

Piorunochrony pseudoaktywne

Streszczenie. Opisano własności podstawowych form wyładowań elektrycznych w powietrzu: strimera i lidera. Wykazano, że strefa ochronna piorunochronów ESE z wczesną emisją strimera nie może być większa od strefy ochronnej klasycznych piorunochronów Franklina.

Abstract. The paper describes basic properties of two main types of electrical discharges in atmospheric air: streamer and leader. It was shown that the protection zone of Early Streamer Emission terminals can not be greater than the protection zone of classical Franklin terminals. (**Active lightning terminals**).

Słowa kluczowe: Strimer, lider, zwód, piorunochron ESE, strefa ochronna.

Keywords: Streamer, leader, lightning terminal, ESE terminal, protection zone.

Wstęp

Rozwój techniki dostarcza ludziom coraz lepsze, ciągle udoskonalane produkty oraz nowe generacje sprzętu otwierające nieznane do tej pory możliwości. Temu pozytywnemu procesowi towarzyszy niestety również proces negatywny, żerujący na ludzkiej łatwości i braku rzetelnej informacji. Przykładów wykorzystywania i oszukiwania ludzi jest bardzo wiele, już w średniowieczu handlowano podrabianymi relikwiami, oferowano cudowne farmaceutyki, wróżono świetlaną przyszłość. W nowszych czasach wyprodukowano bardzo dużo „rewelacyjnych” środków na porost włosów i na odchudzanie.

Rewelacyjne piorunochny są dla producentów znacznie bezpieczniejszym wyrobem niż rewelacyjne szampony i rewelacyjne diety. Skuteczność tych ostatnich można szybko zweryfikować. Niestety lub na szczęście (zależnie od punktu widzenia) skuteczność piorunochronów można zweryfikować najczęściej dopiero po latach gdyż uderzenie piorunu w obiekt niski zdarza się bardzo rzadko. Dlatego już w XIX stuleciu oferowano cudowne piorunochny. Świadczy o tym opis sprzedawcy i stosowanych przez niego technik psychologicznych przedstawiony przez słynnego amerykańskiego pisarza Hermana Melvilla w jego opowiadaniu „The Lightning-rod man” [1].

Od 20 lat na rynku dostępne są głowice zwane zwodami aktywnymi ESE wyposażone w specjalne urządzenie rzekomo inicjujące wczesną emisję oddolnego wyładowania strimerowego (ang. **E**arly **S**trimer **E**mission). Reklamy tych urządzeń zapewnają, że ich strefa ochronna jest znacznie większa od strefy klasycznych zwodów Franklina. Zarówno zasada działania jak i postulowane wielkości stref ochronnych zwodów aktywnych ESE nie zostały udowodnione i od początku wzbudziły liczne zastrzeżenia [2]. Pomimo tego, głowice te zaczęły być produkowane i instalowane w wielu krajach. Badania różnych autorów sugerują, że koncepcja zwodów aktywnych jest błędna ponieważ napięcie przebicia układów ze zwodami aktywnymi jest takie samo jak układów ze zwodami klasycznymi [3] [4]. Jednakże pomiary te wykonywane w laboratorium przy odstępach np. do 4 m i napięciu przebicia poniżej 2 MV nie są niezbitym dowodem na nieskuteczność zwodów ESE.

Trajektoria wyładowania piorunowego

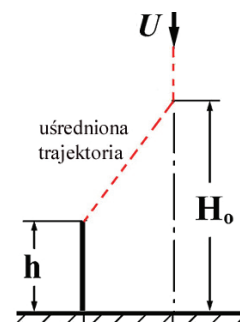
Piorun liniowy rozpoczyna swój rozwój w chmurze burzowej na wysokości kilku kilometrów nad powierzchnią ziemi. Na początku swej drogi porusza się po nieprzewidywalnej, zygzakowatej trajektorii wykazującej liczne odchylenia od kierunku pierwotnego, zewnętrznego pola elektrycznego pomiędzy powierzchnią ziemi a podstawą chmury. Wynika to z faktu, że pole w pobliżu zakończenia (czoła) wyładowania liderowego jest około 100

razy większe od pola zewnętrznego [5]. Źródłem tego pola jest ładunek rozłożony wzdłuż kanału lidera i w obszarze wyładowań strimerowych, rozwijających się przed zakończeniem lidera. Niekiedy można zaobserwować, że wyładowanie piorunowe rozwija się prostopadle lub nawet w kierunku odwrotnym do pola zewnętrznego (rys. 1).



