

Zagrożenie porażeniem podczas gaszenia pożaru w budynkach z fotowoltaicznymi źródłami energii

Streszczenie. Podczas prowadzenia akcji gaśniczej w budynku z fotowoltaicznymi źródłami energii występuje zwiększone ryzyko porażenia prądem elektrycznym ze względu to, że moduły fotowoltaiczne są źródłami autonomicznymi i mogą generować niebezpieczne napięcie mimo odłączenia inwertera zarówno od strony AC, jak i DC instalacji elektrycznej. Szczególnie duże ryzyko porażenia powstaje podczas dotknięcia przez strażaka przewodów pod napięciem przyłączonych do modułów fotowoltaicznych oraz podczas podawania na nie środka gaśniczego. W artykule przedstawiono ogólne zasady ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach fotowoltaicznych, wyniki badań rezystancji środków ochrony osobistej strażaków i oceniono zagrożenie porażeniem podczas prowadzenia akcji gaśniczej w budynku z fotowoltaicznymi źródłami energii.

Abstract. When carrying out firefighting in a building with photovoltaic (PV) energy sources, there may be an increased risk of electric shock due to the fact that these sources are autonomous and can generate dangerous voltage despite disconnecting the inverter from both the AC and DC sides of the installation. A particularly high risk of electric shock occurs when a firefighter touches conductors connected to the PV modules and when applying extinguishing media to them. The article presents general principles of protection against electric shock in PV installations, the results of testing the resistance of firefighters' personal protective equipment and assesses the risk of electric shock during firefighting in a building with PV energy sources. (**Risk of electric shock during firefighting in buildings with PV energy sources**).

Słowa kluczowe: fotowoltaiczne źródła energii, pożar, zagrożenie porażeniem.

Keywords: photovoltaic energy sources, fire, electric shock hazard.

Wstęp

Instalowanie systemów fotowoltaicznych (PV) na dachach budynków jest jednym z najbardziej popularnych sposobów na pozyskanie energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. W budynkach z fotowoltaicznymi źródłami energii, podobnie jak w budynkach zasilanych wyłącznie z sieci elektroenergetycznej, należy zapewnić skuteczną ochronę przed porażeniem prądem elektrycznym [1, 2]. Zasady ochrony przeciwporażeniowej są zawarte w szczególności w postanowieniach norm [3, 4]. W normie [4] wyszczególniono środki ochrony przeciwporażeniowej dopuszczalne w instalacji fotowoltaicznej oraz poruszono kwestie stosowania w niej wyłączników różnicowoprądowych. Dobór wyłącznika różnicowoprądowego do instalacji fotowoltaicznych jest istotny zarówno ze względu na wartości naturalnych prądów upływowych występujących w takich instalacjach [5], jak i spodziewany kształt przebiegu prądu ziemnozwarciowego [6-10], w tym w szczególności poziom składowej stałej [11-14]. Dla bezpieczeństwa budynku z instalacją fotowoltaiczną i osób w nim przebywających ważna jest też ochrona przed powstaniem pożaru. Z tego punktu widzenia konieczna jest wysoka jakość elementów wykorzystanych do budowy tej instalacji oraz wysoka jakość jej montażu [15-18]. W pewnych przypadkach warto rozważyć zastosowanie detektorów łuku/iskrzenia [19], dostosowanych do instalacji prądu stałego [20]. Jeżeli jednak dojdzie do powstania pożaru, to w razie prowadzenia akcji gaśniczej skuteczność środków ochrony przeciwporażeniowej wymienionych w normach [3, 4] może nie być zachowana. Służby ratownicze mogą dotykać modułów fotowoltaicznych lub przyłączonych do nich przewodów o uszkodzonej izolacji, które pozostają pod napięciem mimo odłączenia od sieci elektroenergetycznej. W takich warunkach konieczne jest zachowanie szczególnych środków ostrożności.

W niniejszym artykule przedstawiono problematykę zagrożenia porażeniowego i ochrony od porażień w budynkach z fotowoltaicznymi źródłami energii, ze szczególnym uwzględnieniem warunków, które panują podczas gaszenia pożaru w takich budynkach.

Zasady ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach elektrycznych z fotowoltaicznymi źródłami energii

Ogólne zasady ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia, w tym środki ochrony przeciwporażeniowej, są przedstawione w normie PN-HD 60364-4-41 [3], a szczegółowo omówiono w publikacji [2]. W ramach ochrony podstawowej (ochrony przed dotykiem bezpośrednim), która ma chronić przed porażeniem w warunkach normalnych, czyli wtedy, kiedy nie ma uszkodzenia izolacji doziemnej, norma [3] wyróżnia następujące środki:

- izolacja podstawowa,
- przegrody lub obudowy,
- przeszkody,
- umieszczenie poza zasięgiem ręki.

Jako ochronę przy uszkodzeniu (ochronę przy dotyku pośrednim) norma [3] wskazuje środki o nazwach:

- samoczynne wyłączanie zasilania,
- izolacja podwójna lub wzmocniona,
- separacja elektryczna,
- izolowanie stanowiska,
- bardzo niskie napięcie SELV lub PELV,
- niezziemione połączenia wyrównawcze miejscowe.

Trzecią grupą środków jest ochrona uzupełniająca, która w szczególności ma chronić przed porażeniem w razie nieostrożności podczas użytkowania urządzeń elektrycznych lub gdy ochrona podstawowa zostaje ominięta (np. dotyk styku liniowego/fazowego w gnieździe wtyczkowym po zdjęciu jego osłony izolacyjnej). W ramach ochrony uzupełniającej stosuje się następujące środki:

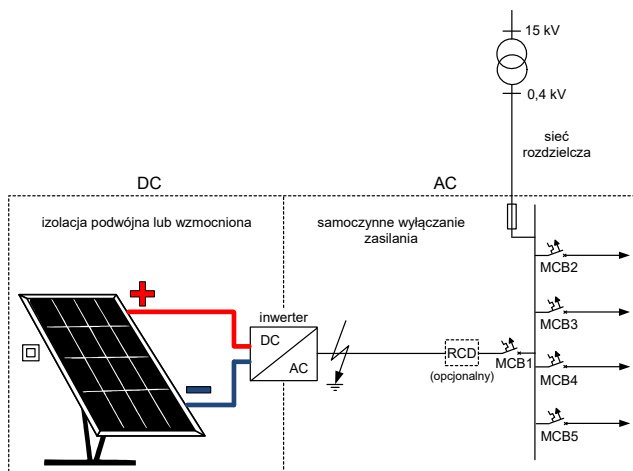
- zabezpieczenia różnicowoprądowe o znamionowym prądzie różnicowym zadziałania nie większym niż 30 mA,
- połączenia wyrównawcze (dodatkowe).

