



Romuald KOSZTALUK
Polski Komitet Ochrony Odgromowej

Nowoczesna koordynacja izolacji sieci elektrycznych i doświadczenia z jej stosowania

Streszczenie. Przedstawiono, scharakteryzowano i analizowano: właściwości nowoczesnych tlenkowych ograniczników przepięć; niektóre wyniki badań układów izolacji powietrznej, definicję współczynnika iskiernika K oraz metodę „toczącej się kuli”, stosowaną w wyznaczaniu stref osłony od uderzeń pioruna. Podano zakres zmian i uzupełnień nowego, siódmego wydania „Wskazówek koordynacji izolacji sieci elektrycznych”

Abstract. (Modern insulation coordination in electrical networks and some experience from using it). The paper presents and analyses: characteristics of modern MOV surge arresters; some test and investigation results of air electrical withstand; gap factor „ K ”; and „rolling sphere” method, applied in protection against lightning. The main changes and supplements in new edition of the „Insulation Coordination Advices ...” are mentioned.

Słowa kluczowe: tlenkowe ograniczniki przepięć, wytrzymałość izolacji powietrznej, współczynnik iskiernika „ K ”, metoda „toczącej się kuli”
Keywords: MOV surge arresters, electrical strength of air insulation, gap factor “ K ”, “rolling sphere” method.

Wstęp

Wszechstronne prace, prowadzone od końcowych lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia doprowadziły do ustanowienia przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną IEC oraz organizację CENELEC norm międzynarodowych o nowoczesnej koordynacji izolacji sieci elektrycznych. W wyniku tych prac ustanowiono normę IEC [1], a w latach 1995-1998 trzy ważne normy CENELEC, zawierające wymagania z zakresu wzmiarkowanej tematyki [2, 3, 4]. Polscy specjaliści, członkowie Komitetu Studiów 33 Koordynacja izolacji CIGRE, mieli możliwość bezpośredniego uczestniczenia w tych pracach.

Po ukazaniu się przepisów międzynarodowych [2, 3] opracowano w Polsce w latach 1997-1998 dwa dokumenty, przeznaczone do praktycznego wykorzystania zaleceń CENELEC przez zainteresowanych elektryków krajowych. Stanowią one kolejną, szóstą wersję „Wskazówek”. Były to:

- „Wskazówki koordynacji izolacji sieci o napięciu znamionowym do 110 kV”, (w tym sieci niskich napięć),

oraz oddzielnie wydane:

- „Wskazówki koordynacji izolacji sieci przesyłowych”, dotyczące sieci o napięciu od 220 kV do 750 kV łącznie.

W artykule przedstawiono podstawy fizyczne postanowień, zawartych w ww. przepisach międzynarodowych oraz kilkunastoletnie doświadczenia elektryków rozmaitych krajów, dotyczące stosowania zaleceń i wymagań tych dokumentów w pracujących sieciach. Wynika z nich celowość, a nawet potrzeba opracowania kolejnej siódmej wersji „Wskazówek koordynacji izolacji”. Dyskusja i opinie specjalistów, w tym również uczestniczących w X Sympozjum EUI 2005 zostaną wykorzystane w obecnym, końcowym stadium tego opracowania.

Nowoczesna koordynacja izolacji

Nowoczesna koordynacja izolacji jest dyscypliną, zajmującą się analizą i wyborem wytrzymałości elektrycznej urządzeń, tworzących sieć energoelektryczną, w zależności od:

- rodzaju i parametrów napiężeń elektrycznych, wywołanych napięciami i przepięciami, które mogą pojawić się podczas eksploatacji sieci w miejscu zainstalowania urządzeń;

- przewidywanych warunków środowiskowych pracy i eksploatacji urządzeń sieciowych;
- właściwości i charakterystyki układów izolacyjnych urządzeń i układów ochrony od naprężeń, napięć i przepięć, pojawiających się w sieci oraz ochrony od skutków uderzeń pioruna.

