

Wpływ warunków środowiskowych na współczynnik materiałowy wsporników separujących elementy urządzenia piorunochronnego

The influence of environmental conditions on the material coefficient of spacer supports used in lightning protection

Streszczenie. Zwody pionowe o wysokości od 2,5 m muszą być przymocowane do chronionego obiektu za pomocą wsporników separujących wykonanych z materiału izolującego elektrycznie. W artykule zaprezentowano wyniki badań wpływu rzeczywistych warunków środowiskowych na współczynnik materiałowy k_m wsporników separacyjnych wykorzystywanego do obliczania wymaganego odstępu separującego s . Badania wykazały zmiany wartości współczynnika k_m co bezpośrednio wpływa na skuteczność działania urządzenia piorunochronnego.

Abstract. Vertical air terminals of 2.5 m or more in height must be attached to the protected object using spacer brackets made of electrically insulating material. The article presents the results of research on the influence of actual environmental conditions on the material coefficient k_m of spacer brackets used to determine the required separation distance s . The research has shown changes in the value of the k_m coefficient, which directly affects the effectiveness of the lightning protection system.

Słowa kluczowe: wsporniki separacyjne, ochrona odgromowa, współczynnik materiałowy, odstęp separujący.

Keywords: spacer bars, lightning protection, material factor, separation distance.

Wstęp

Głównym zadaniem instalacji odgromowej jest przechwycenie doziemnego wyładowania piorunowego i wysłanie go drogą obraną przez projektanta do systemu uziomowego. Podczas wyładowania piorunowego należy zwrócić szczególną uwagę na możliwość wystąpienia przeskoków iskrowych pomiędzy elementami urządzenia piorunochronnego a chronionymi elementami, urządzeniami, instalacjami elektrycznymi i sygnałowymi. Wymagany odstęp separujący zapewniający właściwą ochronę wynikający z faktu pojawienia się wysokiego napięcia na urządzeniu piorunochronnym zależy od [18]:

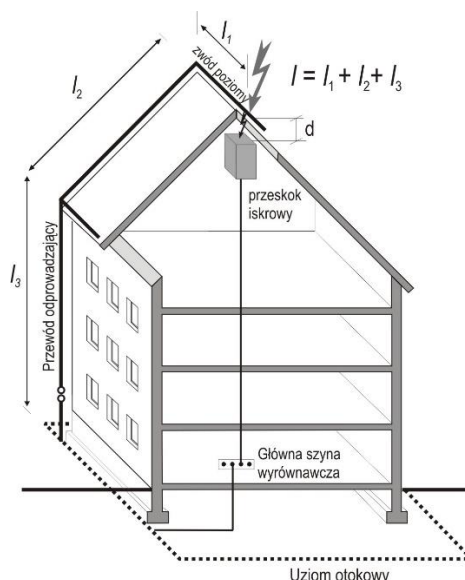
- parametrów prądu piorunowego (m.in. wartości szczytowej, stromości jego narastania),
- rozptyłu prądu piorunowego w urządzeniu piorunochronnym,
- odległości od miejsca zbliżenia, w którym może wystąpić przeskok,
- rodzaju materiału izolacyjnego występującego w miejscach zbliżeń elementów urządzenia piorunochronnego i chronionych urządzeń oraz instalacji.

Niekontrolowane przeskoki iskrowe zmieniają drogę rozptyłu prądu piorunowego zwiększając zagrożenie pożarowe i przepięciowe obiektu (rys. 1). W najbardziej niekorzystnym przypadku może się zdarzyć, iż urządzenie piorunochronne nie spełni przypisanych mu zadań i spowoduje niekontrolowany rozptył prądu piorunowego powodując zniszczenia. W takiej sytuacji urządzenie piorunochronne zwiększa zagrożenie zamiast je zmniejszać. Właśnie w tym celu norma PN-EN 62305-3 [1] zaleca zachowanie bezpiecznego odstępu separującego między urządzeniem piorunochronnym a innymi instalacjami obiektu.