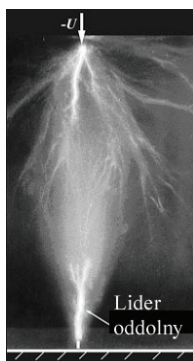
Rys.1. Dziwna trajektoria wyładowania piorunowego

Umieścimy na ziemi pionowy zwód modelujący naziemny obiekt o wysokości h i powieśmy nad nim elektrodę wysokonapięciową przesuniętą na prawo (rys. 2). Wyładowanie elektryczne z elektrody wysokonapięciowej będzie początkowo rozwijać się pionowo w dół ale na wysokości H_0 skręci w kierunku uziemionego zwodu.



Rys.2. Uśredniona trajektoria przebicia iskiernika ostrze – ostrze.

Mechanizm zmiany kierunku wyładowania piorunowego nie jest całkowicie zrozumiany. Najprościej można tłumaczyć to zjawisko zmianą pola elektrycznego spowodowaną przez ładunki elektryczne indukowane na powierzchni obiektu. Jednak wyniki obliczeń pokazują, że wpływ ładunków jest raczej słaby. Większe znaczenie ma tzw. lider oddolny, który rozwija się z najwyższego punktu obiektu i zawsze kieruje się w stronę lidera odgórnego. Połączenie obydwu liderów kończy proces ich rozwoju (rys. 3). Im dłuższy jest lider oddolny, to przechwytuje on piorun na większej odległości (wysokości).



Rys.3. Lider oddolny z uziemionej elektrody rozwijający się w warunkach laboratoryjnych.

Aby zwiększyć efektywność zwodu należy więc wygenerować lider oddolny oraz zwiększyć szybkość jego propagacji. W tym sformułowaniu nie ma nic sprzecznego z fizyką wyładowania elektrycznego. Przy obecnym stanie techniki cele te mogą być osiągnięte. Należy jednak zadać pytanie czy środki do ich realizacji nadają się do ich masowego zastosowania.

Zwody radioaktywne

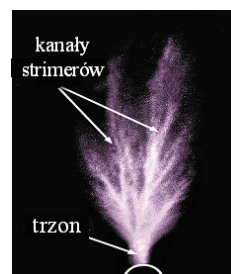
Produkcję tych zwodów rozpoczęto we Francji jeszcze przed II wojną światową [6]. Idea aby umieścić w pobliżu zakończenia zwodu substancję radioaktywną wydawała się bardzo interesująca ponieważ jej promieniowanie powoduje jonizację powietrza. Jonizacja gazu jest przecież warunkiem rozwoju wyładowania elektrycznego. Wydaje się dziwnym, że taki pomysł wykorzystano w kraju, w którym już w latach 1920-tych prowadzono bardzo poważne badania nad wpływem promieniowania radioaktywnego na rozwój iskrę długiej. Wykazano już wtedy, że efekt ten jest zerowy. Niestety wyniki tych badań pozostały nieznane lub szybko zapomniane w samej Francji.

Wyjaśnienie przyczyny niefortunności pomysłu jest całkiem łatwe. Przy zwodzie nie można umieścić bardzo silnej substancji promieniotwórczej ponieważ byłoby to niebezpieczne dla ludzi. Natomiast słabe źródło jonizacji i tak już tam się znajduje. Powietrze jonizuje się dzięki wyładowaniom koronowym (niezpełnym). Wyładowania te rozwijają się pod chmurą burzową wskutek silnego pola elektrycznego, które może osiągnąć natężenie $E_0 = 10 - 20$ kV/m. Na zwodzie o typowej wysokości $h = 10 - 20$ m powstaje napięcie $U = E_0 \cdot h = 100 - 400$ kV. Przy zakończeniu metalowego pręta o niewielkim promieniu r_0 , pole elektryczne $E(r_0) \sim U / r_0 = E_0 \cdot h / r_0$ z łatwością osiąga wartość przewyższającą próg jonizacji powietrza wynoszący 3000 kV/m. Ładunek generowany przez wyładowania koronowe jest zbyt mały aby mieć wpływ na rozwój dłuższej iskrę. Laboratoryjne próby już dawno temu wykazały, że iskra o długości 5 – 6 m zupełnie nie reaguje na promieniowanie radioaktywne generowane w pobliżu uziemionej elektrody. Oczywiście tym bardziej dotyczy to wielokrotnie dłuższego wyładowania piorunowego.

