

Narażenie pracowników zajmujących się instalacją, serwisem oraz demontażem systemów fotowoltaicznych na szkodliwe czynniki fizyczne

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę czynników fizycznych, które stanowią zagrożenie dla pracowników zajmujących się systemami fotowoltaicznymi w sensie instalatorsko-eksploatacyjnym. Wskazano także działania na poziomie indywidualnym, organizacyjnym i systemowym, które powinny być podjęte aby zminimalizować ryzyka zagrożeń.

Abstract. This paper presents an analysis of physical factors, which pose a threat to workers engaged in photovoltaic systems in the installation and operating sense. Individual, organizational and systemic actions are indicated, which should be taken to minimize the risk of hazard. (**Photovoltaic system workers' exposure to harmful physical factors during installation, service and disassembly**)

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo i higiena pracy, system fotowoltaiczny, czynniki szkodliwe, zapobieganie zagrożeniom zdrowotnym
Keywords: occupational safety and health, photovoltaic system, harmful factors, preventing adverse health effects.

Wstęp

Obecnie na świecie, spośród różnych źródeł energii elektrycznej zaliczanych do OZE, obserwuje się lawinowy rozwój systemów fotowoltaicznych. Na koniec roku 2014 na całym świecie całkowita moc zainstalowana systemów fotowoltaicznych wynosiła 178 GW. W samym roku 2014 zainstalowano systemy o mocy 40 GW [1].

Główny podział systemów fotowoltaicznych jest dokonywany ze względu na ich współpracę z zewnętrzną siecią elektroenergetyczną (najczęściej rozdzielczą) [2]. Wyróżnia się zatem systemy on-grid czyli systemy, które są połączone z zewnętrzną siecią elektroenergetyczną i mogą do niej oddawać energię oraz systemy off-grid, które zasilają pewną grupę odbiorników w wydzielonej instalacji lub sieci (bez połączenia z siecią rozdzielczą). Oba rodzaje systemów fotowoltaicznych mogą być również wyposażone w zasobnik energii - zwykle w postaci baterii akumulatorów chemicznych.

W Polsce, zgodnie z danymi Urzędu Regulacji Energetyki, zainstalowane są systemy fotowoltaiczne o mocy jedynie 99 MW [3], podczas gdy w Niemczech, kraju o podobnych do Polski warunkach nasłonecznienia, moc systemów fotowoltaicznych przekracza 40 GW. Jednakże, zgodnie z obecnymi trendami cenowymi oczekuje się, że w Polsce ok. 2020-2025 r. systemy fotowoltaiczne zaczną być ekonomicznie opłacalne dla użytkowników indywidualnych działających w modelu rozproszonym (retail grid parity) [4], a tym samym nastąpi znaczący przyrost zainstalowanych systemów fotowoltaicznych. Mało widocznym utrudnieniem szybkiego rozwoju systemów fotowoltaicznych w Polsce może być niedostateczna liczba wykwalifikowanej kadry technicznej. W wielu przypadkach, wśród osób zajmujących się systemami fotowoltaicznymi, widoczny jest nieodpowiedni poziom wiedzy w zakresie występujących zagrożeń fizycznych podczas instalacji, obsługi i demontażu systemów fotowoltaicznych. Warto wskazać, że do szkodliwych czynników fizycznych należą: praca na niebezpiecznej wysokości na śliskim podłożu, przenoszenie ręcznie dużych ciężarów z ostrymi krawędziami, upadek z dachu na ziemię elementów systemu fotowoltaicznego, porażenie prądem elektrycznym, porażenie piorunem, pożar elementów systemu fotowoltaicznego, wybuch gazu z akumulatora oraz środowisko ciepłe.

Praca na niebezpiecznej wysokości na śliskim podłożu

Prace związane z instalacją, serwisem lub demontażem systemów fotowoltaicznych przeważnie

odbywają się na wysokości, przede wszystkim na powierzchniach dachowych. Nie dotyczy to tylko sytuacji, gdy panele fotowoltaiczne montowane są stosunkowo nisko nad powierzchnią gruntu. W zależności od warunków atmosferycznych, powierzchnie dachowe mogą być śliskie, np. w czasie opadów atmosferycznych czy bezpośrednio po takich opadach. Na budynkach występują zarówno dachy płaskie, jak też i pochyłe, co stwarza dodatkowe zagrożenia bezpieczeństwa pracowników. Praca na wysokości według [5] to praca wykonywana na powierzchni znajdującej się na wysokości co najmniej 1,0 m nad poziomem podłogi lub ziemi. Należy zaznaczyć, że również część prac przy instalacjach fotowoltaicznych posadowionych na powierzchni gruntu również może zostać zakwalifikowana jako praca na wysokości.

Można założyć, że na dachach, na których odbywać się będą prace przy instalacjach fotowoltaicznych, nie będzie zainstalowanych balustrad składających się z poręczy ochronnych umieszczonych na wysokości co najmniej 1,1 m i krawężników o wysokości co najmniej 0,15 m z poprzeczką umieszczoną między poręczą a krawężnikiem lub wypełnieniem tej przestrzeni w sposób uniemożliwiający wypadnięcie osób. W takiej sytuacji należy stosować inne środki ochrony, między innymi należy:

- zapewnić bezpieczeństwo przy komunikacji pionowej i dojścia do stanowiska pracy,
- zapewnić stabilność rusztowań, jeśli są wykorzystywane oraz ich odpowiednią wytrzymałość na przewidywane obciążenia,
- przed rozpoczęciem użytkowania rusztowania należy dokonać odbioru technicznego w trybie określonym w odrębnych przepisach.