Odstęp separujący

Minimalny odstęp separujący według PN-EN 62305-3 [1] oblicza się z zależności:

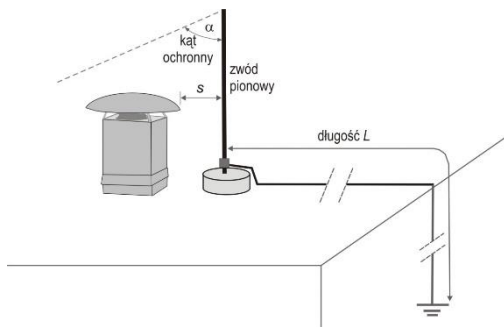
$$(1) \quad s > k_i \cdot \frac{k_c}{k_m} \cdot l$$



Rys. 1. Wyładowanie piorunowe źródłem wysokiego napięcia panującego na zwodach, przewodach odprowadzających i systemie uziomowym, gdzie: l, l_1, l_2, l_3 – prąd piorunowy i jego części wynikające z drogi rozptyłu, d – odstęp między zwodem poziomym a instalacją w obiekcie mogący skutkować przeskokiem, l_1, l_2, l_3 – długość poszczególnych części zwodów i przewodów odprowadzających prąd piorunowy [19]

gdzie:

- s – odstęp separujący,
- k_i – współczynnik zależny od klasy LPS,
- k_m – współczynnik materiałowy zależny od rodzaju izolacji między LPS a obiektem,
- k_c – współczynnik zależny od podziału prądu doziemnego wyładowania piorunowego,
- l – długość zwodu/przewodu odprowadzającego mierzona wzdłuż jego przebiegu od punktu gdzie jest wyznaczany odstęp separujący a najbliższym połączeniem wyrównawczym lub uziomem (rys. 2).



Rys. 2. Odstęp separujący na dachu obiektu budowlanego [4]
gdzie: s – odstęp separujący między zwodem pionowym a chronionym urządzeniem na dachu, L – długość zwodu/przewodu odprowadzającego, α – kąt ochronny zapewniany przez zwód pionowy.

Przystępując do fizycznej realizacji bardzo często napotykamy na problem natury praktycznej bezpośrednio związany z koniecznością mechanicznego przymocowania elementów do konstrukcji budynku tak, aby jednocześnie zachowane były wymagane odstępy separujące. W tym celu dostępne są dedykowane wsporniki separujące wykonane najczęściej z włókna szklanego. Dla określenia odstępu izolacyjnego przyjmuje się dla nich współczynnik materiałowy $k_m=0,7$ zgodnie z deklaracją producenta. Współczynnik materiałowy należy rozumieć jako ekwiwalent odstępu w powietrzu. Znaczy to, iż 1 m wspornika separującego odpowiada odstępowi w powietrzu 0,7 m.

Należy zauważyć, iż norma PN-EN 62305-3:2011 w podrozdziale 6.3.1 i tabeli 11 definiuje wartość współczynnika materiałowego tylko dla powietrza ($k_m=1$), betonu, cegieł i drewna ($k_m=0,5$). W przypadku innych materiałów wartości współczynnika materiałowego powinny być podane przez producenta. Dopiero najnowsza wersja normy IEC 62305-3:2024 [20] w tabeli 12 określa współczynnik materiałowy dla elementów wykonanych z tworzywa sztucznego wzmocnionego włóknem szklanym ($k_m=0,7$).

Przegląd literatury

Dostępne artykuły naukowe poruszające problem odstępu separujących skupiają się na badaniach symulacyjnych [12]. Rozpatrywane są różne metody prowadzenia obliczeń [13,14]. Analizowany jest wpływ kształtu udaru prądowego. Praktyczne przeprowadzenie pomiarów w warunkach rzeczywistych jest bardzo trudne do zrealizowania [10]. Eksperyment naukowy mógłby być przeprowadzony tylko w ograniczonym zakresie przy prowokowanym wyładowaniu piorunowym.