Czy możliwa jest kontrola lidera oddolnego ?

Na to pytanie trzeba znaleźć odpowiedź aby móc ocenić perspektywę budowy aktywnych zwodów o różnej zasadzie działania. Z naukowego punktu widzenia, odpowiedź na to pytanie jest trudnym zadaniem. Również analiza jakościowa wymaga podstawowej znajomości mechanizmu rozwoju iskrę długiej. Sądzimy, że nasze rozważania będą pomocne specjalistom zajmującym się ochroną odgromową i pozwolą im ocenić efektywność zwodów aktywnych oferowanych na rynku.

Wiadomo, że charakterystyki różnych typów wyładowań w gazie zależą od napięcia na iskierniku, od nierównomierności pola elektrycznego, temperatury i składu chemicznego gazu. Lider oddolny podlega oczywiście wszystkim tym prawom. Najistotniejsze nie są wcale problemy teoretyczne czy techniczne ale koszty budowy systemu aktywnego sterowania wyładowaniem oddolnym. System taki musiałby być niezawodny, tani i efektywny – tylko wówczas miałby on szansę na powszechne zastosowanie w ochronie odgromowej.

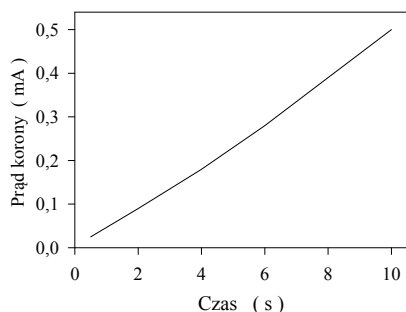


Rys.4. Wyładowanie strimerowe rozwijające się od uziemionej elektrody.

Wiadomo, że kanał lidera charakteryzujący się znacznym przewodnictwem może się rozwijać tylko wtedy gdy jego temperatura osiągnie bardzo wysoką wartość [7]. Jeśli powietrze jest zimne, wówczas elektrony uwolnione w silnym polu przy zakończeniu kanału, w czasie rzędu 1 ms przyczepiają się do elektroujemnych atomów tlenu lub pary wodnej. Utworzone w ten sposób ciężkie, ujemne jony o niskiej ruchliwości mogą obniżyć przewodnictwo plazmy nawet o trzy rzędy. Tylko w temperaturze wyższej od 5000 K elektrony mogą istnieć bardzo długo (tzn. dłużej niż czas rozwoju lidera oddolnego ~ 1 ms) zapewniając wydłużanie się tego wyładowania. Wyładowanie koronowe charakteryzuje się zbyt małą mocą aby możliwe było nagrzanie plazmy do temperatury 5000 K. Warunki te spełnia tylko wyładowanie liderowe.