Należy też mieć na uwadze, że nie jest dopuszczalny montaż, demontaż i eksploatacja rusztowania w sąsiedztwie napowietrznych linii elektrycznych, będących pod napięciem, jeżeli odległość rusztowania od skrajnych przewodów linii elektrycznej jest mniejsza niż:

- a) 3 m dla linii o napięciu znamionowym nieprzekraczającym 1 kV;
- b) 5 m dla linii o napięciu znamionowym powyżej 1 kV, a nieprzekraczającym 15 kV;
- c) 10 m dla linii o napięciu znamionowym powyżej 15 kV, a nieprzekraczającym 30 kV;
- d) 15 m dla linii o napięciu znamionowym powyżej 30 kV, a nieprzekraczającym 110 kV;
- e) 30 m dla linii o napięciu znamionowym powyżej 110 kV.

Dotyczyć to może sytuacji, gdy budynek, na dachu którego prowadzone są prace, jest zasilany z sieci elektroenergetycznej przez przyłącze napowietrzne.

Zagrożeniem przy pracy na niebezpiecznej wysokości, szczególnie na śliskim podłożu, jest upadek. Przy upadkach z wysokości na organizm człowieka działają duże siły mogące doprowadzić do uszkodzenia narządów wewnętrznych bez widocznego uszkodzenia skóry. Wśród skutków upadku z wysokości można wymienić: stłuczenia, krwiaki mózgu i urazy kręgosłupa szyjnego, stłuczenia serca i płuc, stłuczenia narządów trzewnych, wstrząs, złamania kości i urazy stawów.

Przy pracy na wysokości, a w szczególności na dachach zabudowań, należy też brać pod uwagę zagrożenia elektryczne. Nawet niskie poziomy natężenia prądu mogą powodować mimowolne skurcze mięśni, co może doprowadzić do upadku z dachu.

Środkami ostrożności wymaganymi przy wszystkich pracach na dachu są: zapewnienie bezpiecznych środków umożliwiających wejście i zejście z dachu (minimum to drabina), zabezpieczenie krawędzi dachu oraz siatki bezpieczeństwa lub systemy amortyzacji upadku, jeśli nie jest możliwe lub uzasadnione zabezpieczenie krawędzi lub zapewnienie podestów roboczych.

Otwory w zadaszeniu, w pobliżu których prowadzone są prace (czyli odległość do dwóch metrów), powinny być zakryte podestem wytrzymałym ciężar człowieka.

Przy pracach krótkotrwałych (czas liczony w minutach) minimalne wymogi to zapewnienie bezpiecznego dostępu na poziom dachu oraz bezpieczne warunki pracy na dachu (odpowiednio zamontowana drabina dachowa lub szelki bezpieczeństwa z linką w przypadku dachów płaskich).

Jako przykład zapobiegawczych działań organizacyjnych należy wymienić przeszkolenie pracowników w zakresie zagrożeń związanych z pracą na wysokości oraz na śliskim podłożu oraz każdorazowe udzielenie instruktażu przed rozpoczęciem prac. Również do działań organizacyjnych zaliczyć należy kontrolę stosowanych środków pomocniczych, takich jak drabiny czy podesty oraz ocenę wytrzymałości dachu. Niezbędne jest przed przystąpieniem do prac opracowanie stosownych zasad postępowania. Zapobiegawcze działania systemowe to prowadzenie prac zgodnie z regulacjami zawartymi w [5]. Również wykorzystywane rusztowania i podesty ruchome wiszące powinny spełniać wymagania określone odpowiednio w odrębnych przepisach [6] oraz w Polskiej Normie [7]. Zapobiegawcze działania indywidualne to przede wszystkim stosowanie odpowiedniej odzieży roboczej a szczególnie obuwia, które nie powinno mieć śliskiej bądź nadmiernie zużytej podeszwy.

Nie są dostępne jeszcze wiarygodne statystyki dotyczące wypadków i ich skutków podczas instalacji, serwisu a szczególnie demontażu systemów fotowoltaicznych. Dostępne dane na temat liczby upadków z wysokości zakończonych śmiercią wskazują, że prace związane z montażem instalacji solarnych na dachach są kilkukrotnie bardziej niebezpieczne, niż odpowiednie prace prowadzone w elektrowniach wiatrowych czy jądrowych.

Przenoszenie ręcznie dużych ciężarów z ostrymi krawędziami

W przypadku montażu lub demontażu systemów fotowoltaicznych zazwyczaj występuje konieczność transportowania dużych ciężarów, również w kierunku pionowym (wprowadzenie ciężkiego przedmiotu na dach budynku). Pojedynczy panel fotowoltaiczny ma masę mogącą przekraczać 20 kg. Jego rozmiar może sięgać ok. 1,6m x 1m, co dodatkowo utrudnia transport. W czasie ręcznych prac transportowych może dochodzić do: urazów

kręgosłupa, skręcenia stawów, zerwania ścięgien lub więzadeł, złamania kości, uszkodzenia nerwów oraz zapalenia mięśni.

Przy konieczności ręcznego przemieszczania ciężarów, proponowana jest następująca hierarchia środków zapobiegawczych, eliminujących bądź ograniczających ryzyko [8]:

- a. eliminacja – uniknięcie ręcznego przemieszczania ciężarów poprzez zastosowanie mechanicznych lub zasilanych energią elektryczną urządzeń do przemieszczania (np. przenośniki).
- b. środki techniczne – wzięcie pod uwagę zastosowania urządzeń pomocniczych, typu dźwigi, wózki.
- c. środki organizacyjne – rotacja na stanowiskach pracy, wprowadzanie długich przerw. Dotyczy to sytuacji, gdy nie są stosowane środki zapobiegawcze wymienione w pierwszych dwóch punktach.
- d. szkolenia w zakresie prawidłowego przemieszczania ciężarów oraz informowanie o ryzyku i szkodliwych skutkach ręcznego przemieszczania ciężarów.