Literatura przedmiotowa, łączy ściśle tematykę koordynacji izolacji z rolą nowoczesnych odgromników, zawierających człon zmiennoporowy, zbudowany z tlenków rozmaitych metali. Odgromniki tego typu są nazywane w dalszej części publikacji *tlenkowymi ogranicznikami przepięć*.

Istotą i zadaniem nowoczesnej koordynacji izolacji, w ujęciu wielu autorów, zwłaszcza japońskich, jest:

- opanowanie i kontrola napiężeń elektrycznych oraz napięć i przepięć (na które jest narażona izolacja urządzeń sieciowych), za pomocą nowoczesnych ograniczników tlenkowych;
- uzyskanie założonej niezawodności pracy urządzeń i sieci;
- uwzględnienie zasad rozsądnej ekonomii (ponoszących i przewidywanych kosztów uszkodzeń i awarii, spowodowanych brakiem właściwej ochrony izolacji od przepięć oraz kosztów ochrony, możliwej do zastosowania);
- uzyskanie oczekiwanych właściwości układu i urządzeń ochrony od przepięć podczas eksploatacji.

Współczesna koordynacja izolacji jest wynikiem wielkiego postępu, który nastąpił w czterech dziedzinach, a mianowicie:

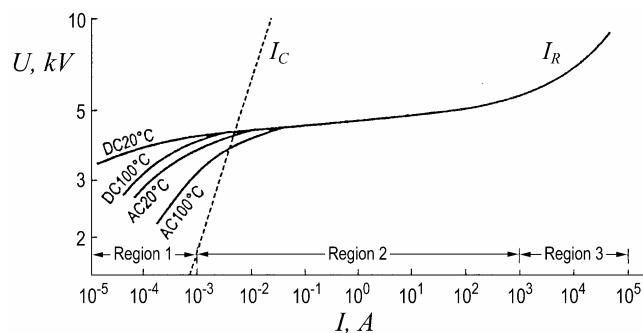
- materiałoznawstwa elektrotechnicznego, w zakresie wynalezienia i zastosowania w budowie tlenkowych ograniczników przepięć spieków ceramicznych, zbudowanych z tlenków rozmaitych metali (głównie tlenków cynku), o zadziwiających właściwościach zaworowych;
- podjęcie i wykonanie w wielkich ośrodkach wysokonapięciowych wszechstronnych badań wytrzymałości elektrycznej rozmaitych układów izolacji powietrznej;
- wprowadzenie w szczegółowych analizach wytrzymałości współczynnika przerwy iskrowej K ;
- zastosowania metody „toczącej się kuli” w wymiarowaniu stref ochronnych przewodów odgromowych i piorunochronów stacyjnych.

Tlenkowe ograniczniki przepięć

Źródłem postępu w budowie nowoczesnych ograniczników tlenkowych jest uzyskanie spieków ceramicznych, charakteryzujących się wybitnymi własnościami zaworowymi. Zjawisko nieliniowego przewodnictwa materiałów ceramicznych zostało odkryte w Japonii w 1968 r. Doprowadziło to do stworzenia materiałów, charakteryzujących się tak doskonałymi właściwościami zaworowymi, iż wzrost przewodzonego prądu udarowego z 0,01 mA do 10 kA (to znaczy miliard razy) powoduje zaledwie dwukrotny wzrost spadku napięcia na warystorze tego urządzenia.

W 1973 r. zbudowano w Japonii pierwsze nowoczesne ograniczniki przepięć. W 1975 r. zainstalowano je w japońskich sieciach 66 kV, a w kilka lat później w Stanach Zjednoczonych. Obecnie są one stosowane we wszystkich krajach. Pierwsze normy o ogranicznikach tlenkowych wprowadzono: w Japonii w 1984 roku, w Stanach Zjednoczonych w 1986 roku, a w Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC) w 1991 roku.