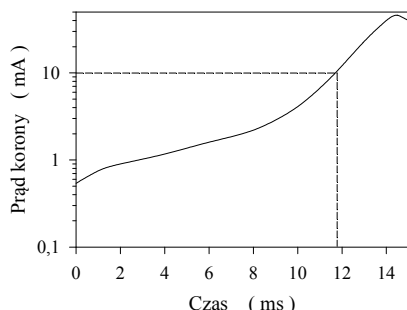
W warunkach laboratoryjnych można pokazać jak przy określonej wartości prądu wyładowanie koronowe zmienia swoją formę. Na wcześniejszej cienkiej, zjonizowanej strefie „przyklejonej” do elektrody, pojawia się gałąź składająca się wielu kanałów o długości rzędu 1 m (rys. 4). Są to strimery. Każdy z nich stanowi ślad lawiny elektronowej, mogącej poruszać się z prędkością 10^9 cm/s. Strimer jest wyładowaniem w którym początkowa gęstość elektronów osiąga wartość $10^{14} / \text{cm}^3$ [5]. Niestety, ponieważ powietrze w kanale strimera jest dosyć chłodne, gęstość elektronów szybko się zmniejsza. Pojedynczy strimer nie jest w stanie sam się podgrzać. Jednak skupienie się wielu kanałów strimerowych jakie można zaobserwować np. przy elektrodzie powoduje wzrost temperatury. W tym tzw. trzonie może dojść do utworzenia lidera (rys. 4).

Przed wszystkim prąd wyładowania koronowego powinien przekroczyć wartość krytyczną rzędu 10 mA, która stanowi minimalny prąd lidera [8]. Przy powoli narastającym polu od chmury burzowej (dziesiątki sekund) warunek ten nie może być spełniony nawet przy dużej wysokości zwodu. Ilustruje to rys. 5, na którym przedstawiono wyniki komputerowych obliczeń prądu wyładowań koronowych ze zwodu o wysokości 100 m pod chmurą burzową. Gdy pole elektryczne w ciągu 10 s osiąga wartość 20 kV/m, to prąd wzrasta do 0,5 mA. Oznacza to, że nawet dla tak wysokiego zwodu, prąd wyładowania koronowego jest 20 razy mniejszy od wartości krytycznej.



Rys.5. Wzrost prądu wyładowania koronowego ze zwodu pionowego o wysokości 100 m, promień wierzchołka 2 cm. Pole elektryczne od chmury burzowej narasta liniowo do 20 kV/m w ciągu 10 s.

Sytuacja zmienia się radykalnie gdy na pole elektryczne pochodzące od chmury burzowej nakłada się pole od rozwijającego się ku ziemi wyładowania piorunowego. Natężenie pola elektrycznego, pochodzącego od rozwijającego się kanału pioruna narasta bardzo szybko, ponieważ przebywa on odległość od chmury do ziemi w czasie 15 – 20 ms. Wyładowanie koronowe reaguje na szybką zmianę pola intensywnym wzrostem prądu. Z obliczeń przedstawionych na rys. 6 widać jak zachodzi ten proces przy typowej szybkości propagacji lidera schodkowego 2×10^5 m/s. Założono, że piorun powstał na wysokości 3000 m i wyładowanie rozwijało się pionowo w dół przy długości skoku lidera równej 300 m. W ciągu 11,8 ms od startu wyładowania odgórnego prąd wyładowania koronowego wzrósł do 10 mA czyli do wartości krytycznej przy której możliwy staje się start lidera oddolnego. Temu procesowi towarzyszył 1,5 krotny wzrost pola elektrycznego przy poziomie ziemi. Oznacza to, że decydującym czynnikiem jest nie tylko wartość natężenia pola elektrycznego E ale i jego szybkość narastania dE/dt .



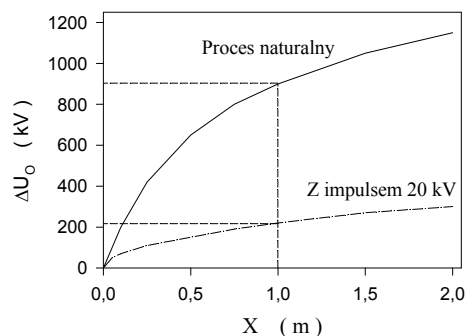
Rys.6. Wzrost prądu wyładowania koronowego z wierzchołka zwodu podczas zbliżania się pioruna liniowego. Parametry zwodu są takie same jak na rys. 5. Wyładowanie piorunowe rozpoczęło się na wysokości 3 km i o długości schodka 300 m Szybkość lidera 2×10^5 m/s, ładunek liniowy – 0,5 mC/m.