W przypadku przedmiotów z ostrymi krawędziami, a do takich można zaliczyć pojedyncze panele fotowoltaiczne, ostre krawędzie powinny być osłonięte. Konieczność osłaniania dotyczy także wystających elementów przemieszczanych przedmiotów w sposób uniemożliwiający zsuniecie się osłon.

Upadek z dachu na ziemię elementów systemu fotowoltaicznego

W skład systemu fotowoltaicznego wchodzi wiele elementów, największe z nich to panele fotowoltaiczne. Ciężkimi i niebezpiecznymi elementami są również baterie akumulatorów, choć nie są montowane na powierzchniach dachowych. Oczywistym niebezpieczeństwem upadku z dachu na ziemię elementów systemu fotowoltaicznego jest możliwość ich uszkodzenia a nawet zniszczenia. Głównym zagrożeniem jest możliwość potrącenia lub przygniecenia pracownika spadającym przedmiotem. Najbardziej narażonymi częściami ciała człowieka na uderzenia spadających przedmiotów są głowa i stopy. Groźnymi następstwami uderzenia w głowę spadającym przedmiotem są: wstrząśnienie mózgu, ucisk mózgu oraz krwiak wewnątrzczaszkowy. Wstrząśnienie mózgu powoduje przejściowe zaburzenia pracy mózgu, dość szybko odzyskiwana jest przytomność co nie oznacza braku innych następstw. Objawy ucisku mózgu (dezorientacja, utrata przytomności), będącego zagrożeniem życia, mogą wystąpić nawet do kilku dni po wypadku. Objawami krwiaków podczaszkowych są: poszerzenia źrenic po stronie przeciwnej do urazu, postępujący niedowład strony przeciwnej, pogarszanie się stanu świadomości, narastający ból głowy, nudności, wymioty, bradykardia, wzrost ciśnienia tętniczego. Objawy te występują po okresie względnie dobrej świadomości po wcześniejszej utracie przytomności. W celu minimalizacji zagrożeń wynikających z upadku z dachu na ziemię przedmiotów, należy od strony organizacyjnej wyodrębnić obszar zagrożony, udzielając też pracownikom szkolenia i instruktażu dotyczącego zachowania się w strefach zagrożonych a także działań po wystąpieniu wypadku. Niezbędne jest stosowanie kasków ochronnych. W celu ochrony stóp przed urazami (przebiecie podeszwy lub upadek przedmiotu) należy stosować odpowiednie obuwie ochronne. Przed przebieciem najlepiej chroni cienka, odporna na korozję wkładka stalowa, od niedawna produkowane są również wkładki z kevlaru. Ochrona przed spadającymi przedmiotami to podnoski stalowe lub z tworzywa sztucznego, których dobór zależy od stopnia zagrożenia uderzeniem i jego potencjalnej energii. Obuwie

ochronne charakteryzuje się wytrzymałością na uderzenie o energii do 100 J, obuwiu bezpiecznym – do 200 J. Do ochrony śródstopia stosuje się np. nakładki ze stali bądź tworzywa sztucznego.

Porażenie prądem elektrycznym

Skutki oddziaływania prądu elektrycznego na organizm ludzki można podzielić na dwie grupy: fizyczne i patofizjologiczne [9]. Skutki fizyczne to: znamiona prądowe w miejscu kontaktu ciała z elementem pod napięciem, oparzenia wewnętrzne np. stawów, oparzenia łukiem elektrycznym, oparzenia zewnętrzne wskutek dotknięcia rozgrzanych przewodników, uszkodzenia wzroku łukiem elektrycznym, uszkodzenia słuchu od dźwięków związanych z łukiem elektrycznym oraz urazy mechaniczne po upadku na skutek porażenia prądem elektrycznym.

Skutki patofizjologiczne to: reakcje mięśni nie wywołujące skutków zagrażających zdrowiu i życiu (mrowienie, uczucie ciepła, ból), skurcze mięśni, podwyższone ciśnienie krwi, zatrzymanie pracy serca oraz migotanie komór serca,

O końcowym efekcie przepływu prądu elektrycznego przez organizm ludzki decydują: rodzaj prądu (stały, przemienny), częstotliwość prądu, droga i kierunek przepływu prądu, wartość prądu, czas trwania przepływu oraz cechy osobnicze rażonego. Na wielkość prądu rażeniowego bezpośredni wpływ ma napięcie rażeniowe, impedancja ciała człowieka i warunki środowiskowe (temperatura, wilgotność, przewodność ścian i podłóg, powierzchnie styku ciała z elektrodami).

