepięciowa systemów PV na dachu budynku z instalacją odgromową

Jest to klasyczny układ wykorzystania systemu PV w nowoczesnym budownictwie energooszczędnym, w którym energia wytwarzana przez panele PV jest wyko-

rzystywana na wewnętrzne potrzeby budynku, a jej nadmiar oddawany do sieci elektroenergetycznej. Z uwagi na zalety techniczne takiego układu należy uważać go za konstrukcję zalecaną w eksploatacji układów fotowoltaicznych.

Sposób ochrony przed przepięciami tego typu systemów PV jest jednoznacznie zależny od konstrukcji LPS zabezpieczającej system fotowoltaiczny. Wyróżnia się dwa przypadki konstrukcji (patrz p. 2.): z zachowaniem bezpiecznego odstępu izolacyjnego s oraz bez zachowania tego odstępu.

Rozwiązanie ochrony przeciwprzepięciowej systemu PV dla przypadku pierwszego pokazano na rysunku 8. Zachowanie w instalacji bezpiecznego odstępu izolacyjnego $d > s$ daje gwarancję, że prąd wyładowania piorunowego nie wnuknie do wnętrza budynku przez instalację DC łączącą panel PV z instalacją elektryczną budynku. Do ochrony falownika DC/AC umieszczonego na przykład na poddaszu należy więc przewidzieć ograniczniki typu 2 (najlepiej trzy, między biegunami plus/minus oraz między każdym biegunem a ziemią). Ograniczniki muszą mieć specjalną konstrukcję przeznaczoną do układów DC – z przyłączaną automatycznie do warystora równoległą gałęzią bezpiecznikową umożliwiającą przerywanie prądów zwarciovych w obwodzie napięcia stałego, na przykład według [13]. Jeżeli od panelu PV są prowadzone instalacje sygnałowe związane z kontrolą i sterowaniem panelem, to również i te instalacje należy zabezpieczyć ogranicznikami typu 2, ale przewidzianymi do pracy w instalacjach sygnałowych.

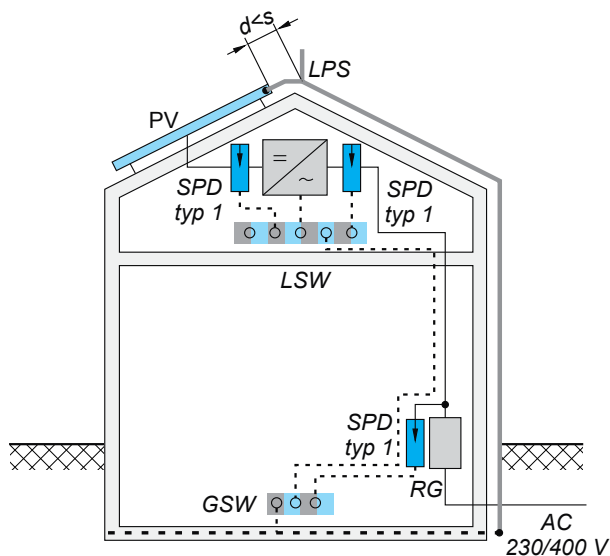


Rys. 8. Ochrona przeciwprzepięciowa PV na dachu budynku z instalacją odgromową LPS z zachowaniem bezpiecznego odstępu izolacyjnego $d > s$, SPD – układy ograniczników przepięć, $\sim/\sim$ – falownik, GSW i LSW – odpowiednio główna i lokalna szyna wyrównania potencjału, RG – rozdzielnica główna budynku

Strona napięcia przemiennego falownika połączona z siecią elektroenergetyczną powinna być chroniona w typowy wielostopniowy sposób przewidziany dla takich instalacji, wynikający z zastosowanego w obiekcie systemu sieci TN-S czy TT o napięciu 400/230 V. Na wejściu tej instalacji do budynku należy zainstalować pierwszy stopień ochrony, czyli ograniczniki typu 1., ze względu na możliwość wnikania części prądu piorunowego od strony szyny wyrównania potencjału. Natomiast na zaciskach AC falownika drugi stopień ochrony, czyli ograniczniki typu 2.