Ostatni wniosek jest bardzo istotny. Rzeczywiście, lider pioruna jest zjawiskiem krótkotrwałym o czasie trwania w zakresie milisekund. Przy zbliżaniu się lidera odgórnego do zwodu Franklina następuje dodatkowy wzrost pola elektrycznego przy zakończeniu zwodu o wartość rzędu $\Delta E_L \approx 10$ kV/m i wzrost prądu wyładowań koronowych do wartości krytycznej. Powoduje to dodatkowy spadek napięcia $\Delta U_L = \Delta E_L \cdot h \approx 1000$ kV, rozłożone wzdłuż długości zwodu h . Zgodnie z teorią, prąd niestacjonarnych wyładowań koronowych w polu elektrycznym jest proporcjonalny do iloczynu $E(dE/dt)^{1/2}$. Oznacza to, że równoważny efekt można osiągnąć przy 50 razy mniejszym napięciu (20 kV zamiast 1000 kV) jeśli udałoby się zwiększyć szybkość jego narastania o $50^2 = 2500$ razy. W tym celu na wierzchołku zwodu należy wygenerować

sterujący impuls o napięciu około 20 kV z czasem czoła o długości 1 μ s. Budowa takiego urządzenia nie stanowi obecnie żadnego problemu i dlatego wygenerowanie wyładowań strimerowych na wierzchołku zwodu jest zadaniem stosunkowo łatwym.

Jednak wygenerowanie lidera oddolnego jest zadaniem znacznie trudniejszym. Nie każde wyładowanie strimerowe jest zdolne do przekształcenia się w wyładowanie liderowe. Do tego potrzebna jest znaczna energia. Eksperymenty laboratoryjne i rozważania teoretyczne wykazały, że wyładowanie liderowe możliwe jest dopiero przy długości kanału strimera około 1 m. Jeśli chmura burzowa posiada ładunek ujemny (a tak bywa w 90% burz) to wyładowanie oddolne ma wówczas ładunek dodatni a napięcie potrzebne do rozwoju strimera o długości 1 m wynosi 400 – 500 kV [7]. Ta wartość stanowi kryterium przekształcenia się wyładowania strimerowego w lider oddolny.

Gdy lider oddolny powstaje w warunkach naturalnych czyli dzięki wzmocnieniu pola elektrycznego przez piorun liniowy, wówczas rozkład napięcia w strefie przyelektrodowej sprzyja spełnieniu warunku przekształcenia się strimerów w lider. Napięcie na długości 1 m rodzącego się właśnie lidera oddolnego znacznie przekracza 500 kV (rys. 7, krzywa górna). Jeśli będziemy próbować zainicjować rozwój lidera przez wygenerowanie stromego impulsu o niezbyt wielkim napięciu (np. o amplitudzie 20 kV jak w rozpatrywanym wcześniej przykładzie), to zamierzony efekt nie zostanie osiągnięty. Wyładowanie strimerowe nie jest w stanie przerodzić się w lider ponieważ napięcie na 1 m jego długości osiąga wartość zaledwie 200 kV (rys. 7, krzywa dolna). Do progowej wartości 400 – 500 kV jest jeszcze daleko i dlatego tego rodzaju próba kończy się niepowodzeniem.



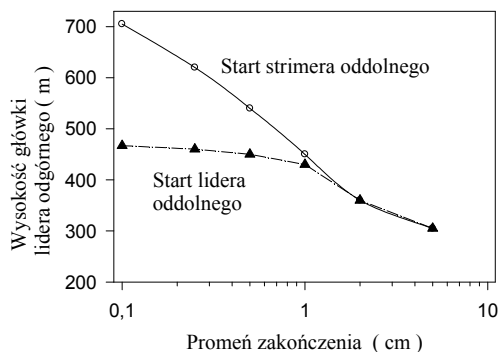
Rys.7. Rozkład napięcia w powietrzu w pobliżu wierzchołka zwodu o wysokości 100 m w chwili startu lidera oddolnego w rezultacie zbliżającego się wyładowania odgórnego (krzywa górna) i w wyniku wygenerowania stromego impulsu o amplitudzie 20 kV (krzywa dolna).