Na typowy system fotowoltaiczny składają się dwie sieci, połączone falownikiem (inwerterem): stałoprądową (DC) odbierającą energię z paneli fotowoltaicznych i przemiennoprądową (AC) zasilającą odbiorniki. Dodatkowo systemy on-grid posiadają element łączący instalację wewnętrzną (właściciela systemu PV) z siecią zewnętrzną, którego głównym zadaniem jest odłączenie sieci zewnętrznej w przypadku zaniku zasilania z zewnątrz. Realizuje się w ten sposób ochronę przeciwporażeniową sieci zewnętrznej przed negatywnymi skutkami, jakie mogłoby mieć zasilanie tej sieci przez system fotowoltaiczny. Służy to np. ochronie pracowników spółki dystrybucyjnej, którzy naprawiają uszkodzenia sieci rozdzielczej. Z punktu widzenia elektroenergetyki systemy fotowoltaiczne należy traktować jako generatory energii elektrycznej. System fotowoltaiczny nawet jeżeli jest wyłączony (w sensie wyłączonego falownika) i odłączony od sieci zewnętrznej nadal stwarza poważne zagrożenie [10]. Należy pamiętać, że każdy oświetlony panel fotowoltaiczny jest źródłem energii elektrycznej. Co prawda napięcie generowane przez pojedynczy panel wynosi około kilkudziesięciu woltów, to jednak napięcie na połączonych szeregowo panelach może wynieść od 600 do nawet 1000 V [11,12]. W zależności od wieku/generacji i szczegółów konstrukcyjnych systemu fotowoltaicznego (m.in. sposobu uziemienia, sposobu ochrony przed przeciążeniami, sposobu odłączania energii z poszczególnych paneli) stanowią one mniejsze lub większe zagrożenie dla pracowników [13,14]. Systemy fotowoltaiczne tak jak każde inne urządzenia elektryczne są narażone na występowanie zwarcia. Zwarcia mogą powstać na skutek działania czynników fizycznych (np. przenikanie wody lub wilgoci do systemu fotowoltaicznego [15]) lub działania człowieka (np. poprzez wykonanie przez pracownika niewłaściwych operacji łączeniowych w obwodach elektrycznych). Jednym ze skutków występowania zwarcia jest pojawienie się znacznych temperatur szczególnie groźnych dla łatwopalnych materiałów znajdujących w pobliżu systemu fotowoltaicznego [16]. Bardzo niebezpiecznym, ze względu na skutki jakie może wywołać, jest łuk elektryczny będący

następstwem wystąpienia zwarcia łukowego. Zwarcie takie może powstać w wyniku zastosowania złych rozwiązań konstrukcyjnych, warunków środowiska oraz ludzkich błędów [17]. Łuk elektryczny stanowi zagrożenie dla pracowników wykonujących przeglądy lub naprawy systemów fotowoltaicznych. Pracownik taki może doznać: oparzenia (efekt działania ciepła łuku elektrycznego), uszkodzenia odsłoniętych części ciała (twarzy i skóry oraz tkanek podskórnych) [18], zapalenia spojówek i rogówek. rumienia skóry (efekt działania promieniowania ultrafioletowego) a nawet pożaru ubrania. Oprócz tego łuk elektryczny może spowodować nagły, niepożądany ruch pracownika w wyniku pojawienia się fali ciśnieniowej uderzeniowej będącej skutkiem gwałtownego nagrzania powietrza wzdłuż osi łuku. Pracownik może upaść i odnieść dalsze obrażenia. Najczęściej łuk elektryczny pojawia się w przypadku urządzeń wysokiego napięcia.

Ze względu na to, że zarówno same panele fotowoltaiczne jak i przewody odbierające energię elektryczną mogą ulegać uszkodzeniom mechanicznym (co może powodować pojawianie się napięcia na różnych elementach), należy traktować pracę przy nierozmontowanej instalacji fotowoltaicznej jak pracę w pobliżu napięcia lub pracę pod napięciem. Z tego powodu każdy pracownik powinien przejść stosowne szkolenie i używać stosownego sprzętu izolacyjnego – jest to przykład działania zapobiegawczego o charakterze organizacyjnym. Przed przystąpieniem do prac powinno się zweryfikować czy na częściach metalowych systemu PV nie występuje niebezpieczne napięcie (w stosunku do potencjału ziemi lub innych urządzeń dostępnych jednocześnie). Weryfikacji tej należy dokonać przy użyciu woltomierza (lub równoważnego urządzenia służącego do weryfikacji potencjału) o odpowiednim zakresie pomiarowym zarówno dla napięć stałych jak i przemiennych, którego poprawne działanie dodatkowo zostanie potwierdzone przed i po pomiarach [11,13]. Nie można tej czynności wykonywać popularnym próbnikiem neonowym, gdyż nie działa on dla napięć stałych. Taki środek ostrożności pozwoli uniknąć także porażań od ewentualnych potencjałów zawleczonych na instalację PV z sieci prądu przemiennego. Przy rozłączaniu paneli fotowoltaicznych należy zweryfikować (przy pomocy amperomierza cęgowego) czy w rozłączanym obwodzie nie płynie prąd elektryczny. Pozwoli to uniknąć obrażeń związanych z łukiem elektrycznym powstającym przy rozłączaniu pracującej instalacji stałego napięcia – jest to przykład działania zapobiegawczego o charakterze indywidualnym. Wymienione zagrożenia porażeniowe i sposoby ich unikania są charakterystyczne dla systemów PV. Aktualny zbiór norm wydanych przez Polski Komitet Normalizacyjny dotyczący systemów PV obejmuje ponad 50 norm (wraz z aktualizacjami ponad 60 arkuszy) wprowadzającymi głównie normy europejskie w języku angielskim. Normy te powołują się na kilkadziesiąt innych norm z różnych dziedzin. Do istotniejszych, których stosowanie może mieć wpływ na bezpieczeństwo porażeniowe, należy wskazać normę PN-EN 62446-1:2016-08 [19], która porządkuje wymagania dotyczące dokumentacji, odbiorów, utrzymania i nadzoru systemów PV podłączonych do sieci. Innymi istotnymi normami są PN-HD 60364-7-712:2016-05 [20], PN-EN 50521:2009/A1:2012 [21] oraz PN-EN 50618:2015-03 [22]. W przypadku systemów fotowoltaicznych, które generują napięcie dochodzące do 1000 V należy umieścić tabliczki ostrzegawcze informujące pracowników o ryzyku pojawienia się łuku elektrycznego. Do działań na poziomie systemowym zaliczyć należy: przestrzeganie zaleceń dotyczących montażu i łączenia elementów elektrycznych (pochodzących od producenta lub producentów poszczególnych elementów). Pomocne mogą

być normy niemieckie DIN VDE 0 100 [23] dotyczące zaleceń montażu i łączenia elementów elektrycznych) oraz wytyczne wydane przez amerykańską organizację OSHA (Occupational Safety and Health Administration Agency), które zalecają w przypadku systemów fotowoltaicznych korzystanie m.in. z osobistego ochronnego wyposażenia (PPE – Personal Protective Equipment).

