

## Wybrane zagadnienia ochrony odgromowej elektrowni jądrowych

**Streszczenie.** W artykule dokonano analizy zagadnień związanych z zapewnieniem ochrony odgromowej elektrowni jądrowych nowej generacji. Podkreślono podejście, które wyładowania atmosferyczne traktuje w przypadku obiektów nuklearnych jako zagrożenie klimatyczne. Omówiono koncepcje ochrony oraz kluczowe parametry prądu piorunowego mające wpływ na projektowanie instalacji odgromowych elektrowni jądrowych.

**Abstract.** The paper analyses into the challenges of providing lightning protection for a new generation of nuclear power plants. It highlights an approach that considers lightning strikes as a climatic hazard to such facilities. The discussion covers protection methods and key lightning parameters that influence the design of lightning protection systems. (Selected issues of lightning protection for nuclear power plants).

**Słowa kluczowe:** Wyładowania atmosferyczne, parametry wyładowań atmosferycznych, ochrona odgromowa, elektrownie jądrowe.

**Keywords:** Lightning, lightning parameters, lightning protection, nuclear power plants.

### Wstęp

Aktualnie coraz więcej uruchamianych jest na świecie elektrowni jądrowych (EJ) z reaktorami III/III+ generacji, a koncepcje reaktorów IV generacji są już bardzo zaawansowane [1,2]. Równolegle rozwijane są EJ typu SMR (ang. *Small Modular Reactor*), a nawet MMR (ang. *Micro Modular Reactor*), których liczba w systemie energetycznym docelowo będzie dużo większa niż wielkoskalowych elektrowni jądrowych [3].

Wszystkie wymienione wyżej obiekty nuklearne są wyposażone w wiele nowoczesnych i wrażliwych na zaburzenia elektromagnetyczne systemów cyfrowych i analogowych wchodzących w skład aparatury kontrolno-pomiarowej i automatyki (AKPiA), które odpowiadają za prawidłowe działania reaktora jądrowego. Stanowi to bardzo duże wyzwanie w zakresie zapewnienia ich bezawaryjnej pracy [4].

Urządzenia elektroniczne oraz linie transmisyjne mogą być narażone zarówno na oddziaływanie zewnętrznych zaburzeń intencjonalnych (terroryzm elektromagnetyczny) jak i nieintencjonalnych. W niniejszym artykule rozważane są naturalne zaburzenia elektromagnetyczne występujące w trakcie wyładowań atmosferycznych doziemnych oraz główne ich parametry wpływające na projektowanie systemów ochrony. Wskazano również na wyzwania stojące przed projektantami ochrony odgromowej elektrowni jądrowych, zaliczanych z pewnością do obiektów strategicznych z uwagi na potencjalne groźne skutki jakie mogą wystąpić w przypadku awarii reaktorów jądrowych.

### Szkody piorunowe w elektrowniach jądrowych

Dostępne są dane z raportów amerykańskich i francuskich informujące o szkodach piorunowych odnotowanych w elektrowniach jądrowych [5-7]. Pomimo pewnych różnic główne wnioski z opracowanych dokumentów są zbieżne. Przede wszystkim powszechnie przyjmuje się, że zagrożenie związane z przepięciami atmosferycznymi dochodzącymi do EJ od strony sieci elektroenergetycznych jest pomijalnie małe z uwagi na skuteczne, często zwielokrotnione, zabezpieczenia zainstalowane w liniach wysokiego napięcia. Dlatego też największe ryzyko szkód występuje podczas lokalnych uderzeń piorunów w bezpośrednim sąsiedztwie obiektów nuklearnych.

W raporcie amerykańskim wykonanym przez NRC (ang. *Nuclear Regulatory Commission*) i obejmującym lata 1980 – 1991 odnotowano 174 zdarzenia z udziałem

wyładowań atmosferycznych, a za główny czynnik wywołujący nieprawidłowe funkcjonowanie systemów EJ przyjęto lokalny wzrost potencjału elektrycznego GPR (ang. *Ground Potential Rise*) wokół miejsca uderzenia pioruna. Potencjał ten może przenosić się do obiektów EJ poprzez przewodzące konstrukcje i urządzenia usługowe powodując zagrożenie dla systemów elektrycznych i elektronicznych.

