

Modelowanie i symulacje instalacji ochrony odgromowej dla obiektów wyposażonych w instalację fotowoltaiczną

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały procedura i wyniki modelowania oraz symulacji instalacji ochrony odgromowej obiektu wyposażonego w instalację fotowoltaiczną. Główna uwaga została zwrócona na zachowanie minimalnego odstępu izolacyjnego pomiędzy krawędzią panelu, a elementem instalacji odgromowej. Przeprowadzono również analizę napięć indukowanych we fragmencie instalacji zasilającej panel. Modele oraz symulacje zostały wykonane w programie Ansys Electronic Desktop.

Abstract. The article presents the procedure and results of modeling and simulation of lightning protection installations in facilities equipped with a photovoltaic installation. The main attention was paid to keeping the minimum insulation distance between the panel edge and the lightning protection system element. The analysis of induced voltages in the part of power supply system inside panel. Models and simulations were made in Ansys Electronic Desktop. (*Modeling and simulations of lightning protection installations for facilities equipped with a photovoltaic installation*).

Słowa kluczowe: ochrona odgromowa, symulacje i modelowanie, instalacje fotowoltaiczne, odstęp izolacyjny.

Keywords: lightning protection, simulation and modeling, photovoltaic installations, separation distance.

Wstęp

Instalacje fotowoltaiczne należą do odnawialnych źródeł energii, a ich ideą jest przetwarzanie energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Ze względu na obniżenie kosztów inwestycyjnych, coraz większą sprawność oraz minimalny negatywny wpływ na środowisko naturalne, można zaobserwować coraz większe zainteresowanie zastosowaniem systemów PV.

Nierzadko duża powierzchnia instalacji fotowoltaicznych, niewielka udarowa wytrzymałość elektryczna elementów systemu prowadzą do zwiększenia ryzyka uszkodzenia przez prąd piorunowy. Uszkodzenia instalacji mogą powstać zarówno poprzez bezpośredni przepływ prądu pioruna, jak i skutek działania przepięć indukowanych w instalacjach PV powodowanych przez wyładowania w pobliżu systemu. W celu minimalizacji zagrożenia konieczna jest kompleksowa ochrona przed szkodami piorunowymi włączonych w instalację urządzeń zgodnie z normą ochrony odgromowej PN-EN 62305-1...4 [1] [2] [3] [4].

Ogólne zasady ochrony odgromowej dla modułów fotowoltaicznych

Systemy fotowoltaiczne stanowią często najwyższy punkt dachu, mający największe prawdopodobieństwo bezpośredniego trafienia pioruna. Ukierunkowanie miejsca trafienia, efektywne odprowadzenie prądu do ziemi i bezpieczne jego rozproszczenie w gruncie zabezpiecza moduły i instalacje fotowoltaiczne przed uszkodzeniem lub zniszczeniem np. w wyniku pożaru.

Ochrona odgromowa modułów fotowoltaicznych polega głównie na ochronie przed bezpośrednimi trafieniami pioruna i przepięciami indukowanymi powstającymi w wyniku przepływu prądu piorunowego o dużej wartości szczytowej i stromości. W przypadku obiektu wyposażonego w instalację odgromową (tzw. LPS), moduły fotowoltaiczne należy umieszczać wewnątrz strefy ochronnej z zachowaniem odpowiedniego odstępu izolacyjnego, zapobiegającemu powstawaniu przeskoku elektrycznego pomiędzy elementami LPS, a przewodzącymi elementami konstrukcji fotowoltaicznej. W przypadku obiektu nieposiadającego ochrony odgromowej, moduły PV i konstrukcja wsporcza powinny być uziemione w możliwie krótki i pewny sposób. Systemy fotowoltaiczne muszą być także chronione przed przepięciami niezależnie

od tego, czy obiekt jest objęty zewnętrzną instalacją odgromową czy nie.

Warto wspomnieć, że w Polsce instalacje fotowoltaiczne w rozumieniu prawa zaliczane są do budynków stanowiących całość techniczno-użytkową wraz z instalacjami i urządzeniami, w związku z czym podlegają przepisom o robotach budowlanych. Ponadto rozporządzenie dla budynków wymaga stosowania urządzeń ochrony przeciwprzepięciowej w instalacjach elektrycznych (§183.1.10), a także instalacji odgromowej (§53.2) [5].