Porażenie piorunem

W polskich warunkach klimatycznych wypadki spowodowane wyładowaniami atmosferycznymi czyli piorunami, najczęściej występują w okresie od maja do września. Oznacza to poważne zagrożenie dla prac przy instalacjach fotowoltaicznych, gdyż z reguły będą one wykonywane w porze letniej a dodatkowo bardzo często na dachach budynków lub czasem na nieosłoniętych terenach płaskich, bez bliskich elementów wysokich (drzewa czy budynki). Śmiertelność wśród osób porażonych piorunem wynosi aż 40%.

Zagrożeniem dla ludzi są prądy udarowe płynące podczas uderzeń piorunów i przeważnie osiągające natężenie prądu do 30 kA w czasie kilku mikrosekund. Około 5% wyładowań może osiągnąć natężenie większe od 100 kA. Na skutek wyładowania atmosferycznego może nastąpić bezpośrednie uderzenie człowieka przez piorun oraz przepływ prądu rażeniowego, rozprzyskającego się od miejsca uderzenia pioruna.

Zagrożenia wyładowaniem atmosferycznym dzieli się na 4 grupy [24]:

- bezpośrednie uderzenie pioruna, wówczas prąd rażeniowy pioruna wnika zwykle przez głowę i po przepłynięciu przez ciało rozprasza się w ziemi,
- porażenie boczne występuje, gdy dochodzi do przebicia elektryczne warstwy powietrza między uderzonym piorunem pnim drzewa a rażoną osobą. Efektem zazwyczaj jest opalenie włosów na tułowiu lub kończynach, zwęglenie ubrania, uszkodzenie bielizny,
- porażenie napięciem krokowym występuje, gdy prąd wyładowania pioruna rozpryskuje się w ziemi, tworząc niebezpieczną wartość gradientu potencjału.
- porażenie wskutek dotknięcia występuje, gdy człowiek dotyka przewodzącego obiektu, w który uderzył piorun. Często poszkodowanym towarzyszą mniej lub bardziej rozległe oparzenia.

Porażenie piorunem a dokładniej przepływ prądu udarowego przez ciało człowieka, może doprowadzić do fibrylacji komór serca lub zahamowania czynności układu oddechowego. Występują także oparzenia, uszkodzenie słuchu lub przejściowy paraliż kończyn i zanik czucia, ustępujące po kilku godzinach. Może także dojść do uszkodzenia osłon mielinowych, co jest przyczyną powstawania zwań w mózgu. Pojawiają się problemy z koncentracją, zaburzenia pamięci, czasem stany depresyjne, zmiany osobowości i bóle głowy. Występują również obrażenia mechaniczne na skutek upadku. W czasie burz, podczas występowania zagrożenia uderzeniem pioruna, nie wolno prowadzić prac na dachach budynków oraz przy liniach elektroenergetycznych. Najlepszym rozwiązaniem jest chronienie się w zamkniętych budynkach lub samochodach. W terenie otwartym (montaż systemów fotowoltaicznych np. na polu lub łące) najlepiej jest usiąść na ziemi w miejscu położonym jak najniżej.

Pożar elementów systemu fotowoltaicznego

Pożar, stanowiący niekontrolowany proces spalania, zawsze sprzyja powstawaniu obszarów o wysokiej temperaturze. Wydziela się wtedy duża ilość ciepła, która może doprowadzić do zapłonu dalszych materiałów palnych. System fotowoltaiczny rzadko bywa źródłem