Kolejny raport NRC zlecił do Oak Ridge National Laboratory (ORNL) i został on wykonany na podstawie obserwacji 19 elektrowni jądrowych w okresie 1990 – 2000. Wnioski były bardziej konkretne i obejmowały łącznie 30 szkód piorunowych, z których aż 11 to awaryjne wyłączenia reaktorów jądrowych, natomiast 9 zdarzeń związanych było z utratą zasilania i koniecznością uruchamiania agregatów diesla. Ponadto w 2 przypadkach uszkodzona została wentylacja oraz 2 razy odnotowano uszkodzenie izolacji obudowy bezpieczeństwa reaktora jądrowego. Wymieniono również 6 zdarzeń bez konkretnej klasyfikacji.

Zastanawiające jest, że w pierwszym z raportów nie wymienia się ani jednego awaryjnego wyłączenia reaktora, podczas gdy w kolejnym okresie odnotowano ponad 10 takich zdarzeń. Może to wynikać z mało precyzyjnego charakteru pierwszego dokumentu (przekazanie raportowania do ORNL), a także rozwoju technologicznego, który wymusza wdrażanie coraz bardziej inteligentnych systemów automatyki zabezpieczeniowej.

Kolejne wyniki raportu, które zostaną tutaj przywołane dotyczą 19 francuskich elektrowni jądrowych (58 reaktorów i 2000 budynków), monitorowanych przez 30 lat (2000 reaktorolat pracy) pod kątem wystąpienia szkód piorunowych. Pomijając zagrożenie od wyładowań atmosferycznych uderzających w linie wysokiego napięcia lub w ich pobliżu poza terenem EJ skupiono się w raporcie na analizie takich efektów lokalnych oddziaływań piorunowych jak napięcia krokowe i dotykowe, uszkodzenia fizyczne obiektów i urządzeń spowodowane wyładowaniami bezpośrednimi oraz uszkodzenia sprzętu elektrycznego i elektronicznego na skutek występujących przepięć atmosferycznych. Ponadto wyróżniono dodatkowo zdarzenia, które nie były związane z trwałym uszkodzeniem aparatury kontrolno-pomiarowej i automatyki, ale były one przyczyną błędnego zadziałania tych urządzeń w wyniku oddziaływania impulsowego pola elektromagnetycznego LEMP (ang. *Lightning ElectroMagnetic Impulse*).

Z uwagi na rozbudowane procedury bezpieczeństwa, które obowiązują wszystkich pracowników EJ, w tym również zasady zachowania się w czasie burzy oraz bardzo

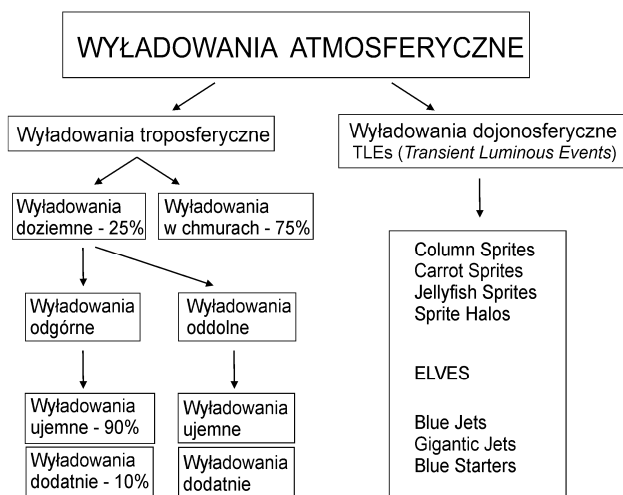
dokładną ekwipotencjalizację wszystkich przewodzących konstrukcji znajdujących się na terenie EJ nie odnotowano w czasie wyładowań atmosferycznych żadnych groźnych incydentów spowodowanych napięciami krokowymi i dotykowymi. W raportowanym okresie nie zarejestrowano również żadnych uszkodzeń fizycznych obiektów wywołanych bezpośrednimi wyładowaniami, co świadczy o skutecznej ochronie odgromowej. Przepięcia atmosferyczne były natomiast przyczyną uszkodzenia urządzeń w 51 przypadkach, natomiast 226 zdarzeń zakwalifikowano jako nieprawidłowe zadziaływanie systemów elektrycznych i elektronicznych bez ich trwałego uszkodzenia. Nie podano wprost informacji jakie były skutki uszkodzeń lub nieprawidłowego zadziaływania AKPIA i czy były one powodem awaryjnego wyłączenia reaktorów bądź też zaniku zasilania i koniecznością uruchamiania agregatów diesla.