Minimalny odstęp separujący

Odstęp separujący jest to minimalna odległość pomiędzy elementem instalacji odgromowej, a metalowymi elementami konstrukcyjnymi, instalacjami metalowymi i systemami wewnętrznymi, który można uzyskać, zapewniając odstęp izolacyjny s między tymi częściami [1]. Równanie normatywne wykorzystywane do jego obliczania jest przedstawione wzorem:

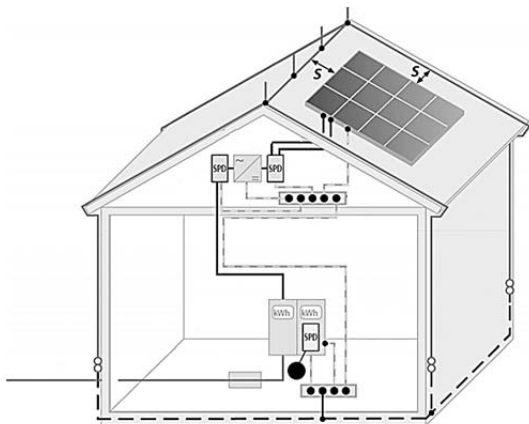
(1)

$$s = \frac{k_i}{k_m} \cdot k_c \cdot l$$

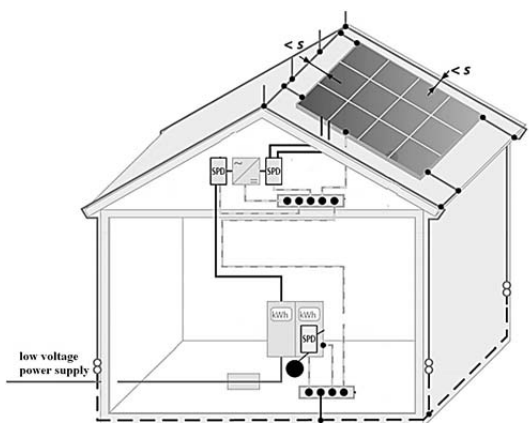
w którym: k_i – wartość współczynnika zależna od klasy LPS, k_m – wartość współczynnika zależna od materiału izolacji elektrycznej, l – długość, mierzona wzdłuż zwodu i przewodu odprowadzającego od punktu, w którym jest rozpatrywany odstęp separujący, do punktu najbliższego połączenia wyrównawczego lub do uziomu [m], k_c – współczynnik rozptyłu prądu piorunowego.

Montaż modułów fotowoltaicznych na dachu budynku wyposażonego w instalację odgromową należy poprzedzić powyższymi obliczeniami, a następnie rozważyć techniczną możliwość zachowania tego odstępu lub połączenia galwanicznego metalowych elementów instalacji fotowoltaicznej i instalacji odgromowej [6].

Jeśli nie można osiągnąć odstępu separującego, np. ze względu na przewodzące pokrycie dachowe, konstrukcja nośna modułów PV powinna być bezpośrednio połączona z instalacją odgromową. Zastosowanie takiego rozwiązania prowadzi do wyrównania potencjałów elektrycznych obu instalacji w przypadku bezpośredniego uderzenia pioruna, co zapobiega powstawaniu niebezpiecznego iskrzenia i niekontrolowanego przepływu prądu piorunowego [6].



Rys. 1 Koncepcja ochrony odgromowej dla systemu zasilania PV w budynku z zewnętrzną ochroną odgromową, w przypadku zachowania odległości s [6].



Rys. 2 Koncepcja ochrony odgromowej dla systemu zasilania PV w budynku z zewnętrzną ochroną odgromową, w przypadku gdy odległość s nie może być zachowana [6].

Przedstawione na rys. 1 i 2 połączenia wyrównawcze między panelami fotowoltaicznymi a szyną wyrównawczą przy falowniku nie występują w opisanym niżej modelu, ponieważ w praktyce także często obserwuje się brak tego połączenia przez konstrukcję paneli w II klasie ochronności.