W chronionym budynku należy także zainstalować system ekwipotencjalizacji składający się z głównej szyny wyrównania potencjału GSW, do której łączy się bezpośrednio wszystkie elementy instalacji przewodzących budynku przewidziane przez normę [9] do łączenia z szyną. Lokalna szyna wyrównania potencjału LSW, umieszczona na poddaszu, jest przeznaczona do ekwipotencjalizacji metalowej konstrukcji wsporczej panelu PV oraz pozostałych urządzeń zainstalowanych w górnej części budynku. Połączenia wyrównawcze należy prowadzić równoległe, możliwie blisko linii AC i DC, aby uniknąć tworzenia pętli indukcyjnych, które mogą dawać duże napięcia indukowane.

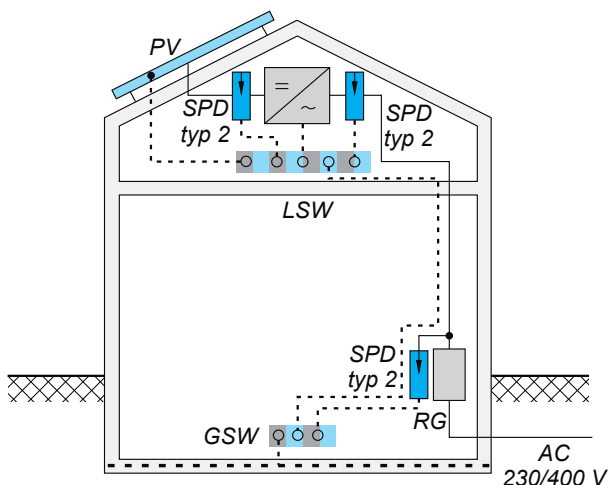
Drugi przypadek to instalacja PV na budynku z instalacją LPS, ale bez zachowania bezpiecznego odstępu izolacyjnego $d < s$ (rys. 9).



Rys. 9. Ochrona przeciwprzepięciowa PV na dachu budynku z instalacją odgromową LPS bez zachowania bezpiecznego odstępu izolacyjnego $d < s$, SPD – układy ograniczników przepięć, $\sim$ – falownik, GSW i LSW – odpowiednio główna i lokalna szyna wyrównania potencjału, RG – rozdzielnica główna budynku

Warunki pracy systemu PV ulegają istotnej zmianie w porównaniu z przypadkiem poprzednim. Wprawdzie nadal panel jest umieszczony w strefie ochronnej zwo-

dów, ale ze względu na konieczność ekwipotencjalizacji elementów na dachu jego konstrukcja wsporcza musi być bezpośrednio połączona z najbliższymi zwodami. Część prądu piorunowego może więc wnikać do instalacji przewodzących wprowadzonych do wnętrza budynku. Można zrezygnować z połączenia wyrównawczego między panelem PV a lokalną szyną wyrównawczą oraz należy zaciski falownika DC/AC zabezpieczyć obustronnie ogranicznikami typu 1. W pozostałej części instalacji nie ma potrzeby wprowadzania żadnych zmian.



Rys. 10. Ochrona przeciwprzepięciowa PV na dachu budynku bez instalacji odgromowej, SPD – układy ograniczników przepięć, $\sim$ – falownik, GSW i LSW – odpowiednio główna i lokalna szyna wyrównania potencjału, RG – rozdzielnica główna budynku

3.2. Ochrona przeciwprzepięciowa systemu PV na dachu budynku bez instalacji odgromowej

W większości przypadków zainstalowanie paneli PV na dachu budynku nie zwiększa wartości ryzyka szkód piorunowych wyznaczonego dla obiektu, wynikającego głównie z jego konstrukcji, usytuowania, wyposażenia i przeznaczenia. Panele można więc instalować na budynkach, na których zgodnie z normą [8] nie ma potrzeby budowy LPS. Nie zwalnia to oczywiście z konieczności instalacji w takim obiekcie systemu przeciwprzepięciowego, czyli odpowiednich ograniczników przepięć oraz układu ekwipotencjalizacji.