pożaru [25] pod warunkiem, że został on prawidłowo zaprojektowany i zmontowany. Istotny wpływ na rozwój i powstanie pożaru ma miejsce instalacji takiego systemu. Jeżeli jest to duży system fotowoltaiczny, z reguły znajduje się on na specjalnie wyznaczonym miejscu (np. na ziemi) przez co ryzyko rozprzyskowania się ognia jest ograniczone. Natomiast małe systemy fotowoltaiczne zwykle są zintegrowane bezpośrednio z obiektem do którego dostarczają energię elektryczną (np. poprzez ich lokalizację na dachu). W takim przypadku pożar systemu fotowoltaicznego stanowi poważne zagrożenie dla tego obiektu, gdyż system może być zainstalowany obok łatwo palnych materiałów stanowiących np. podłogę. Istnieje wiele potencjalnych przyczyn pożarów systemów fotowoltaicznych. Zaliczyć do nich można: osiągnięcie niebezpiecznej temperatury przez elementy składowe systemu, występowanie zwarców, pojawienie się łuku elektrycznego, zły stan lub zła eksploatacja urządzeń elektrycznych. Dodatkowo, czynnikami zwiększającymi ryzyko pojawienia się pożaru są liczba połączeń oraz starzenie się elementów systemów. Oprócz powyższych czynników, pożar systemu fotowoltaicznego może być również wywołany nieświadomie przez pracownika wykonującego pracę przy takim systemie, który np. pali tytoń. Najczęstszą przyczyną pożarów systemów fotowoltaicznych jest osiągnięcie znacznej temperatury przez elementy metalowe lub szklane poddane długotrwałej ekspozycji na promieniowanie słoneczne. Temperatura ta może osiągać wartości przekraczające 80°C [26]. Szczególną ostrożność należy zachować w przypadku prac związanych z puszkami przyłączeniowymi. Przykładowo, jeżeli pracownik wykona złe połączenia znajdujących w puszcze diód bypassowych może doprowadzić do jej nagrzania i w skrajnym przypadku pożaru. Pracownik narażony na oddziaływanie cieplne może doznać zaburzenia temperatury ciała. Jej podwyższenie do 39°C stwarza ryzyko utraty przytomności, zaś do 43°C – udar cieplny [25], ścięcie białka w komórkach organizmu, zatrzymanie wybranych procesów metabolicznych oraz denaturację białek [18]. Jeszcze większy wzrost temperatury, powyżej 50°C, powoduje martwicę naskórka. Pracownik może doznać obrażeń skóry w wyniku jej kontaktu z rozgrzanyymi gazami unoszonymi przez powietrze. Skutkiem napromieniowania cieplnego jest również uczucie bólu, które może pojawić się jeśli gęstość strumienia promieniowania cieplnego na człowieka wyniesie około 2,5 kW/m² [25]. Za powstanie pożarów mogą również odpowiadać źle eksploatowane, wyeksploatowane lub uszkodzone elementy takie jak kable czy falowniki. W przypadku kabli uwagę należy zwrócić na to, aby nie dopuścić do uszkodzenia ich izolacji. Uwagę należy zwrócić również na to, aby kable nie były prowadzone luźno, nie występowały żadne ich uszkodzenia mechaniczne jak również należy unikać bezpośredniego połączenia kabli z palnymi materiałami dachowymi. W przypadku falowników konieczne jest ich właściwe podłączenie i umiejscowienie w pomieszczeniu łatwo dostępnym dla obsługi, wyposażonym w system wykrywania pożaru jak również nieposiadającym palnych elementów na przykład drewnianych paneli [16]. Im bardziej rozległy system, tym jest więcej połączeń i potencjalnych możliwości pojawienia się pożaru. Niekorzystnym czynnikiem jest również wiek poszczególnych elementów. Należy pamiętać, że stosowane materiały w ciągu około 20 lat (typowy czas eksploatacji systemu fotowoltaicznego) będą się starzeć co pośrednio będzie wpływać na zachowanie fabrycznych parametrów i trwałość. W celu ograniczenia ryzyka wystąpienia pożaru systemu fotowoltaicznego oraz jego skutków należy podjąć odpowiednie działania

zapobiegawcze. Na poziomie indywidualnym zaleca się, aby pracownicy mający bezpośredni kontakt z nagrzanymi częściami wyposażeni byli w ochronne rękawice [26]. W celu ograniczenia oparzeń pracownicy powinni uważać na występowanie zjawiska „hot spot” polegającego na nagrzewaniu się komórek systemu w wyniku rozpraszania ciepła zamiast jego zamiany na energię elektryczną [27]. Sytuacja ta może również wystąpić w przypadku dotyknięcia zacienionych komórek. Przykładem zapobiegania na poziomie organizacyjnym może być unikanie zbliżania się do urządzeń elektrycznych bez odzieży ochronnej [28]. Na poziomie systemowym zaleca się przestrzeganie zaleceń normy niemieckiej DIN EN 61730-1/A1, dotyczącej wymagań konstrukcyjnych dla systemów fotowoltaicznych w celu zapewnienia m.in. ochrony od pożaru [29] oraz wytycznych wydanych przez amerykańską organizację OSHA, które zalecają w przypadku systemów fotowoltaicznych korzystanie m.in. z osobistego ochronnego wyposażenia (PPE).

Wybuch gazu z akumulatora

Ryzyko pojawienia się pożaru systemu fotowoltaicznego łączy się bezpośrednio z możliwością powstania wybuchu. Wybuch to gwałtownie przebiegający proces spalania, który może być zainicjowany poprzez powstanie mieszaniny palnego gazu z powietrzem o odpowiednim stężeniu [30]. W systemach fotowoltaicznych często korzysta się z akumulatorów różnego typu [31]. Sporą część stosowanych akumulatorów stanowią modele kwasowo-ołowiane, które charakteryzują się powstaniem wodoru jako efektu procesu ich ładowania. Wodór razem z powietrzem tworzy mieszaninę, która może stać się wybuchową jeżeli zostanie przekroczone określone stężenie zawarte między dolną a górną granicą wybuchowości, np. w stosunku objętościowym, przy temperaturze 20°C dla wodoru 4-75% [30]. Poniżej dolnej granicy nie powstanie wybuch gdyż jest zbyt mała szybkość reakcji utleniania, zaś powyżej górnej granicy brakuje dostatecznej ilości tlenu do wybuchu [30]. W trakcie normalnej pracy ryzyko wybuchu jest małe. Szczególnie niebezpiecznym zjawiskiem związanym z wybuchami jest powstanie fali uderzeniowej. W wyniku jej pojawienia się może dojść do mechanicznego zniszczenia danego obiektu, a w konsekwencji do upadku lub uderzenia pracownika [30]. Pracownik będący w pozycji stojącej stanowi przeszkodę dla fali uderzeniowej. Obrażenia wybuchowe mogą być stopnia: pierwszego (obrażenia głowy, uszu), drugiego (urazy penetrujące poprzez dużą prędkość odłamków), trzeciego (urazy tępe od upadku, uderzenia) i czwartego (oparzenia termiczne, chemiczne). W celu ograniczenia ryzyka wybuchu gazów (nie tylko wodoru) z różnego rodzaju stosowanych akumulatorów w systemach fotowoltaicznych zaleca się stosowanie środków ochrony. Na poziomie indywidualnym pracownicy powinni być wyposażeni w odpowiednią odzież ochronną [26]. Na poziomie organizacyjnym należy dążyć do tego, aby baterie znajdowały się w pomieszczeniach o dobrej wentylacji, gdzie występuje mała możliwość pojawienia się iskier mogących zainicjować wybuch. Na poziomie systemowym zaś zaleca się stosowanie do tych samych wytycznych co w przypadku pożaru systemu fotowoltaicznego.