Technologie wytwarzania warystorów są nadal doskonałe, co prowadzi do uzyskiwania pożądanych właściwości i poprawy charakterystyk napięciowo-prądowych tych elementów ograniczników przepięć. Na rysunku 1 przedstawiono przykładową charakterystykę napięciowo-prądową płytki warystora zbudowanego z tlenków rozmaitych metali



Rys. 1. Charakterystyka zaworowa (napięciowo-prądowa) płytki warystora, stosowanego w tlenkowych ogranicznikach przepięć

Zastosowanie warystorów tlenkowych umożliwiło rezygnację z iskierników wielokrotnych, niezbędnych w odgromnikach wyposażonych w elementy z węgla krzemu (karborundu). Iskierniki tego typu znacznie zwiększały koszt odgromników, a ich uszkodzenia były najczęstszą przyczyną awarii tych urządzeń. Eliminacja iskierników pozwoliła istotnie obniżyć koszt budowy, niezależnie od korzyści z wybitnej poprawy charakterystyki ochronnej napięciowo-prądowej. Ograniczniki tlenkowe, dzięki swym właściwościom chronią izolację nie tylko od przepięć piorunowych, lecz także od przepięć łączeniowych, a nawet od krótkotrwałych przepięć dorywczych.

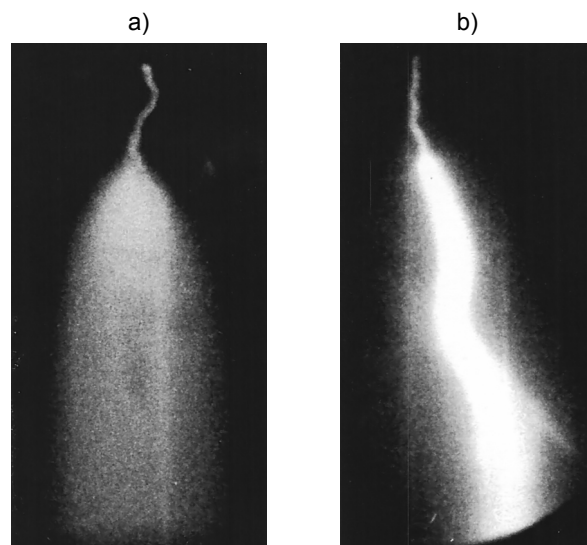
Dzięki wymienionym zaletom, a zwłaszcza bardzo dobrym właściwościom ochronnym, prostocie konstrukcji i malejącej cenie, ograniczniki tlenkowe przyczyniły się między innymi do:

- zwiększenia niezawodności pracy urządzeń sieci elektrycznych, a tym samym do redukcji kosztów eksploatacji;
- zmniejszenia wymaganej wytrzymałości izolacji urządzeń, co prowadzi do zmniejszenia kosztów ich budowy;
- uproszczenia wielu zabiegów eksploatacyjnych;
- redukcji kosztów ochrony od przepięć.

Właściwości układów izolacji powietrznej

Nowoczesna koordynacja izolacji opiera się o wyniki badań wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych, stosowanych w sieciach elektrycznych. Szczególną rolę spełniają w tej dziedzinie badania układów, w których dielektrykiem, oddzielającym elektrody jest powietrze. Badania wytrzymałości powietrza i procesów, powodujących jej utratę miały podstawowe znaczenie zarówno w dziedzinie poznania zjawisk fizycznych jak i uzyskania informacji, niezbędnych w nowoczesnej koordynacji izolacji. Podjęto je i wykonano we wszystkich wielkich ośrodkach, dysponujących odpowiednimi urządzeniami probierczymi, m.in. we Włoszech, Francji, Kanadzie, Japonii, Stanach Zjednoczonych, Niemczech, Rosji, Szwecji i w innych krajach. Trwały one od końcowych lat sześćdziesiątych do lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia.