Instalacje fotowoltaiczne traktowane są jako instalacje specjalne i podczas ich projektowania należy uwzględnić wymagania normy PN-HD 60364-7-712 [4]. Norma ta dopuszcza tylko niektóre środki ochrony przeciwporażeniowej spośród wymienionych powyżej. Co więcej, występują różnice w dopuszczalności środków ochrony w zależności od tego, czy rozpatrywana jest strona DC czy AC instalacji fotowoltaicznej. Tabela 1 przedstawia środki ochrony przeciwporażeniowej podstawowej oraz ochrony przy uszkodzeniu dopuszczalne w instalacjach fotowoltaicznych.

Tabela 1. Środki ochrony przeciwporażeniowej podstawowej oraz ochrony przy uszkodzeniu dopuszczalne w instalacjach fotowoltaicznych, na podstawie [4]

Typ ochrony	Strona DC	Strona AC
Ochrona podstawowa	• izolacja podstawowa	• izolacja podstawowa
	• przegrody lub obudowy	• przegrody lub obudowy
Ochrona przy uszkodzeniu	---	• samoczynne wyłączenie zasilania
	• izolacja podwójna lub wzmocniona	• izolacja podwójna lub wzmocniona
	• bardzo niskie napięcie SELV lub PELV	• bardzo niskie napięcie SELV lub PELV
	---	• separacja elektryczna pojedynczego odbiornika

Moduły fotowoltaiczne obecnie dostępne na rynku są wykonane w klasie ochronności II, czyli spełniają wymagania izolacji podwójnej lub wzmocnionej. Taką klasą ochronności powinny charakteryzować się rozdzielnice i inne urządzenia elektryczne po stronie DC. Dzięki takiemu rozwiązaniu zachowana jest skuteczna ochrona przeciwporażeniowa przy pojedynczym uszkodzeniu w stałoprądowej części instalacji. W przypadku strony AC zwykle stosuje się samoczynne wyłączenie zasilania. W razie doziemienia w miejscu zaznaczonym na rysunku 1 (należy rozpatrywać doziemienie na końcu obwodu, czyli praktycznie na zaciskach AC inwertera) ma nastąpić samoczynne wyłączenie zasilania od strony sieci elektroenergetycznej – powinno zadziałać w określonym czasie zabezpieczenie nadprądowe (MCB1) lub opcjonalne zabezpieczenie różnicowoprądowe (RCD). Doziemienie to i wyłączenie zasilania przez wyłącznik MCB1 spowoduje, że zabezpieczenie inwertera od pracy wyspowej instalacji fotowoltaicznej wyłączy zasilanie od strony tej instalacji.



Rys.1. Uproszczony schemat instalacji prosumenckiej ze źródłami fotowoltaicznymi i wskazaniem przykładowych środków ochrony przeciwporażeniowej przy uszkodzeniu po stronie DC oraz po stronie AC. RCD – zabezpieczenie/wyłącznik różnicowoprądowy, MCB – wyłącznik nadprądowy

Jak wspomniano powyżej, zabezpieczenie różnicowoprądowe jest w instalacjach fotowoltaicznych opcjonalne. Jeżeli jednak zdecydowano się na jego zainstalowanie, to należy przestrzegać niżej podanych zasad.

1. Zabezpieczenie różnicowoprądowe (wyłącznik różnicowoprądowy) powinno być typu B, chyba że:
 - producent inwertera podaje, że zastosowano przynajmniej separację podstawową pomiędzy stronami DC i AC,

- zastosowano separację podstawową pomiędzy inwerterem a zabezpieczeniem różnicowoprądowym, np. za pomocą transformatora,
- producent inwertera informuje, że w instalacji nie wymaga się zabezpieczenia różnicowoprądowego typu B.

Typ wyzwania zabezpieczenia różnicowoprądowego ze względu na spodziewany kształt prądu ziemnozwarciowego/różnicowego (AC, A, F lub B) [21, 22] jest bardzo istotny w instalacjach fotowoltaicznych, ponieważ w prądzie ziemnozwarciowym takich instalacji może pojawić się znaczna składowa stała. Składowa ta może pogorszyć czułość zabezpieczenia różnicowoprądowego, a nawet spowodować, że zabezpieczenie to nie będzie reagować na duży prąd różnicowy [13, 14].

2. Znamionowy prąd różnicowy zadziałania zabezpieczenia różnicowoprądowego powinien mieć wystarczająco dużą wartość, aby uniknąć zbędnych zadziałań powodowanych znacznymi prądami upływowymi, których należy spodziewać się w instalacji fotowoltaicznej podczas jej normalnej pracy. Norma [4] nie określa znamionowego prądu różnicowego zadziałania zabezpieczeń różnicowoprądowych i w obwodzie inwertera nie należy instalować wyłączników różnicowoprądowych o $I_{\Delta n} \leq 30$ mA. Producenci inwerterów podają [5], że prąd ten powinien być nie mniejszy niż np. 100 mA lub 300 mA. Zabezpieczenie różnicowoprądowe może być też wbudowane w inwerter.