Teraz można zrozumieć, że taka próba może zakończyć się sukcesem tylko wówczas gdy amplituda impulsu trygerującego będzie porównywalna z 400 kV. Niestety kilkadziesiąt kilowoltów to zbyt mało. Trzeba zastosować znacznie wyższe napięcie, a to oznacza znacznie większe koszty.

Zwody ESE

Obecnie oferowanymi zwodami aktywnymi są zwody typu ESE. Nazwa ta jest skrótem od angielskiej nazwy Early Streamer Emission (wczesna emisja strimera). Zakłada się, że konstrukcja takiego zwodu powoduje wcześniejszą emisję strimera w porównaniu do emisji strimera ze zwodu Franklina. Ponadto, że z tego wcześniejszego strimera oczywiście rozwinię się lider oddolny, który przechwyci piorun liniowy na wysokości 5 – 6 razy wyższej niż lider oddolny ze zwodu Franklina. Charakterystycznym dla

zwodów ESE jest bardzo ostre, spiczaste zakończenie do którego dołącza się impuls napięciowy ze wbudowanego źródła, które stanowi zazwyczaj tajemnicę producenta. Podobno to źródło jest zasilane prądem wyładowania koronowego powstającego w polu elektrycznym od chmury burzowej. Grubość izolacji pomiędzy ostrzem a uziomioną podstawą zwodu aktywnego jest zazwyczaj grubości zaledwie kilku milimetrów co pozwala ocenić maksymalne napięcie pomiędzy tymi częściami na 20 – 30 kV. W poprzednim rozdziale wyjaśniono, że tak niskim napięciem nie można wygenerować lidera oddolnego. Należy jeszcze wyjaśnić znaczenie promienia zakończenia zwodu. To zagadnienie było przedmiotem szczegółowej analizy teoretycznej przedstawionej w pracy [8]. Na rys. 8 pokazano przy jakiej wysokości główki lidera odgórnego może zacząć rozwijać się wyładowanie strimerowe ze zwodu o wysokości 50 m w zależności od promienia jego zakończenia. Wpływ promienia jest oczywisty. Jednakże dla efektywnego działania zwodu nie jest ważne wyładowanie strimerowe a wyładowanie liderowe oddolne. Niestety w zakresie małych promieni zakończenia zwodu (< 1 cm) wpływ tego parametru na inicjację lidera oddolnego jest bardzo mały (rys. 8). A zatem ostre zakończenie zwodów aktywnych wcale nie poprawia ich skuteczności.

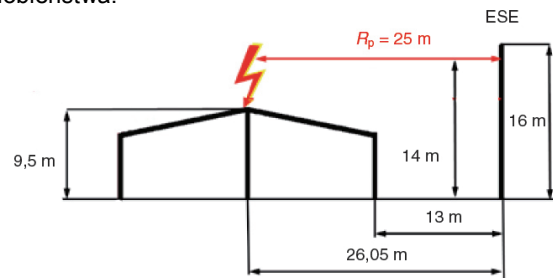


Rys.8. Wpływ promienia zakończenia zwodu pionowego o wysokości 50 m na warunki inicjacji rozwoju strimera i lidera oddolnego.

Można zatem wnioskować, że wykorzystanie zwodów ESE zamiast zwodów klasycznych o jednakowej wysokości nie może prowadzić do zwiększenia strefy ochronnej. Potwierdzają to wyniki prób polowych zwodów ESE i zwodów klasycznych przeprowadzone przez specjalistów z Uniwersytetu stanu New Mexico [9]. Próby te nie wykazały żadnych zalet zwodów aktywnych. Wiele dowodów nieskuteczności zwodów aktywnych zdokumentowano w Malezji, zazwyczaj na obiektach o znacznej wysokości [10]. Zaobserwowano również tego typu zdarzenie na jednorodzinym domu w Kamieńcu Wrocławskim w roku 2001 [3] oraz na stacji biogazu w miejscowości Malsice w Czechach w czerwcu 2011 [11]. Głowica aktywna z wewnętrzną cewką umieszczona na maszcie o wysokości 16 m znajdowała się w odległości 13 m od zbiornika biogazu. Pomimo deklarowanego promienia ochrony zwodu ESE wynoszącego rzekomo 65 m, piorun uderzył w środek pokrywy zbiornika na wysokości 9,5 m odległego o 25 m od zwodu ESE (rys. 9). W wyniku uderzenia powstał pożar i eksplozja gazu, która spowodowała straty w wysokości 5 mln koron czeskich.