Wychodząc naprzeciw opisanym problemom, normy z serii PN-EN 62305 [1, 8, 11] dopuszczają uproszczoną metodę szacowania wartości odstępu separującego [11] i na tej podstawie przeprowadza się dobór rozwiązań technicznych zmniejszających ryzyko szkód i strat piorunowych. Praktyka inżynierska sprowadza się do prowadzenia obliczeń odstępu separującego metodą przywołaną w normach z serii PN-EN 62305 i odpowiednim doborze rozwiązań technicznych np.: poprzez zmianę ułożenia i trasy zwodów/przewodów odprowadzających prąd piorunowy, poprzez zastosowanie przewodów wysokiego napięcia zmniejszających wymagany odstęp separujący stosownie do deklaracji producenta lub też dedykowanych wsporników separujących [15, 16, 17].

Badania przedstawione w niniejszym artykule mają na celu laboratoryjną weryfikację współczynnika materiałowego k_m wykorzystywanego w obliczeniach odstępu separującego

zgodnie z procedurą opisaną w normach z serii PN-EN 62305.

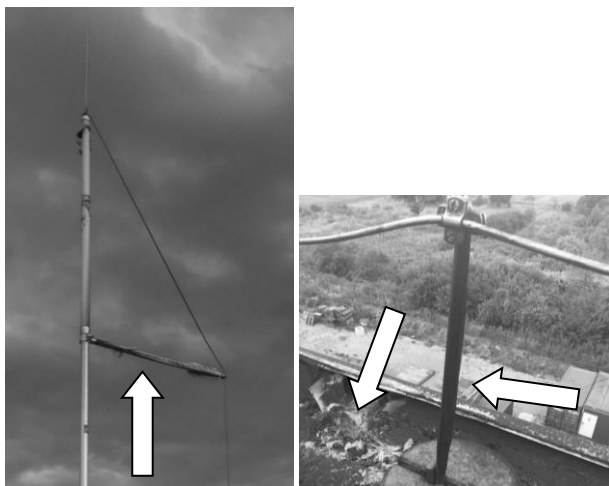
Analiza przypadków uszkodzeń

Niestety praktyka eksploatacji wsporników separujących wykazuje, iż nie zapewniają one właściwego poziomu izolacji, co skutkuje powstaniem przeskoków iskrowych wzdłuż nich podczas trafei piorunowych w urządzenie piorunochronne. Na rysunku 3 przedstawiono zdjęcia obiektu uszkodzonego w wyniku niekontrolowanych przeskoku iskrowych od urządzenia piorunochronnego do wspornika separującego i przewodzącego elementu chronionego obiektu. Na szczególną uwagę zasługuje druga część zdjęcia, na której widzimy przebicie poszycia dachowego oraz częściowe zwęglenie wspornika separującego. Uwidocznione zniszczenia powstały podczas jednego zdarzenia na tym samym obiekcie związane z trafieniem piorunowym w urządzenie piorunochronne.

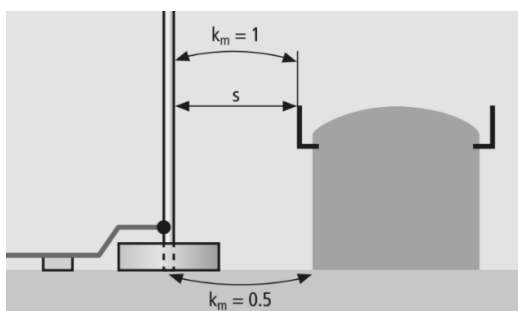
Przedstawione przypadki jednoznacznie wskazują na wsporniki jako przyczynę zniszczeń. W zależności od rodzaju chronionego obiektu niekontrolowane przeskoki iskrowe mogą być przyczyną pożaru, przebicia poszycia dachowego, niewłaściwej koordynacji energetycznej ograniczników przepięć. W przypadku obiektów z wydzielonymi strefami zagrożonymi wybuchem (tzw. strefy EX) iskrzenie może być przyczyną eksplozji, co powoduje konieczność szczególnego zwrócenia na nie uwagi. Uwzględniając powyższe podjęto się badań laboratoryjnych wsporników separujących, które opisano niżej.