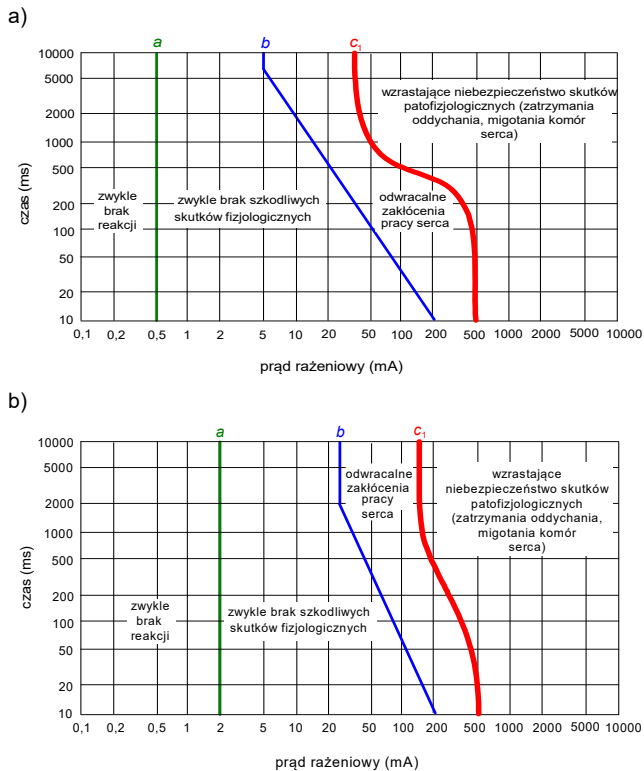
Z punktu widzenia eksploatacji instalacji fotowoltaicznej, a także prowadzenia akcji gaśniczej, ważny jest zapis w normie [4], który mówi, że urządzenia po stronie DC należy traktować jako będące pod napięciem, a więc jako zagrażające porażeniem, nawet gdy inwerter jest odłączony od strony DC lub instalacja po stronie AC jest odłączona od sieci elektroenergetycznej. Odłączenie obwodu za pomocą przeciwpożarowego wyłącznika [23, 24] nie gwarantuje bezpieczeństwa, ponieważ na zaciskach źródeł fotowoltaicznych, jako źródeł autonomicznych, nadal może być napięcie [25-27]. Co więcej, podczas gaszenia pożaru nie można liczyć na środki ochrony przeciwporażeniowej omówione powyżej, ponieważ z zasady mają one być skuteczne podczas normalnego użytkowania urządzeń i zgodnie z ich przeznaczeniem. W przypadku użycia przez strażaków nożyc lub toporów strażackich, np. do przecinania przewodów elektrycznych, niszczy się ich izolację i dochodzi praktycznie do dotyku bezpośredniego. Środek gaśniczy podawany na moduły fotowoltaiczne, inwertery, skrzynki przyłączeniowe czy rozdzielnice wnika do wnętrza tych urządzeń, ponieważ ich stopień ochrony IP przed wnikaniem wody nie jest dostosowany do warunków panujących podczas akcji gaśniczej (podawanie środka gaśniczego z dowolnego kierunku i pod znacznym ciśnieniem).

Ocena zagrożenia porażeniowego służb gaszących pożar w budynku wyposażonym w instalację fotowoltaiczną może być więc dokonana w zasadzie tylko na podstawie określenia wartości prądów rażeniowych, które popłyną w danych warunkach prowadzenia akcji gaśniczej.

Zgodnie z raportem technicznym [28], skutki przepływu prądu przez człowieka przedstawia rysunek 2.

Analizując zagrożenie porażeniowe występujące w trakcie akcji gaśniczej w obrębie instalacji fotowoltaicznej, należy przyjąć, że prąd rażeniowy może płynąć długo, ponieważ nie nastąpi wyłączenie zasilania od strony źródeł fotowoltaicznych przez żadne z zabezpieczeń. Biorąc pod uwagę linie graniczne z rysunku 2, przy długotrwałym

rażeniu prądem stałym można przyjąć umowne granice jak w tabeli 2.



Rys.2. Skutki przepływu prądu przez człowieka na drodze lewa ręka – stopy: a) prąd przemienny o częstotliwości 15–100 Hz, b) prąd stały nietętniący płynący w kierunku od stóp do ręki; na podstawie [28]

Tabela 2. Umowne wartości graniczne prądu rażeniowego, które można przyjąć w odniesieniu do osób gaszących pożar w obiekcie z instalacją elektryczną/fotowoltaiczną

Prąd stały*	Prąd przemienny 50 Hz	Uwagi
25 mA	5 mA	linia graniczna <i>b</i> z rys. 2
150 (80**) mA	30 mA	linia graniczna <i>c</i> z rys. 2

* rozważa się prąd jednokierunkowy o pomijalnym tętnieniu;
 ** największa dopuszczalna wartość znamionowego prądu różnicowego zadziałania zabezpieczenia różnicowoprądowego w obwodach DC, które ma zapewniać ochronę przeciwporażeń uzupełniająca [29]; w niniejszym artykule wartość DC 80 mA przyjmuje się jako największą dopuszczalną

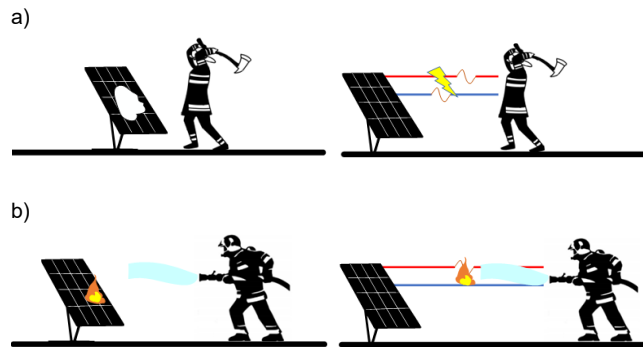
Na podstawie danych z tabeli 2, do dalszych analiz związanych z oceną zagrożenia porażeniowego, które może pojawić się podczas gaszenia pożaru w obiekcie z instalacją fotowoltaiczną, przyjęto dwie umowne granice:

- granica 1 – prąd stały o wartości 25 mA (nie spowoduje szkodliwych skutków fizjologicznych),
- granica 2 – prąd stały o wartości 80 mA (wartość największa dopuszczalna, granica bezpieczeństwa).

Należy przy tym zaznaczyć, że przy rażeniu prądem stałym o pomijalnym tętnieniu nie występuje skurcz mięśni rąk, zatem nie określa się granicy samouwolnienia spod napięcia (przy prądzie AC granica ta jest szacowana na 5–10 mA). Przepływ prądu stałego o niedużej wartości jest wyczuwalny (ukłucie, chwilowy skurcz mięśni) tylko podczas jego załączania lub wyłączania, ponieważ ma miejsce wtedy nagła zmiana wartości prądu.

