

Grzegorz MASŁOWSKI  
Politechnika Rzeszowska

## ANALIZA WYŁADOWAŃ ATMOSFERYCZNYCH NA POTRZEBY OCHRONY ODGROMOWEJ

W artykule zwrócono uwagę na ważne fakty dotyczące początków badań wyładowań atmosferycznych oraz rozwoju techniki ochrony odgromowej. Zwrócono szczególną uwagę na zasługi ks. Kazimierza Osińskiego w popularyzacji w XVIII wieku ochrony odgromowej w Polsce. Dokonano klasyfikacji wyładowań atmosferycznych doziemnych, przyjmując jako główne kryterium znak neutralizowanego w chmurze i dostarczanego do ziemi wypadkowego ładunku elektrycznego, a nie rodzaj polaryzacji lidera. Omówiono główne fazy wyładowania piorunowego, tj. rozwój lidera odgórnego, pierwsze i kolejne wyładowania główne, prąd długotrwały, składowe typu M oraz procesy strimerowe typu J i K. W przypadku fazy lidera odgórnego i wyładowań głównych podano również ich najważniejsze parametry, które często wykorzystuje się w ochronie odgromowej i przeciwprzepięciowej. Podczas charakterystyki prądu długotrwałego wyróżniono sześć często rejestrowanych kształtów fal tego prądu oraz zwrócono uwagę na możliwość nakładania się na niego tzw. składowych typu M, które mogą w znaczący sposób zwiększyć ilość transportowanego do ziemi ładunku elektrycznego.

### 1. Wstęp

Mechanizm powstawania burz frontowych i termicznych oraz złożony proces elektryzacji chmur burzowych starają się wyjaśnić liczne teorie, przegląd których można znaleźć w pracy [1]. W trakcie burzy mogą wystąpić wyładowania atmosferyczne w chmurach, pomiędzy chmurami, chmurą i jej otoczeniem oraz chmurą i ziemią. Spośród wszystkich wyładowań atmosferycznych tylko jedna czwarta to wyładowania doziemne, przy czym dane z systemów lokalizacji wyładowań atmosferycznych pokazują, że dokładne relacje ilościowe zależą od konkretnych warunków meteorologicznych, jak również od strefy geograficznej. Wyładowania atmosferyczne występujące w chmurach mogą oddziaływać bezpośrednio na samoloty i inne obiekty znajdujące się w pobliżu. Wywołują również zakłócenia elektromagnetyczne w czułych urządzeniach elektronicznych, pracujących na ziemi. Wyładowania doziemne są natomiast przyczyną porażeń ludzi i zwierząt, pożarów lasów i budynków oraz uszkodzeń urządzeń technicznych. W artykule dokonano klasyfikacji wyładowań doziemnych oraz przedstawiono główne fazy wyładowania atmosferycznego wraz z charakterystycznymi

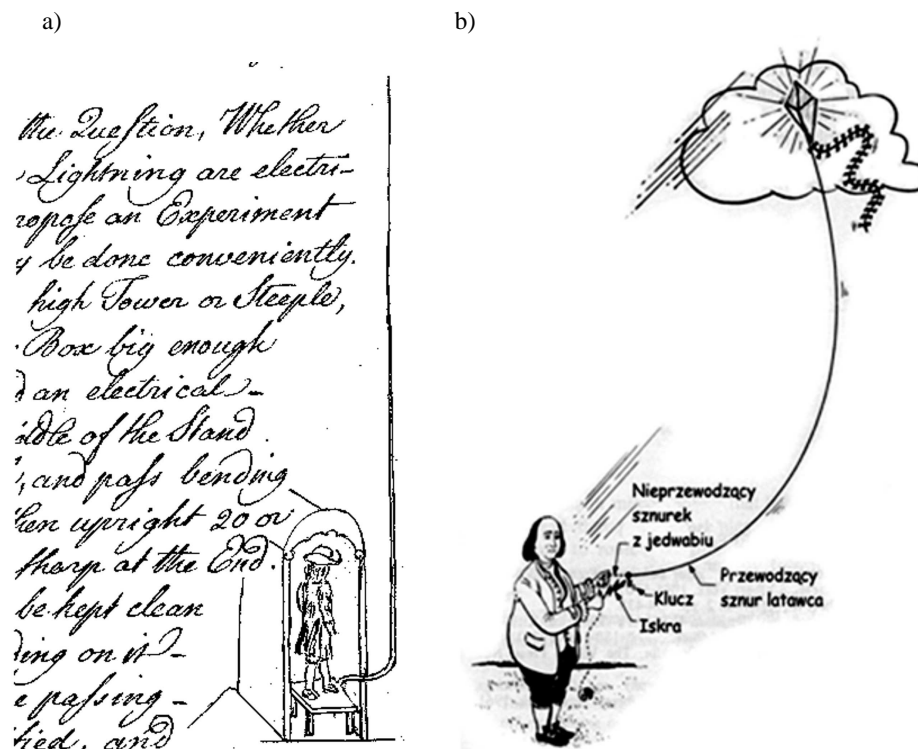
parametrami prądu piorunowego, istotnymi z punktu widzenia ochrony odgromowej i przeciwprzebieciowej.