Wszystkie wymienione wyżej udokumentowane w raportach szkody piorunowe wykazują jednoznacznie, że wyładowania atmosferyczne wpływają na bezpieczeństwo elektrowni jądrowych, a zatem wymagana jest kompleksowa ochrona odgromowa ze szczególnym uwzględnieniem eliminacji przepięć wywołanych piorunowym impulsem LEMP oraz lokalnym wzrostem potencjału GPR.

### Wyładowania atmosferyczne i ich parametry istotne w ochronie odgromowej

Najbardziej ogólny podział wyładowań atmosferycznych wyróżnia wyładowania troposferyczne i wyładowania ponad chmurami w kierunku jonosfery (dojonosferyczne), których przyczyną występowania są te pierwsze (rys. 1) [8,9].

Realne zagrożenie dla obiektów naziemnych stanowią wyładowania pomiędzy chmurą i ziemią, przy czym wrażliwe urządzenia elektroniczne mogą być również zakłócane przez silne wyładowania w chmurach, np. typu CID (ang. *Compact Intracloud Discharges*) [10]. Mając na uwadze wyładowania doziemne najczęściej - w domyśle - brane są pod uwagę wyładowania odgórne. Należy jednak pamiętać, że obudowy bezpieczeństwa, w których pracuje reaktor jądrowy mają wysokość około 60 m, a zatem mogą one także inicjować rozwój wyładowań oddolnych.



Rys.1. Klasyfikacja wyładowań atmosferycznych

Zarówno w przypadku wyładowań odgórnych jak i oddolnych rozróżnia się wyładowania ujemne i dodatnie, przy czym znacznie częściej zachodzi transfer ładunku ujemnego do ziemi. Z drugiej strony skrajne wartości parametrów takie jak wartość szczytowa prądu

piorunowego, energia właściwa, czy też przenoszony ładunek, istotne zwłaszcza podczas oddziaływań bezpośrednich, są większe w przypadku wyładowań dodatnich. Jeśli chodzi o przepięcia indukowane piorunowym impulsem elektromagnetycznym LEMP to osiągają one największe wartości szczytowe w trakcie kolejnych ujemnych wyładowań głównych RS (ang. *Return Stroke*) mających bardzo duże stromości narastania czoła fali prądowej [11].

Najbardziej istotne parametry z punktu widzenia oddziaływań wyładowań bezpośrednich i pobliskich przedstawiono w tabeli 1. Podczas szacowania ryzyka szkód piorunowych bardzo ważny jest również ogólny wskaźnik informujący o średniej gęstości wyładowań doziemnych na kilometr kwadratowy w ciągu jednego roku. Parametr ten zostanie omówiono oddzielnie z uwagi na jego bardzo ważną rolę w projektowaniu systemów ochrony odgromowej.