Przytoczony przypadek wskazuje, iż przyjęte do obliczeń wartości współczynnika k_m są mniejsze niż wartość deklarowana dla odstępu separujących, gdyż pomimo zastosowanych wsporników wymagany w PN-EN 62305-3 odstęp separujący nie został uzyskany. Należy postawić tezę, iż w warunkach rzeczywistych wartość współczynnika materiałowego k_m są mniejsze niż deklarowana wartość dla wsporników separujących. Warto jest odnotować, iż podobne wsporniki wykorzystywane są w kolejnictwie dla sieci trakcyjnej 3 kV. I tak dla przykładu izolator sekcyjny 3 kV o długości 50 cm ma zdefiniowane wytrzymałe napięcie udarowe na poziomie 145 kV z uwzględnieniem warunków zabrudzeniowych [6]. Wytrzymałość udarowa brudnych izolatorów może spaść poniżej o 50 % względem wytrzymałości izolatorów czystych. Jeśli zestawimy parametry izolatorów stosowanych w sieci trakcyjnej 3 kV [6] z parametrami wsporników separacyjnych stosowanych w ochronie odgromowej można jednoznacznie stwierdzić [3], iż norma PN-EN 62305-3 w sposób niezadawalający definiuje wymagania w zakresie odstępu separujących i nie uwzględnia wytrzymałości udarowej elementów wykorzystywanych do budowy urządzenia piorunochronnego.

Kolejnym mankamentem normy PN-EN 62305-3 jest problem właściwego wyboru współczynnika materiałowego k_m na trasie, po której prowadzony jest przewód odprowadzający prąd piorunowy do ziemi. W przypadku pokazanym na rysunku 4 istnieją uzasadnione wątpliwości, co do wyboru właściwej wartości $k_m=1$ lub $k_m=0,5$. Różnice wynikają z faktu zastosowania podstawy betonowej do mocowania zwodu pionowego. Przyjęcie niewłaściwej wartości skutkuje dwukrotnym zwiększeniem lub zmniejszeniem wymaganego odstępu separującego. Zapas technologiczny wynikający z ogólnej wiedzy inżynierskiej wskazuje na konieczność wyboru najgorszego możliwego wariantu czyli wartości $k_m=0,5$. Problem w wyborze właściwej wartości współczynnika materiałowego k_m spowodowany pominięciem podstawy betonowej piorunochronu zewnętrznego przedstawia rysunek 4 [2].



Rys. 3. Wsparnik separujący uszkodzony podczas rzeczywistego doziemnego wyładowania piorunowego w obiekt [5].



Rys. 4. Przykład dwuwariantowego (w powietrzu i w betonie) odstępu separacyjnego [2].

Badania laboratoryjne współczynnika materiałowego

Głównym parametrem, który definiuje przydatność do stosowania w ochronie odgromowej wsporników separujących jest współczynnik materiałowy k_m . Jest on wykorzystywany do określenia wymaganego odstępu separacyjnego stosownie do zapisów normy PN-EN 62305-3. Praktyczny przypadek uszkodzenia i częściowego pożaru obiektu wyposażonego w urządzenie piorunochronne (w którym zastosowano wsporniki separujące) skłonił do podjęcia badań laboratoryjnych rzeczywistych wartości współczynnika k_m .