Na rysunku 10 pokazano przykład rozwiązania ochrony przeciwprzepięciowej PV w sytuacji, gdy budynek nie ma instalacji odgromowej. Analizowany układ jest narażony wyłącznie na działanie przepięć indukowanych związanych z pobliskim wyładowaniem atmosferycznym. Zaciski DC i AC falownika oraz instalacja elektroenergetyczna AC na wejściu do budynku w rozdzielni głównej są chronione ogranicznikami przepięć typu 2.

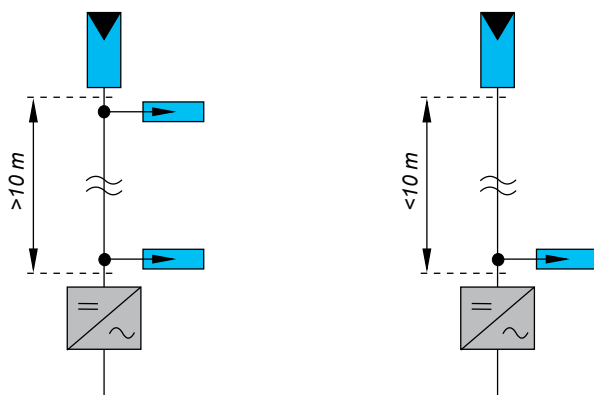
System ekwipotencjalizacji budynku w omawianym przypadku jest taki sam jak w układzie z instalacją odgromową i zachowanym bezpiecznym odstępem izolacyjnym s.

3.3. Zalecenia dodatkowe

Jak wspomniano wyżej, istotnym zagrożeniem przepięciowym urządzeń elektrycznych czy elektronicznych w systemach PV są nie tylko przepięcia powstające w układzie przy wyładowaniu bezpośrednim w budynek, ale również przepięcia indukowane w wyniku wyładowania piorunowego w pobliżu obiektu. Dobrym ograniczeniem tego niekorzystnego zjawiska jest zmniejszenie sprzężenia indukcyjnego między kanałem wyładowania piorunowego a obwodami elektrycznymi układu PV w budynku.

Takie możliwości daje prawidłowy dobór typu kabli i ich montaż w systemie, czyli następujące sposoby:

- zastosowanie kabli o małym skoku skręcenia izolowanych żył roboczych (szczególnie w instalacji DC w panelach PV zainstalowanych na dachu),
- zaprojektowanie jak najkrótszych tras kablowych,
- maksymalne ograniczenie powierzchni pętli przewodzących tworzonych przez kable instalacji elektrycznej i sygnałowej oraz inne elementy przewodzące budynku,
- wykorzystanie metalowej konstrukcji wsporczej paneli PV jako elementów ekranujących trasy kablów instalacji DC,
- prowadzenie instalacji elektrycznych i sygnałowych wewnątrz budynku wzdłuż, na lub obok elementów systemu ekwipotencjalizacji obiektu (zbrojenie, kątowniki, blacha, siatka), a w szczególnym przypadku ułożenie ich na całej długości w metalowych korytach lub rurach.



Rys. 11. Wymagane miejsca montażu ograniczników przepięć w systemie PV w zależności od długości instalacji elektrycznej

Projektując każdy układ ochrony przeciwprzepięciowej urządzeń elektrycznych należy uwzględnić fakt, że działanie ochronne ogranicznika przepięć obejmuje nie