Tabela 1. Parametry wyładowań atmosferycznych i ich wartości odpowiadające pierwszemu poziomowi ochrony odgromowej LPL I zgodnie z normą PN-EN 62305-1 [12]

Parametry wyładowań atmosferycznych istotne w ochronie odgromowej (LPL I)
Oddziaływanie wyładowań bezpośrednich
1. Maksymalne i minimalne wartości szczytowe prądu wyładowania głównego (RS) dodatniego: $I_{RS\max} = 200 \text{ kA}, I_{RS\min} = 3 \text{ kA} \quad (10/350 \mu\text{s})$
2. Energia właściwa: $E / R = \int i^2 dt$ $E / R = 10 \text{ MJ}/\Omega$
3. Ładunek elektryczny: - wyładowanie główne dodatnie: $q_{RS} = 100 \text{ C}$ - prąd długotrwały: $q_{CC} = 100 \text{ C}$ - całkowity ładunek: $q_T = 300 \text{ C}$
Oddziaływanie wyładowań pobliskich
1. Odległość kanału piorunowego i jego parametry geometryczne 2. Maksymalne wartości szczytowe prądu wyładowania głównego ujemnego: - pierwsze wyładowanie główne ujemne: $I_{RS\max} = 100 \text{ kA} \quad (1/200 \mu\text{s})$ - kolejne wyładowanie główne ujemne: $I_{RS\max} = 50 \text{ kA} \quad (0,25/100 \mu\text{s})$
3. Maksymalna średnia stromość czoła fali kolejnego wyładowania głównego (RS) ujemnego: $S_{\max} = (di/dt)_{\max} = 200 \text{ kA}/\mu\text{s}$
4. Prędkość rozchodzenia się fali prądowej wyładowania głównego: $v_{RS} < c \quad c - \text{prędkość światła w próżni}$

Należy pamiętać, iż przedstawiony w tabeli 1 podział na wyładowania bezpośrednie i pobliskie może być mylący, bowiem w trakcie wyładowań bezpośrednich mamy do czynienia ze złożonym oddziaływaniem, gdyż oprócz prądu wpływającego w miejscu uderzenia pioruna na konkretny obiekt działa również impuls LEMP generowany przez kanał

piorunowy znajdujący się bezpośrednio nad tym obiektem, który dodatkowo indukuje przepięcia w instalacjach elektrycznych i elektronicznych, podobnie jak w przypadku wyładowań pobliskich.

Warto jeszcze podkreślić jeden z mniej znanych parametrów, który został zamieszczony dodatkowo w tabeli 1, a mianowicie prędkość przemieszczania się czoła fali prądowej wyładowania głównego, która często jest pomijana w analizach chociaż posiada istotny wpływ na poziom generowanych przepięć indukowanych, jak to zostało pokazane w tabeli 2. Przedstawione w niej wyniki symulacji komputerowych indukowanych napięć w pętli prostokątnej o boku 5 m, usytuowanej w odległości 100 m i 500 m od kanału piorunowego o wysokości 7,5 km i prostopadłego do powierzchni ziemi, wykonano dla modelu MTL (ang. *Modified Transmission Line with Linear Attenuation*) z liniowym tłumieniem fali prądowej i wartością szczytową prądu u podstawy kanału wynoszącą 12 kA (typowe kolejne wyładowanie główne). Na podstawie otrzymanych wyników łatwo zauważyć, iż przy założonym wzroście prędkości fali można spodziewać się nawet dwukrotnie większych wartości szczytowych indukowanych napięć [13].

Tabela. 2. Porównanie napięć indukowanych w pętli prostokątnej o boku 5 m usytuowanej w odległości 100 m i 500 m od kanału piorunowego dla dwóch różnych prędkości przemieszczania się fali prądowej kolejnego wyładowania głównego

$r = 100 \text{ m}$ $v = 130 \text{ m}/\mu\text{s}$	$r = 100 \text{ m}$ $v = 250 \text{ m}/\mu\text{s}$	$r = 500 \text{ m}$ $v = 130 \text{ m}/\mu\text{s}$	$r = 500 \text{ m}$ $v = 250 \text{ m}/\mu\text{s}$
5 kV	9,5 kV	0,75 kV	1,75 kV

Z punktu widzenia ochrony odgromowej oprócz parametrów samego wyładowania atmosferycznego ważna jest również intensywność burz z piorunami na danym terenie. Wskaźnikiem wykorzystywanym w dokumentach normalizacyjnych jest  $N_g$ . Określa on średnią gęstość wyładowań doziemnych na kilometr kwadratowy w ciągu jednego roku. Dzięki rozwojowi algorytmów detekcji stosowanych w systemach lokalizacji wyładowań atmosferycznych LLS (ang. *Lightning Location System*), coraz częściej sugeruje się podczas analizy ryzyka zastąpienie  $N_g$  parametrem  $N_{sg}$ , który określa średnią liczbę punktowych trafień na kilometr kwadratowy w ciągu roku wieloprądowych wyładowań głównych będących składowymi doziemnego wyładowania atmosferycznego.