Niestety, produkcja i reklama zwodów ESE jest ciągle kontynuowana. Metody stosowane w reklamie nie zawsze są uczciwe. Przedstawiane są protokoły badań zwodów ESE w laboratoriach wysokonapięciowych z zastosowaniem odstępów izolacyjnych osiągających nawet 10 m. Jednakże wyniki tych testów nie mogą stanowić dowodu efektywności zwodów ESE. Wyniki eksperymentów

laboratoryjnych nie można wykorzystywać do naturalnych warunków burzowych ponieważ piorun jest wielokrotnie dłuższym wyładowaniem elektrycznym o nieliniowych parametrach a proces jego rozwoju nie podlega prawom podobieństwa.



Rys.9. Uderzenie pioruna w zbiornik biogazu chronionego przez zwód ESE [11].

Wnioski

Aby zwód aktywny miał większą strefę ochronną od zwodu klasycznego, powinien odpowiednio wcześniej wygenerować wyładowanie liderowe oddolne o kilkumetrowej długości. Niestety takie wyładowanie wymaga zastosowania źródła o bardzo wysokim napięciu 1 – 2 MV.

Ewentualna wcześniejsza emisja strimerów ze zwodów aktywnych nie może spowodować zwiększenia ich strefy ochronnej.

Ostre zakończenie zwodów aktywnych ułatwia jedynie emisję wyładowania strimerowego ale nie wyładowania liderowego. Dlatego ostre zakończenie nie wpływa na zwiększenie ich efektywności.

Krystian Chrzan dziękuje Pani doc, Tatianie Ershovej za pomoc przy tłumaczeniu z języka rosyjskiego.

LITERATURA

- [1] Melville H. The lightning-rod man. Putman Magazine 1854, <http://www.melville.org/lrman.htm>
- [2] Uman M.A., Rakov V.A., A critical review of nonconventional approaches to lightning protection. Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 83, Issue 12, Dec. 2002, pp. 1809-1820
- [3] Chrzan K.L., Nieskuteczność pewnego zwodu aktywnego. Wiadomości Elektrotechniczne nr 1/2009, s. 35-37
- [4] Mikes J., Kvasnicka V., Pasivita aktivnich hromosvodu. Raport Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki w Pradze, 2003
- [5] Bazelyan E.M., Raizer J. P., Fizika molni i molnizaszchity. Wydawnictwo Fizmatlit, 2001
- [6] Chrzan K.L., Hartono Z., Inefficacy of radioactive terminals and early streamer emission terminals International Symposium on High Voltage Eng. ISH, Delft 2003, paper 075
- [7] Bazelyan E. M., Raizer J. P., Iskrowyj razriad. Wydawnictwo MFTI, 1997, s. 320
- [8] Aleksandrov N.L., Bazelyan E.M., Alesandro F.D., Raizer J.P., Depenence of lightning rod efficacy on its geometric dimension – computer simulation. Journal of Physics D: Appl. Phys. Vol. 38, 2005, pp. 1-14
- [9] Rison W., Experimental validation of conventional and non-conventional lightning protection systems. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Toronto 2003, pp. 2195-2200
- [10] Hartono Z.A., Robiah I., Performance of non-standard lightning air terminals: revisited. 29th Int. Conference on Lightning Protection, Uppsala 2008, paper 4-4
- [11] Kutac J., Martinek Z., Mikes J., Petrak M., Mimoradna udalost v arealu bioplynovne stanice v Malsicich. Elektro, Nr 11/2011, s. 23-26

Autorzy: prof. dr hab. inż. Eduard M. Bazelyan, Krzhizhanowsky Power Engineering Institute, Moscow, 117927, Leninsky Prospekt 19, Russia, bazelyan@eninet.ru, Krystian L. Chrzan, Politechnika Wroclawska, Instytut I – 7, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, krystian.chzan@pwr.wroc.pl