Badanie zagrożenia porażeniowego podczas prowadzenia akcji gaśniczej

Badaniom poddano zagrożenie porażeniowe, które może wystąpić w sytuacjach przedstawionych na rysunku 3.

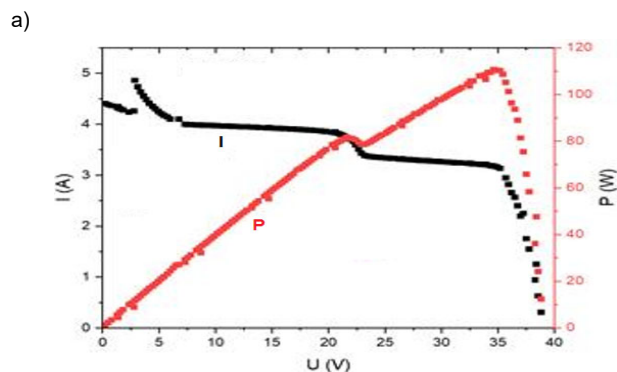


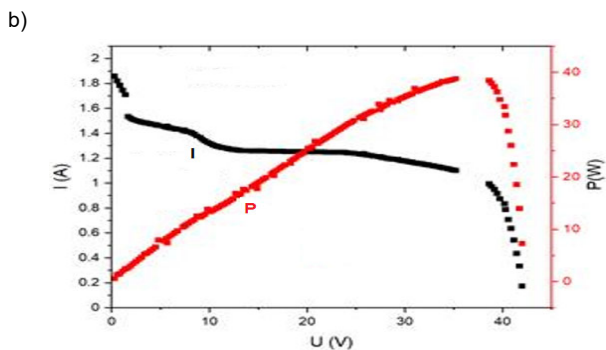
Rys.3. Zagrożenie porażeniowe strażaka podczas: a) kontaktu ręki strażaka/narzędzia strażackiego z modułem PV lub żyłą przewodu liniowego obwodu DC, b) podawania środka gaśniczego na moduł PV lub żyłę przewodu liniowego obwodu DC

Zagrożenie to może występować, nawet gdy instalacja DC jest odłączona od inwertera, a moduły PV uległy znacznemu uszkodzeniu. Badania zależności prądu i mocy generowanej od napięcia modułu PV po wyraźnym jego uszkodzeniu (rys. 4) wykazały zdolność do generowania znacznej mocy (rys. 5b) w stosunku do warunków przed uszkodzeniem (rys. 5a). Dotknięcie zacisku modułu PV lub żył przewodów DC spowoduje przepływ prądu rażeniowego. Ważne jest określenie spodziewanych wartości tego prądu, aby ocenić stopień ryzyka groźnego porażenia strażaka. W tym kontekście istotne są wartości rezystancji środków ochrony osobistej strażaków (rękawic, obuwia), które mogą ograniczyć wartość prądu rażeniowego. Ważna jest też rezystancja strumienia środka gaśniczego, która zależy m.in. od odległości pomiędzy strażakiem trzymającym prądownicę a polewanym elementem pod napięciem.



Rys.4. Uszkodzona powierzchnia modułu PV o danych znamionowych zawartych w tabeli 3





Rys.5. Wyniki pomiarów prądu zwarciovego (I) i mocy generowanej (P) w funkcji napięcia (U) modułu PV o danych z tabeli 3. Moduł: a) nieuszkodzony, b) uszkodzony jak na rysunku 4

Tabela 3. Dane znamionowe badanego modułu PV w warunkach STC (Standard Test Conditions) [30]

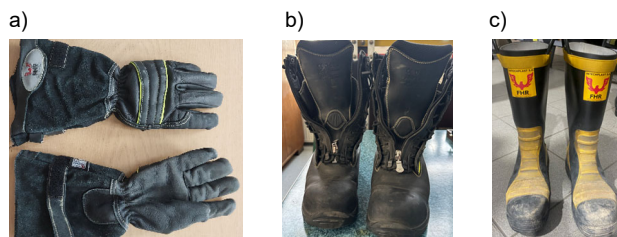
Producent	Swiss Solar
Model	IBEX 132 MHC-EIGER
Moc maksymalna (P_{max})	495 W
Napięcie obwodu otwartego (U_{OC})	48,67 V
Prąd zwarciovym (I_{SC})	13,13 A
Napięcie znamionowe (U_{mpp})	40,44 V
Prąd przy mocy maksymalnej (I_{mpp})	12,24 A



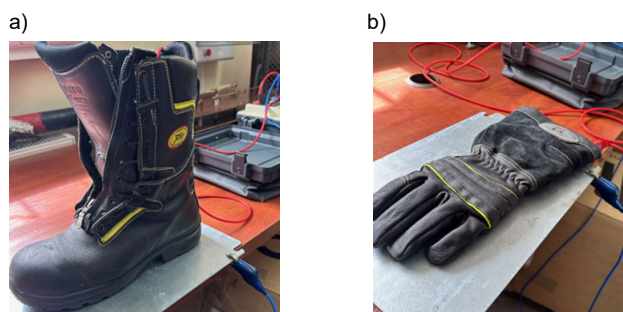
Rys.6. Wyznaczanie rezystywności słupa wody w rurce szklanej

W ramach pierwszej grupy badań zmierzono rezystancję nieuszkodzonych środków ochrony osobistej strażaków, zarówno w warunkach, gdy są one suche, jak i po zmożeniu wodą z instalacji wodociągowej. Rezystywność wykorzystanej wody wynosiła $12,8 \Omega m$ na podstawie pomiaru w układzie z rysunku 6 i w temperaturze około $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Badane elementy (rękawice, buty) zanurzono w naczyniu z wodą na czas 5 min, a następnie zostały z niego wyjęte i po 1 min wykonano pomiary rezystancji. Pomiar na mokro ma odwzorować możliwy stan rękawic/obuwia podczas gaszenia wodą. Na rysunku 7 przedstawiono typowe środki ochrony osobistej strażaków, natomiast na rysunku 8 wybrane środki w trakcie pomiarów. Pomiary rezystancji wykonano miernikiem BM25 firmy Megger dla trzech wartości napięcia pomiarowego: $U_{pom} = 500, 1000$ i 2500 V . Jedną elektrodę pomiarową umieszczono wewnątrz butów/rękawic, a drugą pod podeszwą butów lub pod rękawicami (rys. 8).