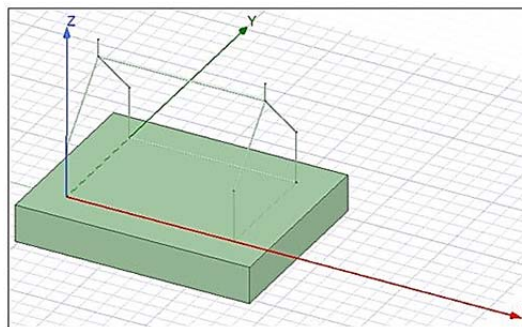
Modelowanie i symulacje pola elektrycznego

Do badań wykonany został w programie Ansys Electronics Desktop trójwymiarowy model budynku z instalacją fotowoltaiczną na dachu. Z jego pomocą przeprowadzono szereg symulacji różnych konfiguracji instalacji ochrony odgromowej i instalacji fotowoltaicznej. Celem symulacji było uzyskanie rozkładu pola magnetycznego i elektrycznego wokół elementów LPS względem umieszczonych w modelu elementów instalacji fotowoltaicznej. Na podstawie uzyskanych wyników, została dokonana ocena, na ile prawdopodobne są przeskoki iskrowe między instalacjami oraz jakie wartości napięć indukowanych mogą wystąpić w poszczególnych konfiguracjach ułożenia oprzewodowania paneli.

Model instalacji odgromowej

Podstawowy model użyty w symulacjach przedstawia układ zwodów, przewody odprowadzające oraz uziemienie. Model ten został postawiony na modelu gruntu w celu urealnienia odzorowania rozprzysku prądu piorunowego w instalacji, jak i poza nią (

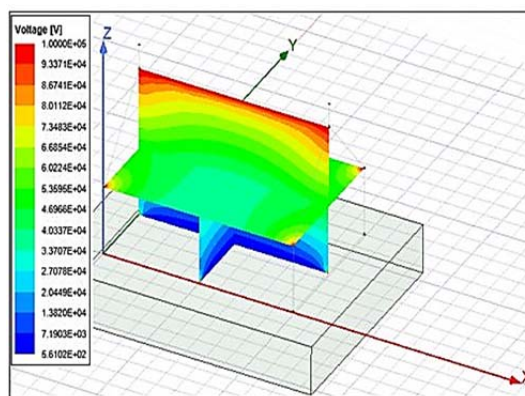
Rys. 3).



Rys. 3 Podstawowy model instalacji ochrony odgromowej

Model przewodzenia prądu stałego (przepływ prądu) w środowisku Ansys umożliwia uzyskanie rozkładu potencjału w wybranej przestrzeni modelowanej instalacji (

Rys. 4).



Rys. 4 Przykładowy rozkład potencjału w module przewodzenia prądu stałego środowiska Ansys.

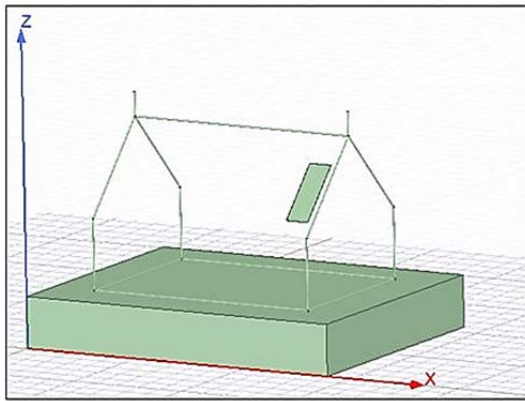
Zakładając wymuszenie o wartości 100 kV przyłożone do nadziemnej części instalacji odgromowej, można uzyskać informację zarówno o rozkładzie pola elektrycznego na płaszczyźnie obserwacji. Ziemia odniesienia została określona jako dolna płaszczyzna symulowanego gruntu. Jego parametry to 3 metry grubości, $\epsilon_r=0,99991$, $\sigma=0,01$ S/m.