Rys.2. Przykład wyładowania atmosferycznego z dwoma trafieniami w ziemię (fot. E. Gąsior)

W dokumencie CIGRE [14] stwierdza się, że  $N_{sg} > N_g$ , a współczynnik korygujący pozwalający określić wartość punktowych trafień wyładowań głównych na podstawie ilości wyładowań atmosferycznych zawiera się w przedziale 1,5 – 1,7. Z kolei w przygotowywanym nowym wydaniu normy odgromowej IEC 62305-2 sugeruje się przyjęcie tego współczynnika nawet na poziomie równym 2. Zakłada się zatem, iż każde wyładowanie atmosferyczne posiada kanał piorunowy połączony z ziemią w dwóch różnych punktach, jak to przedstawia rysunek 2. Należy zauważyć, iż takie przeszacowanie skutkuje dwukrotnie większym ryzykiem w porównaniu do kalkulacji prowadzonych w oparciu o parametr  $N_g$ . W przypadku budowy EJ należy dodatkowo uwzględnić na etapie jej projektowania zmianę parametrów  $N_g$  i  $N_{sg}$  na skutek zmian klimatu, co również jest pewnym wyzwaniem.

Ważną kwestią jest ponadto wyznaczanie parametrów wyładowań atmosferycznych - w tym powyżej opisanych - w oparciu o systemy LLS, które wymagają unormowania, aby wyniki z różnych systemów działających na świecie były porównywalne. W normie [15] określa się jednolite zasady wyznaczania gęstości wyładowań piorunowych. Powinny być spełnione m.in. następujące warunki:

- dane powinny obejmować 10 pełnych lat kalendarzowych, przy czym najnowsze dane nie mogą być starsze niż 5 lat,
- systemy LLS powinny określać  $N_g$  z błędem nie większym niż  $\pm 20\%$ ,
- średnia roczna skuteczność wykrywania wyładowań powinna być co najmniej na poziomie 80%,
- mediana dokładności lokalizacji trafień w ziemię powinna przekraczać 500 m,
- dokładność rozróżniania pomiędzy wyładowaniami doziemnymi i wyładowaniami w chmurach (CC/IC) musi wynosić co najmniej 85%.

W normie PN-EN IEC 62858:2020-06 [15] jest jeszcze zapisanych szereg innych wymagań odnośnie systemów LLS, które wpływają na uzyskiwane wyniki statystyczne. Odrębnym zagadnieniem jest chociażby sposób grupowania wyładowań głównych w pojedyncze wyładowanie atmosferyczne, co umożliwia między innymi określenie parametru  $N_{sg}$ .

Podsumowując wyznaczanie parametrów istotnych w ochronie odgromowej nie jest trywialnym zagadnieniem, zwłaszcza jeśli chcemy przewidzieć nie tylko bezpośrednie oddziaływanie prądu piorunowego, ale również działanie pola LEMP, które indukuje przepięcia i może wzbudzać stany alarmowe, na skutek błędnego zadziałania AKPiA. Niektóre parametry, takie jak np. prędkość propagacji fali prądowej wyładowania głównego w kanale piorunowym nie są jeszcze uwzględniane nawet w normach ochrony odgromowej, a inne trudno dokładnie oszacować z uwagi na ograniczenia algorytmów stosowanych w systemach LLS. Dodatkowo ze względu na przewidywany długi cykl życia współczesnych EJ należy brać pod uwagę w fazie projektowania systemów ochrony odgromowej zmiany niektórych parametrów wynikające ze zmian klimatycznych.