Środowisko cieplne

Pracownicy zajmujący się instalacją, serwisem i demontażem systemów fotowoltaicznych są narażeni na szkodliwe środowisko cieplne. Prace te odbywają się typowo w porach roku innych niż zima. Instalacja małego systemu fotowoltaicznego na dachu budynku jednorodzinnego trwa najczęściej kilka dni. Montaż bardzo

dużego systemu o dużej mocy może trwać nawet kilka miesięcy. W lecie i miesiącach około letnich zagrożenie stanowią: promieniowanie słońca, wysoka temperatura powietrza, wilgotność powietrza, opady deszczu lub gradu oraz ruch powietrza. W zimie zagrożenie stanowią: niska temperatura powietrza, opady deszczu lub śniegu oraz ruch powietrza. Stan powierzchni dachu, na którym znajduje się system fotowoltaiczny, wynikający ze środowiska cieplnego jest istotnym elementem bezpieczeństwa pracowników. Zagrożenia stanowią: śnieg, lód oraz woda na powierzchni dachu. Wilgotność powietrza ma wpływ na sprawność organizmu [31]. Suche powietrze odbiera ustrojowi wodę, co powoduje wysychanie skóry i błon śluzowych oraz zmniejszenie odporności na zakażenie. Nadmierna wilgotność przy podwyższonej temperaturze otoczenia (lato) utrudnia organizmowi oddawanie ciepła, co w konsekwencji może powodować przegrzanie [31]. Nadmierna wilgotność przy obniżonej temperaturze (zima) powoduje szybką utratę ciepła. Stres cieplny może zagrażać życiu pracownika. Wysoka temperatura otoczenia powoduje gwałtowny wzrost temperatury ciała, a organizm nie jest w stanie sam wystarczająco się ochłodzić. Niska temperatura otoczenia stanowi obciążenie dla układu krążenia – zwiększa się zapotrzebowanie mięśnia sercowego na tlen. U pracowników z chorobami krążenia może dojść do ujawnienia się objawów choroby [31]. Niska temperatura to również ryzyko odmrożenia. Do działań zapobiegawczych na poziomie indywidualnym zaliczyć można: stosowanie odpowiednich ubrań roboczych dostosowanych do środowiska cieplnego, stosowanie kremów z wysokim filtrem UV na nieostonowaną skórę, zapewnienie odpowiedniej ilości płynów w czasie pracy w podwyższonej temperaturze oraz uzupełnianie makroelementów, przede wszystkim chlorku sodu, które zmniejszają ryzyko wystąpienia przykurczów mięśni, a także zapewnienie ciepłych płynów przy obniżonej temperaturze. Do działań zapobiegawczych na poziomie organizacyjnym należą: wprowadzenie obowiązkowych przerw w trakcie pracy o czasie trwania zależnym od środowiska cieplnego, stosowanie odpowiednich systemów zabezpieczeń przed upadkiem oraz zakaz picia napojów alkoholowych. W przypadku ekstremalnych warunków atmosferycznych nie należy wykonywać żadnych czynności na dachu budynku.

Wnioski

W przypadku szkodliwych czynników fizycznych związanych z instalacją, serwisem oraz demontażem systemów fotowoltaicznych, główne źródła zagrożeń to: praca na wysokości, porażenie prądem elektrycznym lub piorunem, pożar elementów systemu fotowoltaicznego i towarzyszące temu zjawiska cieplne. Zagrożenia wynikające z czynników chemicznych to głównie: szkodliwe substancje chemiczne znajdujące się w ogniach fotowoltaicznych oraz akumulatorach zintegrowanych z systemem fotowoltaicznym. Zagrożenia o charakterze biologicznym są związane z niebezpiecznymi zwierzętami, które mogą być spotykane w otoczeniu urządzeń systemów fotowoltaicznych. Natomiast zagrożenia o charakterze psychofizycznym wynikają głównie ze stresu wywołanego pracą w niebezpiecznym środowisku. Pracownicy powinni być świadomi złożoności zagrożeń jakie mogą wystąpić w związku z instalacją, serwisem oraz demontażem systemów fotowoltaicznych. W niniejszym artykule, poza opisem możliwych zagrożeń, przedstawiono określone działania i sposoby zmniejszania zagrożenia dla zdrowia pracowników związanych z szerokokorozumianą obsługą systemów fotowoltaicznych.