Konfiguracja z izolowanym panelem PV

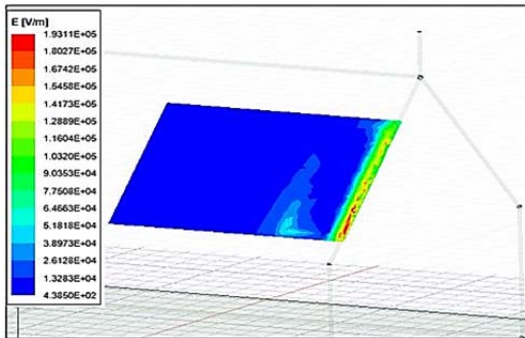
W konfiguracji tej podstawowy model został uzupełniony o pojedynczy panel PV celem otrzymania rozkładu natężenia pola elektrycznego dookoła jego konstrukcji w celu weryfikacji odstępu izolacyjnego pomiędzy panelem, a instalacją ochrony odgromowej. Płaszczyzna obserwacji rozkładu pola elektrycznego została określona zgodnie z płaszczyzną panelu PV. Posiada ona wymiary rzeczywistego panelu, to jest 0,992 x 1,956 m. W symulacji przyjęto potencjały o wartościach 0 V dla panelu i ziemi oraz 100 kV dla instalacji odgromowej.

Z płaszczyzny obserwacji określonej w modelu można dostrzec, iż największe natężenia pola elektrycznego występują przy krawędzi panelu, a szczególnie od strony bliższej instalacji odgromowej. Są to wartości w granicach $1,67 \cdot 10^5 \div 1,93 \cdot 10^5$ V/m. Przyjęty odstęp miał wartość 0,2 m. Z przeprowadzonej symulacji wynika, iż jest on niewystarczający, by uniknąć przeskoku elektrycznego ze względu na zbyt duże natężenie pola elektrycznego przekraczającego wytrzymałość elektryczną powietrza (

Rys. 6).



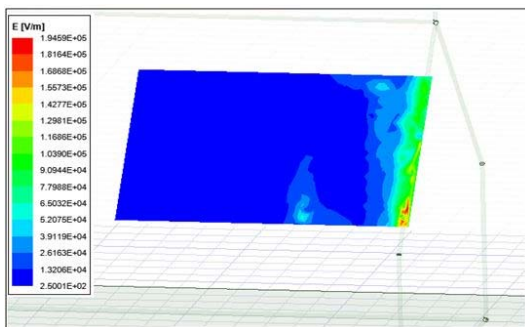
Rys. 5 Model instalacji ochrony odgromowej wraz z panelem PV.



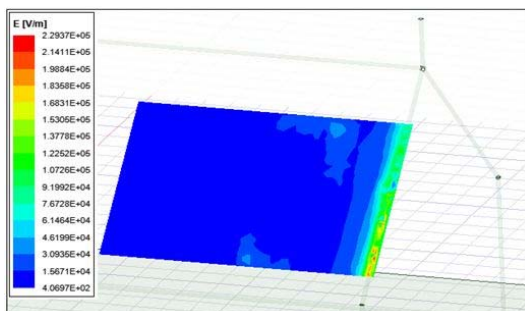
Rys. 6 Rozkład natężenia pola elektrycznego modelu instalacji ochrony odgromowej wraz z panelem PV, odległość 0,2 [m].

W celu weryfikacji granicznej wartości odstępu zostały przeprowadzone dwie dodatkowe symulacje. Odległość pomiędzy instalacjami w pierwszej z nich jest większa o 0,5 m od symulacji bazowej, natomiast druga z kolei o 1 [m]. Wyniki przedstawione zostały na

Rys. 7 oraz Rys. 8.



Rys. 7 Rozkład natężenia pola elektrycznego modelu instalacji ochrony odgromowej wraz z panelem PV, odległość 0,7 [m].



Rys. 8 Rozkład natężenia pola elektrycznego modelu instalacji ochrony odgromowej wraz z panelem PV, odległość 1,2 [m].

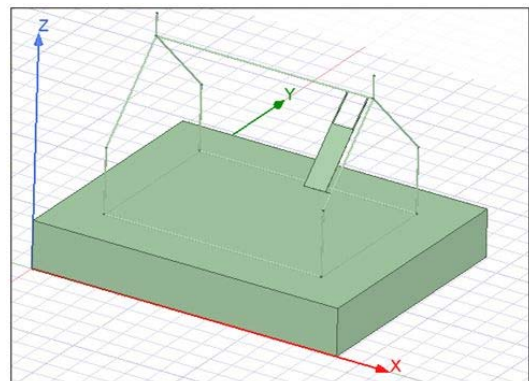
W przypadku pierwszej z symulacji, największe wartości natężenia pola elektrycznego są w granicach $1,68 \cdot 10^5 \div 1,81 \cdot 10^5$ V/m, które występują przy narożniku panelu oraz prawej krawędzi, bliższej względem instalacji ochrony odgromowej. Natomiast dla drugiej symulacji natężenie pola elektrycznego posiada stosunkowo niewielkie wartości, a więc prawdopodobieństwo wystąpienia przeskoku jest znikome, ponieważ przeważają wartości w granicach $9,2 \cdot 10^4 \div 1,53 \cdot 10^5$ V/m.