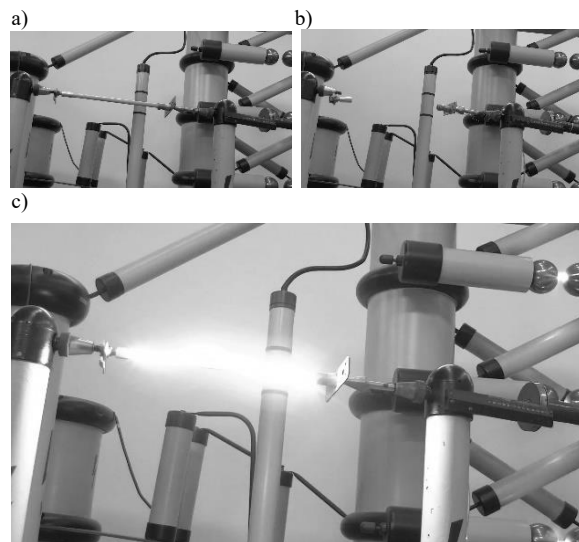
Badania wytrzymałości udarowej wsporników separujących przeprowadzono dla różnych ich długości: 10 cm, 20 cm, 30 cm. Wybrane długości próbek dostosowano do maksymalnej wartości szczytowej napięcia na wyjściu generatora wykorzystywanego do badań. Badane elementy pokazano w rysunku 5. Badania przeprowadzono w trzech konfiguracjach: wspornik separujący nowy, wspornik separujący mokry, wspornik separujący poddany naturalnemu procesowi wpływu warunków środowiskowych (zabrudzeniowych – czas eksploatacji 5 lat). Badania przeprowadzono z wykorzystaniem 4 stopniowego generatora napięć udarowych pracującego w układzie Marx'a, 400kV 2,2 kJ. Do pomiarów napięcia wykorzystano wbudowany dzielnik napięciowy. Podczas badań panowała temperatura 23 °C i wilgotność względna 24 %. Powyższe badania wytrzymałości udarowej miały na celu laboratoryjne wyznaczenie wartości współczynnika materiałowego k_m . Na rysunku 6 przedstawiono stopklatki z przeprowadzonych pomiarów.

Zgodnie z przyjętą definicją współczynnika k_m porównano wartości napięcia przebicia w analizowanych przypadkach w układzie z i bez wspornika separującego. Podczas realizacji

badan zestawiono układ z tymi samymi metalowymi okuciami, ale bez fizycznej obecności wspornika. Uzyskano w ten sposób układ z izolacją powietrzną celem obliczenia konkretnej wartości współczynnika k_m . Pomiarów wykonano dla dodatniej polaryzacji uderów napięciowych, ponieważ wtedy napięcie przebicia w badanym układzie jest najmniejsze. Takie założenia wskazują, że analizowany jest najgorszy scenariusz – wyładowanie piorunowe o polaryzacji dodatniej. W celu jak najlepszego odwzorowania rzeczywistych warunków panujących podczas wyładowań piorunowych przeprowadzono również pomiary wytrzymałości elektrycznej mokrego wspornika separującego ze względu na brak możliwości technicznych przeprowadzenia badań w znormalizowanym deszczu.



Rys. 5. Wsporniki separujące wykorzystane do badań laboratoryjnych – nowe i czyste (3 szt.) oraz wsporniki wykonane z tworzywa sztucznego wzmocnionego włóknem szklanym zdemontowane z rzeczywistego obiektu po 5 latach użytkowania (2 szt.).



Rys. 6. Wsporniki separujące podczas badań laboratoryjnych: a) wspornik czysty, b) układ bez wspornika (powietrze), c) przebicie wspornika podczas badań

Wyniki badań wytrzymałości udarowej wsporników separujących zamieszczono na rysunku 7. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono wartości współczynnika materiałowego, korzystając z zależności (2) :