### Koncepcja ochrony odgromowej elektrowni jądrowych

Nowe trendy w ochronie odgromowej elektrowni jądrowych bazują na koncepcji, zgodnie z którą wyładowania atmosferyczne zalicza się do tzw. ryzyk klimatycznych. Z drugiej jednak strony wiadomo, iż bezpieczeństwo EJ nie powinno zależeć od zmian klimatu, które mogą nastąpić w całym cyklu życia obiektu nuklearnego szacowanego aktualnie na blisko 100 lat (projektowanie, budowa, eksploatacja i zamykanie EJ).

Obiekty nuklearne znajdujące się na terenie EJ i nie zaliczane do najbardziej wrażliwych chronione są przed

wyładowaniami atmosferycznymi zgodnie z pierwszym poziomem ochrony odgromowej LPL I opisanym w tabeli 1. Oznacza to, że prawdopodobieństwo wystąpienia pioruna z maksymalnymi i minimalnymi parametrami prądu poza zakresem wartości określonych dla poziomu LPL I jest mniejsze niż 2 %.

Po awarii w Fukushima w 2011 roku uznano jednak, że w przypadku tzw. jądra EJ, w skład którego wchodzi konstrukcje i wyposażenie odpowiedzialne za chłodzenie reaktora i niepozwalające na stopienie się rdzenia z paliwem jądrowym, wymagania określone przez LPL I są niewystarczające. Ta część elektrowni powinna bowiem działać, jeśli nawet pozostałe wszystkie systemy EJ ulegną uszkodzeniu.

Takie podejście wymaga określenia ekstremalnych wartości parametrów wyładowań atmosferycznych. Nie można tego jednak zrobić arbitralnie na podstawie pojedynczych rejestracji bardzo dużych wartości prądu piorunowego dokonywanych sporadycznie w różnych miejscach na całym świecie. Bardziej wiarygodnym podejściem może być przyjęcie granicznej wartości szczytowej na poziomie 300 kA, którą oszacowano w pracy [16] dla obszarów o klimacie umiarkowanym przy założeniu, iż maksymalne pole elektryczne poniżej chmury burzowej nie przekracza wartości 150 kV/m. Zgodnie z tym samym modelem w krajach tropikalnych maksymalne prądy piorunowe mogą wynosić nawet 450 – 500 kA i wówczas zaprojektowanie niezawodnego systemu ochrony odgromowej odpornego na takie ekstremalne zagrożenia może stanowić duże wyzwanie. W tej samej pracy [16] oszacowano również minimalne wartości prądu wyładowania piorunowego w przedziale 1,5 – 3 kA, z wartością 2 kA jako najbardziej prawdopodobną.

Ostatecznie zaproponowano tzw. rozszerzoną ochronę odgromową najbardziej wrażliwych obiektów i urządzeń elektrowni jądrowych, która na obszarach o klimacie umiarkowanym powinna być skuteczna przy założeniu następujących ekstremalnych parametrów:

- 300 kA – wartość szczytowa prądu wyładowania głównego oraz 2 kA minimalna wartość tego prądu,
- 700 C – całkowity przenoszony ładunek elektryczny,
- 45 MJ – energia właściwa wyładowania.

Na zakończenie należy również podkreślić, iż samo szacowanie ryzyka w przypadku projektowania ochrony odgromowej obiektów nuklearnych napotyka na pewne ograniczenia, gdyż standardowo uwzględnia się wyłącznie przypadki uszkodzenia urządzeń elektrycznych i elektronicznych na skutek oddziaływania częściowych prądów piorunowych oraz impulsów LEMP, natomiast nie bierze się pod uwagę ryzyka związanego z nieprawidłowym działaniem tych urządzeń, pomimo iż nie zostały one uszkodzone. Takie przypadki związane z klasyczną kompatybilnością są równie groźne w przypadku EJ, gdyż mogą powodować generowanie alarmów w AKPiA i w rezultacie doprowadzić nawet do wyłączenia reaktora jądrowego.