tylko jego zaciski wyjściowe, ale również strefę o określonej długości za tym aparatem. Jak podaje Flisowski w pracy [3] wielkość tej strefy jest zależna od wielu czynników: stromości nadchodzącej fali przepięciowej, spadku napięcia w gałęzi ogranicznika, zmian napięcia w obwodzie chronionym wskutek zjawiska oscylacji oraz również od parametrów chronionego urządzenia. W literaturze przedmiotu nie ma więc jednoznacznych zaleceń co do wymiarów strefy ochronnej ogranicznika, które należy uwzględniać w praktyce projektowej. Ogólnie przyjmuje się, że jest to strefa o długości do kilku metrów za ogranicznikiem, licząc wzdłuż przewodu w kierunku obiektu chronionego. Uwzględniając na przykład zalecenia normy [12], czy informacje podane przez Sowę w pracy [4] zasięg tej strefy można przyjąć na około 10 m, bardziej ostrożne zalecenia są formułowane w [13], gdzie tę długość ogranicza się do około 5 m. Przyjęcie w projekcie układu określonej długości strefy ochronnej jest ważne, ponieważ znając wymiary budynku oraz miejsca zainstalowania w nim paneli PV, falownika oraz rozdzielnic głównej możemy zgodnie z rysunkiem 11 prawidłowo określić wymagane miejsca montażu ograniczników przepięć w instalacji napięcia stałego, jak i analogicznie w instalacji napięcia przemiennego.

4. Podsumowanie

Elementy fotowoltaiczne są stosowane do budowy lokalnych rozproszonych źródeł energii elektrycznej. Należy przypuszczać, że znaczny postęp w technologii produkcji tych elementów umożliwi powszechne tworzenie wydajnych odnawialnych źródeł energii elektrycznej.

Elementy fotowoltaiczne oraz współpracujące z nimi urządzenia elektryczne i elektroniczne z uwagi na swoje właściwości techniczne oraz konstrukcję wymagają specjalnej ochrony odgromowej i przeciwprzepięciowej zapewniającej możliwość bezawaryjnej wieloletniej eksploatacji.

Każdy system fotowoltaiczny wymaga indywidualnego rozwiązania kompleksowego systemu ochronnego uwarunkowanego nie tylko właściwościami zastosowanych urządzeń, ale również rodzajem obiektu budowlanego, w którym je zainstalowano.

5. Bibliografia

1. Nowak W., Stachel A.: Kolektory słoneczne i panele fotowoltaiczne jako źródło energii w małych instalacjach ciepłych i elektroenergetycznych. Materiały konf. „Energia odnawialna w zastosowaniach”. INFOTECH. Gdańsk, 2007.
2. Boryń H., Kusto Z.: Wybrane problemy stosowania ogni w fotowoltaicznych w elektryce. Materiały konf. „Automatyka, elektryka, zakłócenia”. INFO-TECH. Jurata, 2012.
3. Flisowski Z.: Praktyczne problemy związane z ochroną odgromową na etapie projektowania i realizacji. Materiały szkoleniowe Polski Komitet Ochrony Odgromowej SEP. 26.10.2010, SEP Gliwice.

4. Sowa A.: Odległości pomiędzy urządzeniami do ograniczania przepięć a chronionym urządzeniem. *INPE* 2012 nr 150.
5. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz. U. Nr 75, poz. 690 wraz z późn. zmianami.
6. PN-EN 61173:2002 Ochrona przepięciowa fotowoltaicznych (PV) systemów wytwarzania mocy elektrycznej – Przewodnik.
7. PN-EN 62305-1:2008 Ochrona odgromowa. Część 1: Wymagania ogólne.
8. PN-EN 62305-2:2008 Ochrona odgromowa. Część 2: Zarządzanie ryzykiem.
9. PN-EN 62305-3:2009 Ochrona odgromowa. Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów budowlanych i zagrożenia życia.
10. DIN EN 62305-3 Beiblatt 1 (VDE 0185-305-3 Beiblatt 1):2009-10. Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen – Beiblatt 1: Zusätzliche Informationen zur Anwendung der DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3).
11. PN-EN 62305-4:2009 Ochrona odgromowa. Część 4: Urządzenia elektryczne i elektroniczne w obiektach budowlanych.
12. CLC/TS 50539-12:2010-09 Low-voltage surge protective devices – Surge protective devices for specific application including d.c. – Part 12: Selection and application principles – SPDs connected to photovoltaic installations.
13. DEHN+SÖHNE. Lightning protection guide. 2nd updated edition. 2007. ISBN 3-00-015975-4.
14. Materiały informacyjne firmy Phoenix Contact.

*Przedruk z Nr 10/2012 e-pisma
„Automatyka. Elektryka. Zakłócenia” za zgodą wydawcy i autora*