Rys.7. Środki ochrony osobistej strażaków: a) rękawice, b) obuwie strażackie skórzane, c) obuwie strażackie dielektryczne

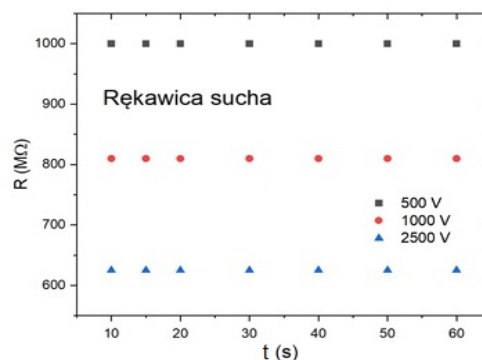


Rys.8. Badane obuwie strażackie skórzane (a) i rękawice (b) umieszczone na jednej z elektrod pomiarowych

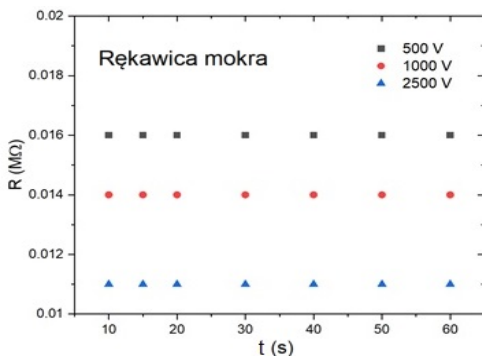
Napięcie przykładano przez czas 60 s i w trakcie pomiarów dokonywano kolejnych odczytów rezystancji. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach od 9 do 11.

Jak widać z rysunków 9-11, dla danych warunków pomiaru wartości odczytane z miernika zmieniają się w czasie, podobnie jak w przypadku badania rezystancji izolacji urządzeń elektrycznych, i jest to zjawisko normalne. Za miarodajny odczyt, świadczący o stanie izolacji, należy przyjąć ten po 60 s. Wartości rezystancji dla tego czasu zawarto w tabeli 4. W ostatnim wierszu tabeli 4 zamieszczono, dla porównania, wyniki pomiarów rezystancji powszechnie dostępnego obuwia sportowego. Dla tego typu obuwia pomiary wykonano przy napięciu 500 V.

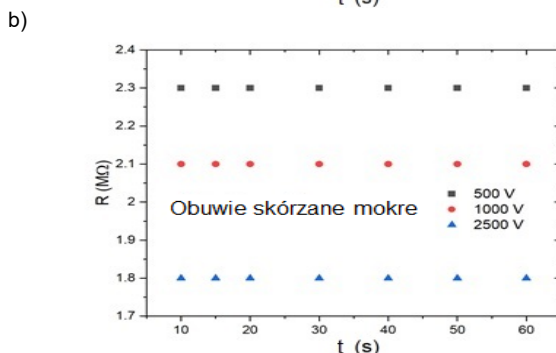
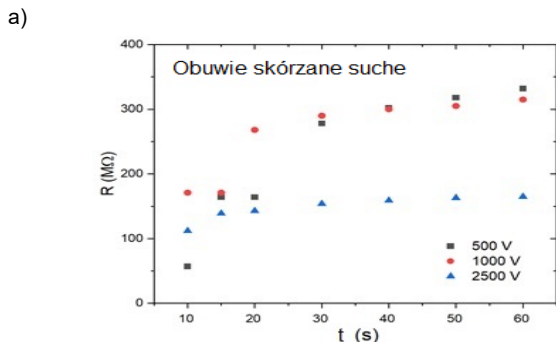
a)



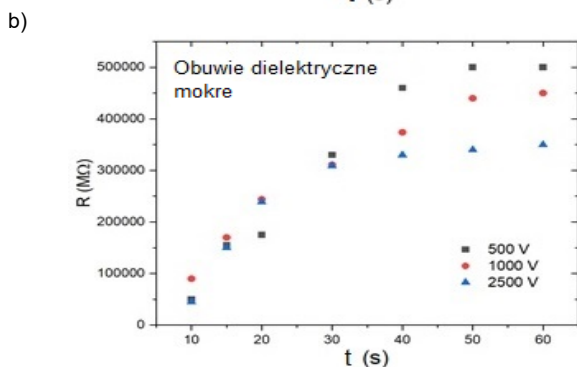
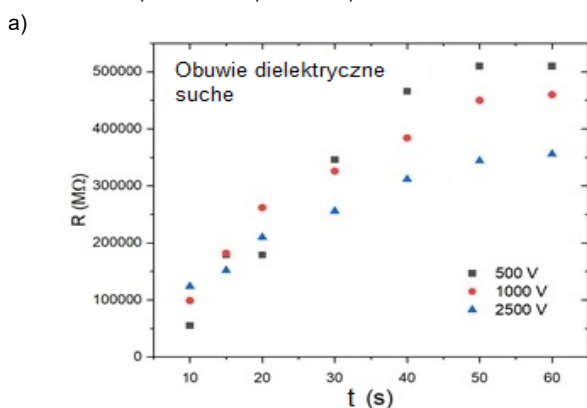
b)



Rys.9. Rezystancja (R) rękawicy w funkcji czasu (t) pomiaru, dla trzech wartości napięcia pomiarowego (500, 1000 i 2500 V). Rękawica: a) sucha, b) mokra



Rys.10. Rezystancja (R) obuwia strażackiego skórzanego w funkcji czasu (t) pomiaru, dla trzech wartości napięcia pomiarowego (500, 1000 i 2500 V). Obuwie: a) suche, b) mokre



Rys.11. Rezystancja (R) obuwia strażackiego dielektrycznego w funkcji czasu (t) pomiaru, dla trzech wartości napięcia pomiarowego (500, 1000 i 2500 V). Obuwie: a) suche, b) mokre