Obszerne i wszechstronne wyniki badań uzyskano w ośrodkach *Les Renardières* we Francji oraz w Instytucie *IREQ* w Kanadzie. Pierwszy z tych ośrodków dysponował ekranowaną halą, o pojemności 185.000 m³ (długość i szerokość 64,5 m, wysokość 45 m). Był on wyposażony w nowoczesne urządzenia probiercze, m.in. w generatory udarów o napięciu 6 MV i energii 460 kJ oraz 4 MV, 300 kJ. W Instytucie *IREQ* badania wykonano w ekranowanej hali o pojemności 285.000 m³ (długość 82 m, szerokość 68 m, wysokość 51,5 m) wyposażonej w generatory udarów 6,5 MV, 400 kJ oraz 4 MV, 250 kJ. Autor publikacji miał życiową szansę brać udział w badaniach w pierwszym z tych ośrodków [6], oraz zorganizować badania i kierować nimi w Kanadzie [7, 8]. Analizę najważniejszych uzyskanych wyników badań przedstawiono m. in. w serii publikacji w czasopiśmie *INPE* [9].

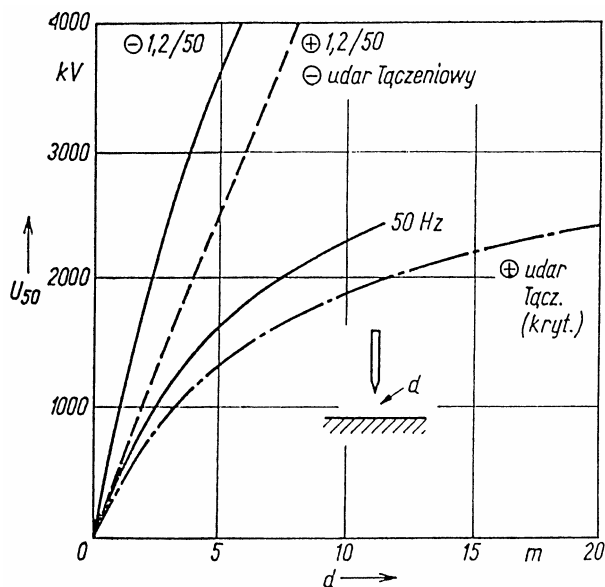


Rys. 2. Kanał lidera i strimery przed jego czołem występujące podczas wyładowania w układzie pręt-płyta uziemiona o odstępnie izolacyjnym 2 m w wyładowaniu anodowym (a) i katodowym (b)

Badania pozwoliły wyjaśnić proces rozwoju wyładowania iskrowego w powietrzu. Wykazały one, że przeskok elektryczny w odstępach izolacyjnych rzędu metrów jest zjawiskiem bardzo złożonym. W iskrze elektrycznej wyróżnia się dobrze przewodzący kanał plazmowy, zwany liderem i słabo przewodzące kanały strimerów. Długość fal elektromagnetycznych promieniowania, wysłanego przez wyładowanie w powietrzu wynosi od 200 do 800 nm. Oko ludzkie rejestruje tylko część tego promieniowania, a mianowicie od 400 nm (fiolet) do 760 nm (ciemna czerwień).

Z tego powodu nie widzimy promieniowania o największym natężeniu, o długości fal od 300 do 400 nm. Uformowanie się kanału lidera powoduje znaczną redukcję wytrzymałości elektrycznej układów izolacji powietrznej. Zjawisko to wyjaśnia mniejszą wytrzymałość powietrza na udary łączeniowe niż na inne rodzaje napięć.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe rejestracje wyładowań liderowo-strimerowych biegunowości dodatniej (a) i ujemnej (b) w układzie podstawowym pręt-płyta uziemiona.