## Podsumowanie

Elektrownie jądrowe to strategiczne obiekty, które wytwarzają energię elektryczną i docelowo również ciepło procesowe. Stabilność systemu elektroenergetycznego oraz zapewnienie ochrony środowiska przed uwolnieniem z reaktora jądrowego niekontrolowanego promieniowania jonizującego wymaga zdefiniowania jądra elektrowni, które

powinno funkcjonować bezawaryjnie nawet w przypadku uszkodzenia pozostałych systemów. Podejście takie oznacza konieczność zdefiniowania tzw. rozszerzonej ochrony odgromowej z ekstremalnymi wartościami parametrów wyładowań atmosferycznych, których prawdopodobieństwo przekroczenia jest w praktyce zerowe. Dodatkowo nowe wyzwanie stanowi szacowanie ryzyka wystąpienia szkód piorunowych uwzględniającego przypadki wadliwego zadziałania urządzeń bez ich fizycznego uszkodzenia, jak również zmiany parametrów wyładowań atmosferycznych wynikających ze zmian klimatycznych zachodzących w trakcie całego cyklu życia współczesnej elektrowni jądrowej.

**Autor:** dr hab. inż. Grzegorz Masłowski, prof. PRZ, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, E-mail: maslowski@prz.edu.pl;

## LITERATURA

- [1] Denkiewicz T., Reaktory jądrowe przyszłości i likwidacja problemu wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych, *Postępy Techniki Jądrowej*, Vol.57 (2014), z.2
- [2] Nowicki J., Blok jądrowy z reaktorem energetycznym AP1000. Rozwiązania konstrukcyjne i perspektywy zastosowań, *Energetyka*, nr 8, (2020), 380-391
- [3] Mikulski A., Małe reaktory modułowe – reaktor BWRX-300, *Energetyka*, nr 12, (2020), 648–653
- [4] Mazzetti C., Kisielewicz T., Fiamingo F., Kuca B., Flisowski Z., Rational Approach to Assessment of Risk Due to Lightning for Nuclear Power Plants, *Przegląd Elektrotechniczny* (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 6/2012
- [5] Kisner R. A., Wilgen J. B., Ewing P. D., Korsah K., and M. R. Moore, A Technical basis for guidance on lightning protection for nuclear power plants, *Fourth American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls and Human-Machine Interface Technologies* (NPIC&HMIT 2004), Columbus, Ohio, September, 2004
- [6] Rourk Ch., A Review of Lightning-Related Operating Events at Nuclear Power Plants, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 9(3), (1994), 636–641.
- [7] Duquerroy P., Trouilloude C., Evolution of lightning protection of nuclear power plants: An overview of EDF's experience, *Proc. CIGRE Session 2018*, Paris, France, Paper C4-213, August 26–31 (2018)
- [8] Cooray V., (2014), *The lightning flash*, 2nd Edition, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom
- [9] Rakov V. A., Uman M. A., (2003), *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge Univ. Press, New York
- [10] Chen S., Rakov V. A., Zhu Y., Ding Z., Clusters of Compact Intracloud Discharges (CIDs) in Overshooting Convective Surges, *JGR Atmospheres*, (2024), Vol.129, Issue 8
- [11] Masłowski G., Ziemia R., Fale napięciowe indukowane w liniach elektroenergetycznych pobliskimi wyładowaniami atmosferycznymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 98, (2022), Issue 10, 161
- [12] PN-EN 62305-1: 2011, Ochrona odgromowa – Część 1: Zasady ogólne
- [13] Masłowski G. Ziemia R., Calculation of lightning-induced voltages inside the structure using engineering return-stroke models. *Proc. 28th International Conference on Lightning Protection*, Kanazawa, Japan, (2006), 1132-1137
- [14] Working Group C4.407, Lightning parameters for engineering applications, CIGRE report 549, (2013)
- [15] PN-EN IEC 62858:2020-06 - Gęstość wyładowań piorunowych oparta na systemach ich lokalizacji (LLS) - Ogólne zasady
- [16] Cooray V., Rakov V., On the upper limits of peak current of first return strokes in negative lightning flashes, *Atmospheric Research*, 117 (2012), 12–17.