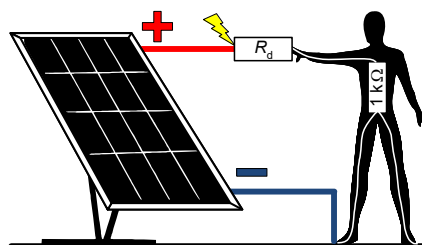
Mając wyniki pomiarów rezystancji środków ochrony osobistej strażaków, wyznaczono wartości spodziewanego prądu rażeniowego zakładając najgorszy przypadek, czyli jednoczesne dotknięcie przez strażaka bieguna dodatniego (+) i ujemnego (-) instalacji PV. Założono, że rezystancja ciała człowieka wynosi 1 k Ω i mogą w obwodzie rażeniowym występować dodatkowe rezystancje (np. rękawic, obuwia). Przedstawiono to na schemacie z rysunku 12. Do obliczeń przyjęto wartości napięcia DC:

- 1000 V, które może wystąpić w instalacji fotowoltaicznej, jest stosunkowo wysokie i niekorzystne z punktu widzenia rażenia,
- 500 V, zbliżone do instalacji domowych.

Rezystancje dodatkowe przyjęto stosownie do napięć pomiarowych (500 V lub 1000 V). Wartości tych rezystancji wybrano dla warunków niekorzystnych, czyli dla rękawic/obuwia mokrych. W tabeli 5 zawarto wyniki obliczeń spodziewanego prądu rażeniowego.

Tabela 4. Wartości rezystancji badanych środków ochrony osobistej odczytane po 60 s od przyłożenia napięcia pomiarowego

Przedmiot badań z rys. 7	Rezystancja (M Ω) dla napięcia pomiarowego					
	500 V		1000 V		2500 V	
	suche	mokre	suche	mokre	suche	mokre
rękawica	1000	0,016	800	0,014	625	0,011
obuwie skórzane	325	2,3	300	2,1	150	1,8
obuwie dielektryczne	500000	500000	450000	450000	350000	350000
obuwie sportowe	180	0,019	---	---	---	---



Rys.12. Analizowany obwód rażeniowy podczas dotyku obu biegunów obwodu DC. Rezystancja ciała człowieka 1 k Ω , R_d – zastępcza rezystancja dodatkowa (np. rękawic, obuwia)

Tabela 5. Wyniki obliczeń spodziewanego prądu rażeniowego. Napięcie instalacji $U_{DC} = 500$ V lub 1000 V, rezystancja ciała człowieka $R = 1$ k Ω

Rezystancja		Prąd rażeniowy	
dodatkowa, R_d	obwodu rażeniowego	przy napięciu 500 V	przy napięciu 1000 V
brak	1 k Ω *	500 mA	1000 mA
rękawica mokra $R_d = 16$ k Ω (500 V) $R_d = 14$ k Ω (1000 V)	17 k Ω 15 k Ω	30 mA	67 mA
obuwie skórzane mokre $R_d = 2,3$ M Ω (500 V) $R_d = 2,1$ M Ω (1000 V)	$\approx 2,3$ M Ω $\approx 2,1$ M Ω	0,2 mA	0,5 mA
obuwie skórzane mokre + rękawica mokra $R_d = 2,316$ M Ω (500 V) $R_d = 2,114$ M Ω (1000 V)	$\approx 2,3$ M Ω $\approx 2,1$ M Ω	0,2 mA	0,5 mA
obuwie dielektryczne mokre $R_d = 500$ G Ω (500 V) $R_d = 450$ G Ω (1000 V)	≈ 500 G Ω ≈ 450 G Ω	$\rightarrow 0$ mA	$\rightarrow 0$ mA
obuwie sportowe mokre $R_d = 19$ k Ω (500 V)	20 k Ω	25 mA	---

* prąd rażeniowy ogranicza tylko rezystancja ciała człowieka

Oceniając wyniki obliczeń zamieszczone w tabeli 5 można stwierdzić, że zastosowanie nawet mokrych rękawic czy obuwia ogranicza ryzyko groźnego porażenia,

ponieważ prąd rażeniowy nie przekracza umownej granicy bezpieczeństwa 80 mA przyjętej w tabeli 2. Jeżeli zastosować buty dielektryczne, to zgodnie z oczekiwaniem, wartość prądu rażeniowego jest bliska 0.

Analizując wyniki zawarte w tabelach 4 i 5 oraz wyniki pomiarów przedstawione w raporcie [31] należy zaznaczyć, że bardzo istotny jest sposób przeprowadzania pomiarów. W przypadku obuwia skózanego zanurzonego do znacznej wysokości (kilkanaście centymetrów) w wodzie w trakcie pomiarów, wartości prądu rażeniowego mogą być wyraźnie wyższe [31]. Wydaje się jednak, że prawdopodobieństwo wystąpienia takich warunków podczas akcji gaśniczej przy urządzeniach pod napięciem nie jest wysokie.

Na rezystancję środków ochrony osobistej ma też wpływ ich uszkodzenie (druga grupa badań). Rękawice i obuwie uszkodzono mechanicznie przebijając je gwoździem. Wyniki pomiarów rezystancji zawarto w tabeli 6. Porównanie tych wyników z wynikami z tabeli 4 pozwala stwierdzić wyraźny spadek rezystancji (w szczególności na mokro) po uszkodzeniu zarówno rękawic, jak i obuwia. Jest to bardzo istotny wniosek dla służb ratowniczych, aby szczególnie zadbać o dobry stan środków ochrony osobistej osób biorących udział w gaszeniu urządzeń pod napięciem.