Z przeprowadzonych symulacji wynika, iż odpowiednia odległość pomiędzy panelem fotowoltaicznym, a instalacją ochrony odgromowej jest istotna. Wartości natężenia pola elektrycznego zmniejszają się wraz ze zwiększeniem odległości panelu od przewodu odprowadzającego, dlatego też odpowiednim odstępem pomiędzy instalacjami w symulowanych konfiguracjach jest 1,2 m. Z uwagi na ograniczone wymiary dachu budynku mieszkalnego, powinna zostać przyjęta odległość 0,7 m.

Odstęp izolacyjny można również zweryfikować w sposób analityczny z wykorzystaniem wzoru, przy czym w modelowanej konfiguracji wynosi on $s=0,62$ m. Porównując wartość wyliczoną w procesie symulacji, to jest $s=0,7$ m, można uznać, iż są one bardzo do siebie zbliżone.

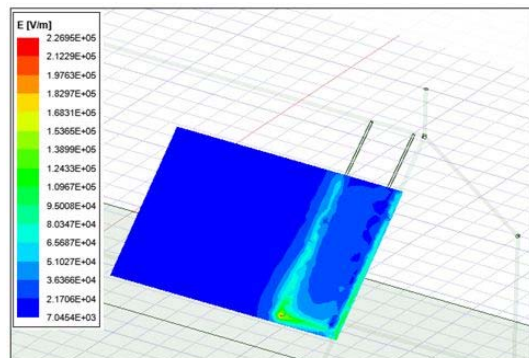
Konfiguracja z panelem połączonym do LPS

Model instalacji ochrony odgromowej wraz z panelem fotowoltaicznym zostały dodatkowo połączone za pomocą przewodów wyrównujących potencjały pomiędzy instalacjami. Odległości panelu PV od instalacji ochrony odgromowej pozostały bez zmian względem wcześniejszego modelu. Zgodnie z przedstawionymi wcześniej informacjami rozwiązanie to jest zalecane w przypadku, gdy odległość separująca nie może zostać zachowana.



Rys. 9 Model instalacji ochrony odgromowej połączonej z panelem PV za pomocą przewodów odprowadzających.

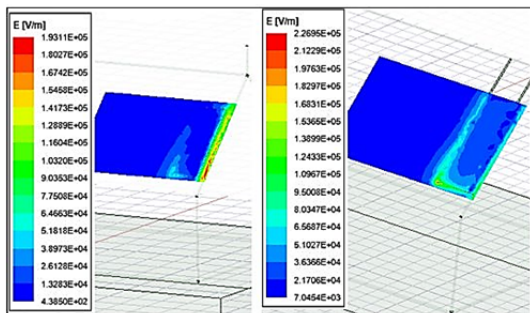
Uzyskane wyniki rozkładu pola elektrycznego przedstawiono na Rys. 10.



Rys. 10 Rozkład natężenia pola elektrycznego modelu instalacji ochrony odgromowej połączonej z panelem PV za pomocą przewodów odprowadzających, widok z góry, odległość 0,2 [m].

Największe wartości natężenia pola elektrycznego widoczne są w narożniku panelu PV, mieszczące się w granicach $2,12 \cdot 10^5 \div 2,27 \cdot 10^5$ V/m. Są to nieznaczne obszary, gdzie można zaobserwować takie wartości. Zdecydowanie przeważają zawierające wartości ze środka skali natężenia pola elektrycznego, mianowicie $5,1 \cdot 10^4 \div 1,68 \cdot 10^5$ V/m.