Rys.3. Napięcie przeskoku U_{50} układu podstawowego pręt-płyta uziemiona, w funkcji odstepu izolacyjnego d [6], wywołane różnymi rodzajami naprężeń elektrycznych

Na rysunku 3 pokazano zależność napięć przeskoku U_{50} układu podstawowego pręt-płyta uziemiona, w funkcji odstepu izolacyjnego d według badań wykonanych w Les Renardières [6]. Wyniki badań laboratoryjnych stały się podstawą wyznaczania nowych wartości napięć probierczych, przyjętych m.in. w normach o koordynacji izolacji: EN 60071-1 [1] i EN 60071-2 [2]. Uwzględniono je także w wyborze minimalnych odstępów instalacjach w powietrzu, podanych w normie PN-E-05115 [3].

Koncepcja współczynnika iskiernika

W 1968 roku Luigi Paris wprowadził parametr, nazwany współczynnikiem przerwy iskowej, który jest obecnie oznaczany symbolem K . Wielkość ta, zwana w skrócie współczynnikiem iskiernika jest krotnością wytrzymałości elektrycznej analizowanego układu izolacyjnego, odniesioną do wytrzymałości iskiernika podstawowego typu pręt-płyta uziemiona. Definicja matematyczna tego współczynnika jest następująca

$$(1) \quad K = \frac{U_U}{U_{PP}}$$

przy czym: U_U – jest napięciem wytrzymywanym przez analizowany układ izolacyjny, U_{PP} – jest napięciem wytrzymywanym przez iskiernik pręt-płyta uziemiona (gdy są jednakowe: odstęp między elektrodami d , rodzaj napięcia i jego biegunowość, sposób i warunki wykonania próby).

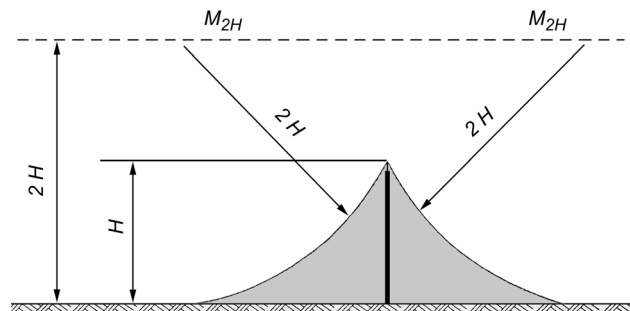
Koncepcja Parisa została powszechnie zaakceptowana i przyjęta zarówno w ocenie wyników badań eksperymentalnych, jak i w analizach uzyskanych wyników prób oraz w różnych przepisach normalizacyjnych. W normach międzynarodowych [2, 3] oraz w ich odpowiednikach krajowych są podane zalecenia i wymagania, odnoszące się do tego ważnego współczynnika i do sposobów jego stosowania. Badania wykonane w wielu ośrodkach i ich analizy doprowadziły do wyznaczenia wartości liczbowych współczynnika K w rozmaitych układach izolacyjnych. Są one podane w normie [3] i odnoszą się do układów izolacji doziemnej (zakres zmian współczynnika K od 1 do 1,63) oraz międzyfazowej (zakres zmian współczynnika K od 1,36 do 1,8).

Strefy ochronne przewodów odgromowych i piorunochronów

Na początku 1999 r organizacja CENELEC, zmieniała zasady wyznaczania stref ochronnych piorunochronów i przewodów odgromowych. Zamiast ograniczania wartości liczbowych kątów osłonowych zastosowano kryterium, nazwane „metodą toczącej się kuli” [4, 5, 10]. Obligatoryjny termin opublikowania w Polsce dokumentu [4] wyznaczono na 1.07.1999. Metoda została wprowadzona w dwu polskich normach, a mianowicie PN-E 05115: „Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV” [4] oraz w normie PN-IEC 61024-1-1: „Ochrona odgromowa obiektów budowlanych”. Dokumenty te były dobrze znane specjalistom z zakresu koordynacji izolacji, gdyż dodatkowo spopularyzował je Komentarz do Normy PN-E-05115, opracowany pod kierunkiem doktora Zbigniewa Nartowskiego i wydany przez Centralny Ośrodek Szkolenia SEP.