Tabela 6. Wartości rezystancji uszkodzonych środków ochrony osobistej odczytane po 60 s od przyłożenia napięcia pomiarowego

Przedmiot badań	Rezystancja (MΩ) dla napięcia pomiarowego					
	500 V		1000 V		2500 V	
	suche	mokre	suche	mokre	suche	mokre
rękawica	12	<0,001	10	<0,001	7,5	<0,001
obuwie skórzane	120	<0,001	98	<0,001	76	<0,001
obuwie dielektryczne	300	<0,001	240	<0,001	190	<0,001

W trzeciej grupie badań wykonano pomiary rezystancji suchych narzędzi wykorzystywanych przez strażaków podczas akcji gaśniczej. Badano rezystancję (rys. 13) bosaka oraz izolowanego narzędzia typu Halligan (inne nazwy to *Halligan bar*, *Hooligan*). Otrzymane wartości rezystancji są bardzo wysokie (powyżej 600 GΩ), co przedstawia tabela 7.

a)



b)



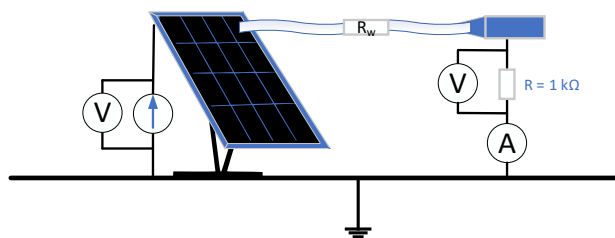
Rys.13. Narzędzia używane przez strażaków podczas akcji gaśniczej: a) Halligan, b) bosak

Tabela 7. Wartości rezystancji narzędzi używanych przez strażaków podczas akcji gaśniczej, odczytane po 60 s od przyłożenia napięcia pomiarowego (wartości średnie rezystancji z trzech pomiarów)

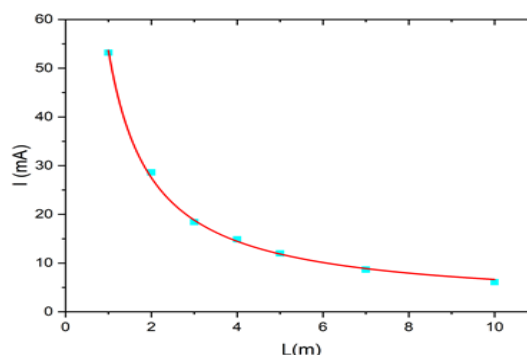
Przedmiot badań z rys. 13	Rezystancja dla napięcia pomiarowego		
	500 V	1000 V	2500 V
	GΩ	TΩ	TΩ
Halligan	>600	>3	>6
bosak	>600	>3	>6

W dalszych badaniach sprawdzono, jakiego prądu rażeniowego można się spodziewać podając środek gaśniczy (wodę o rezystywności 12,8 Ωm) na elementy instalacji fotowoltaicznej pod napięciem DC 1000 V. Schemat układu będącego przedmiotem badań przedstawiono na rysunku 14. W przygotowanym obwodzie rezystywnym uwzględniono rezystor 1 kΩ odwzorowujący rezystancję ciała człowieka.

Środek gaśniczy podawano z różnych odległości, a wyniki pomiarów zamieszczono na rysunku 15. Przy długości strumienia wody równej 1 m wartość prądu rażeniowego wynosiła około 53 mA, natomiast przy długości 10 m było to około 5 mA (nie jest przekroczona granica 1 określona w tab. 2 na 25 mA). Nawet przy najmniejszej długości strumienia wody (1 m) prąd rażeniowy nie przekracza granicy 2 z tabeli 2, czyli umownej granicy bezpieczeństwa wynoszącej 80 mA.



Rys.14. Schemat stanowiska do badania prądu rażeniowego (prąd płynący przez rezystancję R) podczas podawania środka gaśniczego na elementy instalacji fotowoltaicznej. R_w – rezystancja strumienia środka gaśniczego (wody), $R = 1 \text{ k}\Omega$ – rezystancja ciała człowieka



Rys.15. Zależność prądu rażeniowego (I) od długości (L) strumienia środka gaśniczego dla badań przeprowadzonych wg schematu z rysunku 14

Teoretyczną wartość prądu rażeniowego dla sytuacji przedstawionej na rysunku 14 można wyliczyć z następującej zależności:

$$(1) \quad I = \frac{U}{(R + R_{w-obl})} = \frac{U}{\left(R + \frac{\rho \cdot L}{s}\right)}$$

gdzie: I – prąd rażeniowy, U – napięcie instalacji fotowoltaicznej (przyjęto 1000 V), R_{w-obl} – rezystancja strumienia środka gaśniczego, R – rezystancja ciała człowieka (przyjęto 1 kΩ), s – przekrój strumienia środka gaśniczego, L – długość strumienia środka gaśniczego, ρ – rezystywność środka gaśniczego.

Zakładając, że środkiem gaśniczym jest woda o rezystywności 12,8 Ωm i stanowi zwarty strumień o jednakowej średnicy 2 cale (2×2,54 cm) na całej długości, to na podstawie (1) prąd rażeniowy przy strumieniu o długości 1 m powinien wynosić:

$$(2) \quad I = \frac{1000V}{\left(1000\Omega + \frac{12,8\Omega m \cdot 1m}{0,00203m^2}\right)} = 137mA$$

co jest wartością ponad dwa razy większą niż prąd zmierzony (53 mA). Wynika to z faktu, że strumień na odcinku prądowca strażacka – gaszony obiekt stanowi w praktyce mieszaninę wody i powietrza, a zatem nie można go traktować jako jednolity słup wody, dla którego w prosty sposób oblicza się rezystancję R_{w-obl} i prąd I stosując zależność (1). Obliczenia wykonane na podstawie (1) i (2) są więc w stosunku do warunków rzeczywistych obciążone błędem w kierunku bezpiecznym.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz i badań można przedstawić następujące wnioski:

- Środki ochrony przeciwporażeniowej podstawowej (np. obudowy o odpowiednim stopniu ochrony IP) oraz ochrony przy uszkodzeniu (np. izolacja podwójna lub wzmocniona po stronie DC) nie gwarantują skutecznej ochrony podczas prowadzenia akcji gaśniczej.
- Zastosowanie przeciwpożarowego wyłącznika prądu i wyłączenie zasilania, nawet od strony DC instalacji, nie jest wystarczające podczas bezpośredniego kontaktu strażaka lub środka gaśniczego z modułami PV.
- Rękawice i obuwie strażackie dają ograniczoną ochronę przed porażeniem prądem elektrycznym – ich powierzchnia powinna być nieuszkodzona i w miarę możliwości sucha.
- Zagrożenie porażeniem podczas podawania środka gaśniczego (wody) zależy od napięcia instalacji, przewodności wody i długości jej strumienia. Odpowiednia długość tego strumienia pozwala ograniczyć prąd rażeniowy do poziomu, który nie zagraża życiu człowieka.