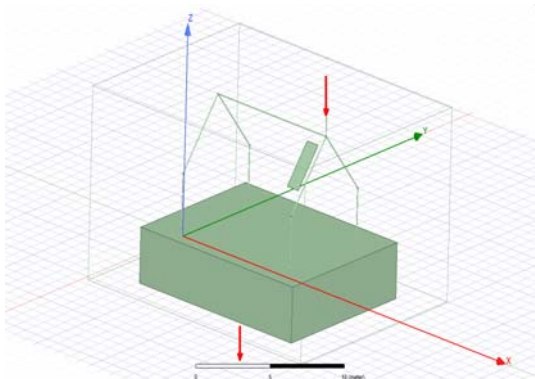
Porównując wyniki symulacji instalacji ochrony odgromowej połączonej z LPS z symulacją instalacji ochrony odgromowej z izolowanym panelem PV dla pola elektrycznego, można zauważyć, że przewody wyrównujące potencjały mają duże znaczenie na rozkład natężenia pola elektrycznego. Różnice w wartościach natężeń pola elektrycznego pomiędzy krawędzią panelu PV, a równoległym przewodem instalacji odgromowej w obu przypadkach są bardzo widoczne. Różnica ta w dolnej części płaszczyzny obserwacji wynosi około $0,84 \cdot 10^5$ V/m=84 kV/m.



Rys. 11 Porównanie rozkładu natężenia pola elektrycznego modelu instalacji ochrony odgromowej z izolowanym panelem PV (lewy) z modelem instalacji ochrony odgromowej z połączonym panelem fotowoltaicznym (prawy) przy odległości 0,2 [m].

Modelowanie i symulacje pola magnetycznego

Uzupełnieniem badań dla pola elektrycznego była seria prób dla pola magnetycznego. Przepływający w instalacji odgromowej prąd piorunowy powoduje powstanie impulsowego pola magnetycznego, które przenikając przez przewodzące elementy modułu fotowoltaicznego (ramka, przewody zasilające, etc.) indukuje w nich napięcia oraz prądy [7] [8]. Biorąc pod uwagę wartości szczytowe oraz stromości prądu piorunowego można spodziewać się znaczących wartości napięć indukowanych.



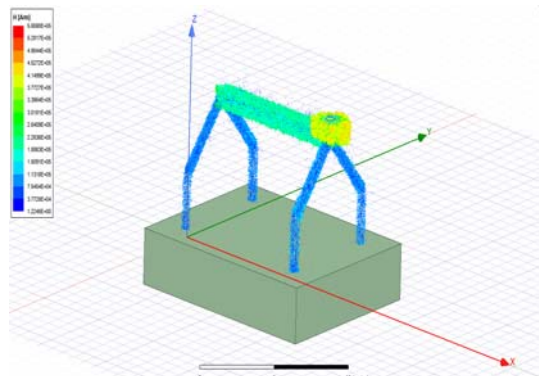
Rys. 12 Konfiguracja modelu dla symulacji pola magnetycznego.

Geometria modułu i instalacji odgromowej w tym przypadku była identyczna, jak wyżej przedstawiona dla pola elektrycznego, zmianie jednak uległo wymuszenie. Ze względu na oczekiwanie wyniku w postaci wartości maksymalnych natężenia pola oraz napięć indukowanych, założono w tym przypadku jako wymuszenie prąd o wartości szczytowej 100 kA. Jest to wartość określająca IV

klasę ochrony odgromowej [1]. Konfiguracja ta przedstawiona jest na Rys. 12

Drugim biegunem dla doprowadzonego wymuszenia prądowego jest dolna powierzchnia modelowanego gruntu.

Przykładowy rozkład pola magnetycznego wokół instalacji odgromowej przedstawiony jest na Rys. 13.



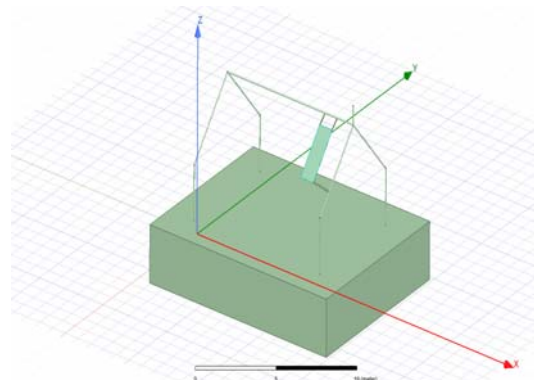
Rys. 13 Przykładowy rozkład pola magnetycznego wokół instalacji odgromowej.