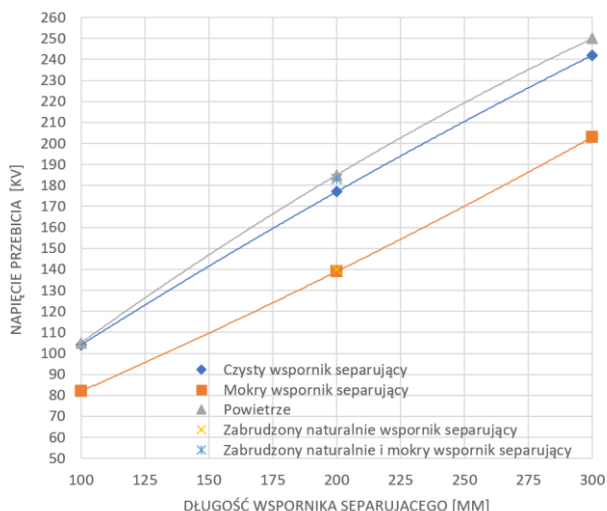
$$(2) \quad k_m = \frac{U_{wsp.}}{U_{pow.}}$$

gdzie:

$U_{wsp.}$ – napięcie przebicia wspornika separującego,

$U_{pow.}$ – napięcie przebicia powietrza w tym samym układzie i dla tego samego odstępu między metalowymi okuciami.

Otrzymane wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1. Wartości współczynnika k_m dla nowego i czystego wspornika separującego są bliskie wytrzymałości elektrycznej powietrza i wynoszą w przybliżeniu 1.



Rys. 7. Wyniki badań wytrzymałości udarowej wsporników separujących.

Tabela 1. Wynik obliczeń wartości współczynnika materiałowego k_m dla wsporników separujących.

l	$k_m = \frac{U_{wsp.}}{U_{pow.}}$			
	czysty wspornik separujący	mokry wspornik separujący	zabrudzony naturalnie wspornik separujący	zabrudzony naturalnie i mokry wspornik separujący
[cm]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	$\frac{104}{105} = 0,99$	$\frac{82}{105} = 0,78$	-	-
20	$\frac{177}{185} = 0,95$	$\frac{139}{185} = 0,75$	$\frac{140}{185} = 0,76$	$\frac{183}{185} = 0,99$
30	$\frac{242}{250} = 0,96$	$\frac{203}{250} = 0,81$	-	-

Mokry wspornik separujący charakteryzował się współczynnikiem k_m w zakresie od 0,75 do 0,81. Przeprowadzone badania wykazały, iż współczynnik materiałowy dla wspornika mokrego i wspornika zabrudzonego w sposób naturalny są zbliżone i wynoszą około 0,76. Badania przeprowadzono również dla zabrudzonych naturalnie i jednocześnie mokrych wsporników separujących. Otrzymano współczynnik k_m w pobliżu 0,97.

Wspornik separujący o długości 20 cm charakteryzuje się mniejszą wartością współczynnika k_m niż wspornik 10 cm i 30 cm. Widoczny rozrzut w wynikach badań może być spowodowany faktem, iż wykorzystano dwie różne próbki do badań. W przypadku wspornika zabrudzonego wartość współczynnika k_m jest z pewnością istotnie uzależniona od przewodzących właściwości zabrudzenia. Szczegółowe zbadanie tych rozbieżności wymaga dalszych badań laboratoryjnych dla większej liczby wsporników separujących zdemontowanych z obiektów.

Zestawiając wyniki przeprowadzonych badań z danymi z literatury [7] należy zauważyć, iż wartość współczynnika materiałowego może wynieść nawet 0,5 dla wsporników eksploatowanych w zanieczyszczonych regionach.

Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały zależność między zawilgoceniem wsporników separujących a wartością współczynnika k_m . Idealnie czysty wspornik w warunkach rzeczywistych praktycznie nie występuje, gdyż otacza go zwykle zanieczyszczone środowisko.

W zaprezentowanych praktycznych przypadkach wsporniki separujące nie zapewniły wymaganego poziomu bezpieczeństwa. Niekontrolowany podział prądu piorunowego przełożył się na fizyczne zniszczenia pomimo instalacji urządzenia piorunochronnego.

Przez prawidłowe dobranie wsporników separujących uzyskuje się wymagany poziom bezpieczeństwa przy określonej wartości ryzyka uszkodzenia, co pozwala uznać wspomniane przypadki uszkodzeń za rzecz naturalną.