Celem ochrony odgromowej stacji elektroenergetycznych za pomocą zwodów pionowych jest przechwytywanie piorunów, kierujących się na teren stacji. Należy pamiętać, że umieszczenie zwodów piorunochronów na konstrukcjach wsporczych szyn stacyjnych może powodować wyładowania elektryczne na izolatorach, wskutek znacznej wartości sumarycznego spadku napięcia od prądu pioruna na rezystancji uziemienia stacyjnego i na indukcyjności drogi prądowej wzdłuż konstrukcji wsporczych.

Przykładowy sposób wyznaczania strefy osłonowej, przyjęty w przepisach europejskich CENELEC jest objaśniony na rysunku 4. Wysokość i liczba piorunochronów stacyjnych i przewodów odgromowych powinny być tak dobrane, aby wszystkie chronione urządzenia i instalacje znalazły się w strefie osłonowej. Doświadczenia potwierdzają dobrą skuteczność osłonową zwodów pionowych w stacjach i przewodów odgromowych w liniach, zwymiarowanych według „metody toczącej się kuli”, wówczas, gdy ich wysokości jest mniejsza niż 40 m. W przypadku wysokości większych należy przewidywać redukcję wymiarów stref osłonowych.



Rys.4. Strefa ochronna pojedynczego przewodu odgromowego i sposób jej wyznaczania

Wskazówki koordynacji izolacji

W Polsce w latach 1956-1977 ukazało się pięć kolejnych wydań „Wskazówek ochrony sieci elektroenergetycznych od przepięć”, opracowanych i wydanych z inicjatywy profesora Marka Jaczewskiego. Zawierały one podstawowe zalecenia, dotyczące ochrony odgromowej linii i stacji wysokich napięć. Formułowały również zasady stosowania i sposoby instalowania odgromników zaworowych i przewodów odgromowych w sieciach krajowych.

W 1998 roku w Instytucie Energetyki zakończono prace, dotyczące szóstego wydania tego dokumentu o znamionach podanych we wstępie niniejszej publikacji. Uwzględniono w nim postęp, który nastąpił w latach od 1977 r do połowy 1998 roku w dziedzinie koordynacji izolacji. Doświadczenia zdobyte w ostatnich kilkunastu latach (omawiane zwłaszcza w literaturze amerykańskiej i japońskiej oraz w publikacjach w czasopiśmie ELECTRA) wskazują na potrzebę, a nawet konieczność nowelizacji szóstego wydania „Wskazówek koordynacji izolacji...”.

Pożądane lub konieczne zmiany dotyczą, m.in. takich zagadnień jak:

- usunięcie nakazów lub zaleceń stosowania rozwiązań, uznanych obecnie za niepotrzebne lub bardzo kosztowne i nigdzie, ani nigdy nie zastosowanych w sieciach w żadnym kraju Unii Europejskiej;
- rezygnacja ze stosowania niewłaściwych układów ochrony (od przepięć i ochrony odgromowej);
- redukcja kosztów ochrony, dzięki eliminacji rozwiązań uznanych obecnie za zbyt kosztowne lub nieuzasadnione wieloletnimi doświadczeniami licznych krajów;
- dopuszczeniu stosowania nowoczesnych rozwiązań ochrony od przepięć, (np. lekkich tlenkowych ograniczników przepięć o umiarkowanej obciążalności znamionowej oraz w obudowie z izolacji polimerowej), zapewniających wystarczającą skuteczność ochrony;
- sformułowanie wymagań, dotyczących prętowych uziomów głębokich, rewelacji techniki uziemień i specjalizacji rodzimego przemysłu elektrotechnicznego.

Prace dotyczące siódmego wydania „Wskazówek koordynacji izolacji...” są obecnie w stadium końcowym. Opublikowanie tego dokumentu i przedłożenie jego treści do dyskusji wśród specjalistów przewiduje się na koniec 2005 roku.