Wartość napięcia indukowanego w ramce utworzonej przez krawędzie modułu fotowoltaicznego zostały określone zgodnie ze wzorem:

(2)

$$U = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dB}{dt} S$$

gdzie: B – indukcja pola magnetycznego przenikającego powierzchnię modułu, t – szybkość zmian pola magnetycznego w czasie (przyjęto $t=1 \mu s$), S – powierzchnia modułu. Przyjęty czas zmian indukcji magnetycznej wynika z przyjętych normatywnie kształtów udaru piorunowego.



Rys. 14 Przykładowa konfiguracja z panelem połączonym galwanicznie z LPS.

Uzyskane wartości w zależności od odległości od przewodu odprowadzającego oraz wykonania lub braku połączenia galwanicznego przedstawione są w Tabeli 1.

Tabela 1 Zestawienie wartości napięć indukowanych w ramce modułu.

Moduł izolowany od LPS			
d [m]	0,2	0,7	1,2
U [V]	30,11	25,98	7,45
Moduł dołączony do LPS			
d [m]	0,2	0,7	1,2
U [V]	13613,67	3654,69	799,73

Wnioski

Instalacje uzupełnione o przewody wyrównania potencjałów zmniejszają wartości natężenia pola elektrycznego, tym samym zabezpieczając instalacje

zewnątrzne, jak i wewnętrzne przed szkodliwym działaniem pioruna. Związane jest to z przepływem prądu piorunowego przez konstrukcję wsporczą panelu, stąd jej parametry materiałowe powinny być tak dobrane, żeby nie uległa ona zniszczeniu lub odkształceniu.

Najwyższe wartości natężenia pola elektrycznego po połączeniu modułu z instalacją odgromową przenoszą się w lewy róg panelu, gdzie mogą znajdować się inne obiekty przewodzące, pierwotnie nie uwzględniane w ocenie odstępów izolacyjnego.

Obliczona wartość $s_o=0,62$ m i określona na drodze symulacji $s_s=0,7$ m są bardzo ze sobą zbieżne, co można interpretować jako zgodność obu metod do jego wyznaczania.

Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, iż wpływ na nie mają ostre krawędzie modelu modułu poprzez zwiększenie natężenia pola elektrycznego. W celu uzyskania większej dokładności obliczeń należy je zaokrąglić, co jednak może przelożyć się na większą złożoność siatki i czas obliczeń.

Jak można zaobserwować na podstawie przedstawionych w Tabeli 1 danych, izolowanie konstrukcji modułu PV od instalacji odgromowej powoduje, iż napięcia indukowane są relatywnie niewielkie. Jeśli jednak nie ma możliwości zachowania bezpiecznego odstępów i wykonane jest połączenie galwaniczne z elementami instalacji ochrony odgromowej to częściowy prąd piorunowy przepływa przez elementy przewodzące panelu narażając je na skutki mechaniczne i termiczne, a jak widać także na znacznej wartości napięcia indukowane.

Autorzy: mgr inż. Emilia Sobieska, Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, email: Emilia.Sobieska.S@ee.pw.edu.pl; dr inż. Konrad Sobolewski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, email: Konrad.Sobolewski@pw.edu.pl.

LITERATURA

- 1 PN-EN 62301-1:2011 "Ochrona odgromowa. Część 1: Zasady ogólne", 2011.
- 2 PN-EN 62305-2:2012 "Ochrona odgromowa. Część 2: Zarządzanie ryzykiem.", 2012.
- 3 PN-EN 62305-3:2011 "Ochrona odgromowa. Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów i zagrożenie życia.", 2011.
- 4 PN-EN 62305-4:2011 "Ochrona odgromowa. Część 4: Urządzenia elektryczne i elektroniczne w obiektach.", 2011.
- 5 Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, 2002.
- 6 IEC TR 63227 ED1 Lightning and surge voltage protection for photovoltaic (PV) power supply systems, 2018.
- 7 K. Coetzer, P. Wiid i A. Rix, „Investigating Lightning Induced Currents in Photovoltaic Modules.,” w *EMC Europe*, 2019.
- 8 Z. Benesova, R. Haller, J. Birkl i P. Zahlmann, „Overvoltages in photovoltaic systems induced by lightning strikes.,” w *International Conference on Lightning Protection 2012*, 2012.