Wydaje się być uzasadnione opracowanie dla pracowników straży pożarnej szczegółowych wytycznych postępowania podczas akcji gaśniczej w obiektach z fotowoltaicznymi źródłami energii.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Stanisław Czapp, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: stanislaw.czapp@pg.edu.pl
mgr inż. Konrad Seklecki, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: konrad.seklecki@pg.edu.pl
dr inż. Leszek Litzbarski, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: leszek.litzbarski@pg.edu.pl
dr hab. inż. Marek Olesz, prof. PG, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: marek.olesz@pg.edu.pl

LITERATURA

- [1] Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2022, poz. 1225)
- [2] Czapp S., Ochrona przeciwporażeniowa w sieciach i instalacjach niskiego napięcia, PWN, Warszawa 2023
- [3] PN-HD 60364-4-41:2017-09 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed porażeniem elektrycznym
- [4] PN-HD 60364-7-712:2016-05 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 7-712: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji – Fotowoltaiczne (PV) układy zasilania
- [5] RCD Selection for SolarEdge Inverters – Application Note, SolarEdge, 2018
- [6] Czapp S., The effect of earth fault current harmonics on tripping of residual current devices, *Przegląd Elektrotechniczny*, 85 (2009), nr 1, 196-201

- [7] Czapp S., Horiszny H., Simulation of residual current devices operation under high frequency residual current, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 2, 242-247
- [8] Czapp S., Dobrzynski K., Klucznik J., Lubosny Z., Low-frequency tripping characteristics of residual current devices. 2017 IEEE International Conference on Environmental and Electrical Engineering & 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC /I&CPS Europe), Milan, Italy, 6-9 June 2017, doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977445
- [9] Czapp S., Testing sensitivity of A-type residual current devices to earth fault currents with harmonics, *Sensors*, 20 (2020), 2044, <https://doi.org/10.3390/s20072044>
- [10] Xie P., Fang Z., Hu J., Yang J., Zhu G., Tripping characteristics of residual current devices under different working conditions. 3rd IEEE conference on Energy Internet and Energy System Integration, Changsha, China, 8-10 November 2019
- [11] Cheng D., Zhang B., Xiong S., Xie Z., Xue Z., Residual current detection prototype and simulation method in low voltage DC system, *IEEE Access*, 10 (2022), 51100-51109
- [12] Hallemsans L. et al., Modelling and Experimental Validation of a Pole-To-Ground Protection Device in Low Voltage DC Microgrids, 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe), Lyon, France, 07-11 September 2020
- [13] Czapp S., Residual current devices in installations with PV energy sources, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 12, 100-104, doi: 10.15199/48.2022.12.25
- [14] Czapp S., Tariq H., Cieslik S., Behavior of residual current devices at earth fault currents with DC component, *Sensors*, 22 (2022), 8382, <https://doi.org/10.3390/s22218382>
- [15] Seklecki K., Litzbarski L., Wójcik J., Cieślakowska Z., Włás M., Grochowski J., Instalacje fotowoltaiczne w budownictwie wielorodzinnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 100 (2024), nr 3, 79-81, doi:10.15199/48.2024.03.13
- [16] Czaja P., Bezpieczeństwo pożarowe instalacji fotowoltaicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 97 (2021), nr 12, 105-108, <https://doi.org/10.15199/48.2021.12.19>
- [17] Szultka S., Czapp S., Tomaszewski A., Ullah H., Evaluation of Fire Hazard in Electrical Installations Due to Unfavorable Ambient Thermal Conditions, *Fire*, (6) 2023; nr 2, 41. <https://doi.org/10.3390/fire6020041>
- [18] Seklecki K., Litzbarski L.S., Adamowicz M., Grochowski J., PV installations and the safety of residential buildings, *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych*, 4 (2023) 1-10, <https://dx.doi.org/10.37105/iboa.177>
- [19] Czosnyka M., Budzisz J., Algorytm wykrywania iskrzenia w detektorach AFDD, XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo Elektryczne ELSAF 2023”, Karpacz, 19-22.09.2023, 67-76
- [20] Johnson J., Oberhauser Ch., Montoya M., Fresquez A., Gonzalez S., Patel A., Crosstalk nuisance trip testing of photovoltaic DC Arc-Fault Detectors, 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, TX, USA, 3-8 June 2012
- [21] PN-EN 61008-1:2013-05 Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB) – Część 1: Postanowienia ogólne
- [22] PN-EN 62423:2013-06 Wyłączniki różnicowoprądowe typu F i typu B z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym i bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego
- [23] Integrated Rapid Shutdown Device Scoutbox450, GNE, Informacja o produkcie
- [24] Wyłącznik przeciwpożarowy Q, Q3 Energieelektronik GmbH & Co. KG, Informacja o produkcie
- [25] RC62: Recommendations for fire safety with PV panel installations, *Fire Protection Association*, ver. 2, 2023
- [26] Tommasini R., Pons E., Palamara F., Turturici C., Colella P., Risk of electrocution during fire suppression activities involving photovoltaic systems, *Fire Safety Journal*, 67 (2014), 35-41
- [27] Standardowe zasady postępowania podczas zdarzeń z instalacjami fotowoltaicznymi (PV), *Komenda Wojewódzka Państwowej Straży Pożarnej w Łodzi*, Wydanie pierwsze, Łódź, 24.09.2020 r.
- [28] IEC TS 60479-1:2016-07 Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects
- [29] Czapp S., Residual current devices in electric vehicles charging installations, *Przegląd Elektrotechniczny*, 100 (2024), nr 2, 62-65, doi: 10.15199/48.2024.02.11
- [30] IBEX 132MHC-EiGER 495-500, IBEX high efficiency monocrystalline solar modules with half cell technology, *Swiss Solar*, 2022, Informacja o produkcie
- [31] Backstrom R., Dini D.A., P.E., Firefighter Safety and Photovoltaic Installations Research Project, *Underwriters Laboratories Inc.*, USA, 2011