Podsumowanie i wnioski

Nowoczesna koordynacja izolacji jest wynikiem kompromisu pomiędzy obecnymi możliwościami ograniczania parametrów przepięć, spodziewanych w pracujących sieciach elektrycznych, a kosztami izolacji urządzeń i kosztami jej ochrony.

Rozwiązania nowoczesnej koordynacji izolacji uwzględniają: powszechne zastosowanie w sieciach tlenkowych ograniczników przepięć (z warystorami ze spieków ceramicznych), wyniki wszechstronnych badań wytrzymałości elektrycznej rozmaitych układów izolacji powietrznej, wpro-

wadzenie w analizach wytrzymałości izolacji współczynnika przerwy iskrowej K oraz zastosowania metody „toczącej się kuli” w wymiarowaniu stref ochronnych przewodów odgromowych i piorunochronów stacyjnych.

Istnieje pilna potrzeba opracowania nowej, siódmej wersji „Wskazówek koordynacji izolacji sieci elektrycznych...”, uwzględniającej postęp techniczny i doświadczenia ostatniego dziesięciolecia.

Prace w zakresie nowelizacji wyżej wymienionych „Wskazówek...” są w stadium końcowym, a ich zakończenie w formie projektu do dyskusji specjalistycznej jest przewidziane na początek przyszłego roku. Zalecenia tego dokumentu powinny być poddane szerokiej dyskusji wśród specjalistów krajowych zajmujących się koordynacją izolacji

LITERATURA

- [1] IEC 60094, Surge arresters – Part 4: Metal oxide surge arresters without gaps for a. c. (1991). Odpowiednik polski: PN-EN-60099-4, Beziskiernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali (1994)
- [2] EN 60071-1: Insulation co-ordination: Definitions, principles and rules, (1995). Odp. Polski: PN-E 60071-1: Koordynacja izolacji. Definicje, zasady i reguły; (1999).
- [3] EN 60071-2: Insulation co-ordination: Application guide; (1997). Odp. polski: PN E 60071-2: Koordynacja izolacji – Przewodnik stosowania. (2000).
- [4] HD 637 S1 1999: Power installations exciding 1 kV a.c. CENELEC. (May 1999). Odp. P.: PN-E-05115 - Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV. (2002).
- [5] Flisowski Z., Zasady stosowania urządzeń piorunochronnych, *INPE*, nr 57, s. 3-19.
- [6] Leroy G., Gallet G., Kosztaluk R., Kromer I., Réseaux aériens à ultra-haute tension. Calcul des distances d'isolement, *Revue Générale de l'Electricité*. No spec. Juin 1974, p.27-44.
- [7] Kosztaluk R., Malewski R., Menemenlis C., Lanoie R., Nguen D.H., Effect of Time Shift between the Voltage Components on Phase-to-Phase insulations strength, *IEEE Trans. on PAS*, 1981, pp.3379-3387.
- [8] Kosztaluk R., Malewski R., Menemenlis C., Lanoie R., Nguen D.H., Mesures des parametres électriques et optiques des decharges interphases, *Conférence Canadienne sur les Communications et l'Energie*, Montréal, Oct. 1980. IEEE Publ. Cat. No 80 ch 1583-4 p.146-149.
- [9] Kosztaluk R., Iskra elektryczna Część 1. Przeskok udarowy w powietrzu *INPE* nr 65, s. 3-20. Część 2. Wylądowanie biegunowości dodatniej. *INPE* nr 66-67, s. 5-18. Część 3. Wylądowanie biegunowości ujemnej *INPE* nr 70. Część 4. Wylądowanie międzyfazowe *INPE* nr 71.
- [10] Kosztaluk R., Połoczanin P., Szczerbiński M., Strefy ochronne przewodów odgromowych i piorunochronów stacyjnych. *INPE*, Nr 68-69, s. 3-18.

Autor: Prof. dr hab. inż. Romuald Kosztaluk, Polski Komitet Ochrony Odgromowej