Praca badawcza finansowana w ramach grantu nr WZ/WE-IA/2/2023 na Politechnice Białostockiej i sfinansowana z subwencji badawczej przekazanej przez ministra właściwego do spraw nauki.

Autor: dr inż. Jarosław Wiater, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Fotoniki, Elektroniki i Techniki Świetlnej, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, E-mail: jaroslaw.wiater@pb.edu.pl

LITERATURA

- [1] PN-EN 62305-3:2011. Ochrona odgromowa - Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów i zagrożenie życia.
- [2] Lightning Protection Guide 3rd updated Edition DEHN 2014.
- [3] DEHNiso spacers catalogue. <https://www.dehn-international.com/store/p/en-DE/F3351/dehniso-spacers>
- [4] Sowa A.: Analysis of Separation Distances between LPS and Devices on the Building Roof. Przegląd Elektrotechniczny. 86. pp. 78-80.
- [5] Nie publikowane zdjęcia obiektów przemysłowych.
- [6] Chrzan L.: Wytrzymałość izolatorów trakcyjnych przy uderzeniach piorunowych (in Polish). Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 24.
- [7] Heidler F., Zischank W., Kern A., Analysis of separation distances for lightning protection systems including natural components, in Proc. 28th ICLP 2006, Kazanawa, 1418-1423.
- [8] IEC 62305-3, Protection against lightning - Part 3: Physical damage to structures and life hazard.
- [9] Panicali A. R., Silva J. C., Barbosa C. F., Alves N. V. B., Preventing sparks between external LPS and structure conductive parts, Electric Power Systems Research (153) 2017, 144–151.
- [10] Fallah S. N., Gomes C., Izadi M., Ab Kadir M., Ahmed R., Jasni J., Minimum Separation Between Lightning Protection System and Non-Integrated Metallic Structures, ICLP 2018: 34th International Conference on Lightning Protection: Rzeszów, Poland, 02-07 September 2018.
- [11] Heidler F., Zischank W., Necessary separation distances for lightning protection systems - IEC62305 - revisited, X International Symposium On Lightning Protection (SIPDA), Curitiba, Brazil, 9-13 November, 2009.
- [12] Markowska R., Induced and ground potential voltage components in analysis of separation distance for lightning protection in buildings, Przegląd Elektrotechniczny, 92 (2016), No. 12, 265-270.

- [13] Markowska R., Influence of Lightning Current Waveshape on the Separation Distance Required between Electrical Equipment and Lightning Protection System, Elektronika i Elektrotechnika, ISSN 1392-1215, 19 (2013), No. 4, 15-18.
- [14] Martyniuk M.: Analiza wpływu uziomu na wymagany odstęp separacyjny od instalacji piorunochronnej. Przegląd Elektrotechniczny 01/2023. 67-72.
- [15] Rakowska A., Gulski E., Siodła K., Chojnowski P.: Badania i diagnostyka on-site elektroenergetycznych kabli przesyłowych wysokiego napięcia. Przegląd Elektrotechniczny 04/2009.
- [16] Rakowska A., Gulski E., Siodła K., Chojnowski P.: Rola czułych metod pomiarowych i diagnostyki on-site w badaniach kabli elektroenergetycznych. Przegląd Elektrotechniczny 02/2009.
- [17] Wiater J., Wincencik K.: Przeskoki iskrowe w przewodach o izolacji wysokonapięciowej stosowanych w ochronie odgromowej. Przegląd Elektrotechniczny 10/2022.
- [18] Sowa A.: Ochrona urządzeń oraz systemów elektronicznych przed narażeniami piorunowymi. Rozprawy Naukowe Nr 219. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej. Białystok 2011.
- [19] Sowa. A.: Kompleksowa ochrona odgromowa i przepięciowa. COSiW SEP Warszawa 2005.
- [20] IEC 62305-3:2024 Protection against lightning - Part 3: Physical damage to structures and life hazard.