Autorzy: dr hab. inż. Dariusz Baczyński, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: dariusz.baczyński@ee.pw.edu.pl;
 dr inż. Piotr Helt, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: piotr.helt@ee.pw.edu.pl;
 mgr inż. Piotr Kapler, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: piotr.kapler@ee.pw.edu.pl;
 dr hab. inż. Paweł Piotrowski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: pawel.piotrowski@ee.pw.edu.pl;
 dr hab. inż. Sylwester Robak, prof. nzw. PW, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: sylwester.robak@ee.pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] SolarPower Europe, Global Market Outlook, For Solar Power / 2015–2019, http://helapco.gr/pdf/Global_Market_Outlook_2015_-2019_lr_v23.pdf
- [2] McEvoy A., Markvart T., Castaner L., Practical Handbook of Photovoltaics. Fundamentals and Applications, Elsevier, (2012)
- [3] Urząd Regulacji Energetyki, Mapa odnawialnych źródeł energii, <http://www.ure.gov.pl/uremapoze/mapa.html>
- [4] Ministerstwo Energii, Energetyka. Polityka energetyczna Polski do 2050 roku, <http://bip.me.gov.pl/node/24670>
- [5] Rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy z późn. zm. (tekst jedn.: Dz. U. z 2003 r., nr 169, poz. 1650)
- [6] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych, Dz.U.2003.47.401, z późn. Zmianami
- [7] PN-EN ISO 14122-1:2016-08 - wersja angielska. Bezpieczeństwo maszyn -- Stałe środki dostępu do maszyn -- Część 1: Dobór stałych środków dostępu oraz ogólne wymagania dotyczące dostępu
- [8] Europejska Agencja Bezpieczeństwa i Zdrowia w Pracy, Zagrożenia i ryzyko związane z ręcznym przemieszczaniem ciężarów w miejscu pracy, https://osha.europa.eu/sites/default/files/publications/document/s/pl/publications/factsheets/73/Factsheet_73_-_Zagrozenia_i_ryzyko_zwiazane_z_recznym_przemieszczaniem_ciezarow_w_miejscu_pracy.pdf
- [9] Markiewicz H., Bezpieczeństwo w elektroenergetyce, WNT Warszawa, (2012)
- [10] Wohlgemuth J. H., Kurtz S. R., How can we make PV modules safer?, 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Austin, TX, 2012, pp. 003162-003165
- [11] Solar PV systems. User's maintenance guide. Australian Business Council for Sustainable Energy, <http://www.rpc.com.au/pdf/Solar%20PV%20Maintenance.pdf>
- [12] Oregon Solar Energy Industries Association, Solar Construction Safety, http://www.coshnetwork.org/sites/default/files/OSEIA_Solar_Safety_12-06.pdf
- [13] Hernandez J. C., Vidal P. G., Guidelines for protection against electric shock in PV generators, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24 (2009), nr 1, 274–282
- [14] Falvo M. C., Capparella S., Safety issues in PV systems: Design choices for a secure fault detection and for preventing fire risk, *Case Studies in Fire Safety*, 3 (2015), 1–16
- [15] Solar power system electrical safety, https://www.worksafe.qld.gov.au/_data/assets/pdf_file/0005/123854/Solar-power-system-electrical-safety-brochure.pdf
- [16] Understanding the Fire Hazards of Photovoltaic Systems, Allianz Risk Consulting, <http://www.agcs.allianz.com/assets/PDFs/ARC/Tech%20Talks/TTVol8-FireHazardsofPVSystems.pdf>
- [17] Kaźmierczak M., Zwarcia łukowe – doświadczenia eksploatacyjne w polskiej energetyce zawodowej i przemysłowej http://www.energotest.com.pl/uploads/media/Zwarcia_lukowe_doswiadczenia_eksploatacyjne.pdf
- [18] Gierlotka S., Łuk elektryczny i skutki jego działania na człowieka, *elektro.info*, 9 (2008), <http://www.elektro.info.pl/artukul/id1529,luk-elektryczny-i-skutki-jego-dzialania-na-czlowieka>
- [19] PN-EN 62446-1:2016-08, Systemy fotowoltaiczne (PV) -- Wymagania dotyczące badań, dokumentacji i utrzymania -- Część 1: Systemy podłączone do sieci -- Dokumentacja, odbiory i nadzór.
- [20] PN-HD 60364-7-712:2016-05, Instalacje elektryczne niskiego napięcia -- Część 7-712: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji -- Fotowoltaiczne (PV) układy zasilania
- [21] PN-EN 50521:2009/A1:2012, Złącza elektryczne do zastosowań w systemach fotowoltaicznych - Wymagania bezpieczeństwa i badania
- [22] PN-EN 50618:2015-03, Kable i przewody elektryczne do systemów fotowoltaicznych
- [23] DIN VDE 0100-600. Errichten von Niederspannungsanlagen, 2008
- [24] Gierlotka S., Wypadki porażenia ludzi od uderzenia pioruna, *elektro.info*, 7-8 (2011), 64-65
- [25] Sawicki T., Czynniki zagrażające bezpieczeństwu strażaków w warunkach pożarów. *Bezpieczeństwo Pracy*. 7-8 (2004), 35-38
- [26] Working Safely with Photovoltaic system, <https://www.wbdg.org/ccb/DOE/TECH/wksafe.pdf>
- [27] Taylor D. A., Occupational Health: On the Job with Solar PV. *Environ Health Perspect*, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2831982/>
- [28] Safety of people: Recommendations for DRRG Solar PV Systems https://www.dewa.gov.ae/images/smartinitiatives/Safety_of_People.pdf
- [29] DIN EN 61730. Photovoltaic (PV) module safety qualification- Part 1: Requirements for construction (IEC 61730-1:2004/A1:2011)
- [30] Musiał E., Instalacje i urządzenia elektroenergetyczne. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa, (2008)
- [31] Herlender K., Zielony M., Efektywne wykorzystanie odnawialnych źródeł energii pracujących na sieć wydzieloną. *Mechanizacja i Automatyza Górnictwa*. 8 (2011), nr 486, 35-39
- [31] Gałusza M., Poradnik BHP dla pracodawców oraz osób kierujących pracownikami. Tarbonus, Kraków (2008)