## 2. Początki badań wyładowań atmosferycznych

Elektryczną naturę wyładowań atmosferycznych potwierdzono w połowie XVIII wieku. W 1750 roku Benjamin Franklin (1706-1790), amerykański uczo-ny i mąż stanu, opisał w liście do Petera Collinsona z Londynu doświadczenie, które miało wykazać istnienie w chmurze burzowej ładunku elektrycznego. Zgodnie z opisem Benjamina Franklina potencjał człowieka stojącego na wyso-kiej wieży w budce wartowniczej na odizolowanej podłodze z przymocowanym do niej długim prętem metalowym skierowanym w kierunku chmury nie będzie taki sam jak potencjał uziemionych ścian pomieszczenia, co może wywoływać przeskoki iskier (ang. *sentry-box experiment* – rys. 1a). Różnica tych potencjałów powinna zdaniem autora listu wynikać z polaryzacji ładunków różnoimiennych wewnątrz pręta na skutek oddziaływania wypadkowego ładunku elektrycznego chmury [2]. Niestety, brak funduszy uniemożliwił Benjaminowi Franklinowi realizację tego eksperymentu. List jego został jednak rozpowszechniony w Eu-ropie i po raz pierwszy doświadczenie tego typu przeprowadzono 10 maja 1752 r. w małej francuskiej miejscowości Marly-la-Ville, położonej nieopodal Paryża [3]. Podczas zbliżającej się burzy długi pręt metalowy umieszczono w szklanej butli, dzięki czemu możliwe było wytworzenie iskier pomiędzy jego końcem a ziemią. Dopiero kilka tygodni później w Pensylwanii Benjamin Franklin przeprowadził swój słynny „niskobudżetowy” eksperyment z lataw-cem, nic prawdopodobnie nie wiedząc o doświadczeniu w Marly-la-Ville (rys. 1b). Wykazał on wówczas nie tylko elektryczną naturę wyładowań pioruno-wych, ale również dipolowy rozkład ładunku elektrycznego w chmurze, co w praktyce oznaczało wprowadzenie przełomowego pojęcia ładunku ujemnego i dodatniego. Ładunek ujemny został zlokalizowany w dolnych częściach chmur burzowych, dodatni zaś w ich górnych partiach. Podobne eksperymenty były powtarzane w wielu innych krajach (m. in. w Niemczech, Anglii, Włoszech, Holandii, Rosji i Szwecji). Wszystkie one potwierdziły oczywiście elektryczną naturę wyładowań atmosferycznych.

Równoległe z badaniami wyładowań atmosferycznych zaczęła rozwijać się nowa dziedzina techniki, związana z ochroną odgromową. Ponownie Benjamin Franklin, jako pierwszy, zaproponował w 1753 r. do ochrony przed bezpośred-nimi wyładowaniami atmosferycznymi instalowanie uziemionego, metalowego pręta ponad najwyższym punktem obiektu [4]. W przypadku obiektów rozle-głych zalecał montaż dwóch uziemionych zwodów pionowych połączonych dodatkowo przewodem wzdłuż krawędzi dachu. Jako pierwszy zauważył rów-nież w 1780 r., że wymagające szczególnej ochrony magazyny z prochem strzelniczym powinny być otoczone dookoła metalową klatką. Po prawie stu latach, w 1876 r. do koncepcji ekranującej klatki ponownie powrócił James

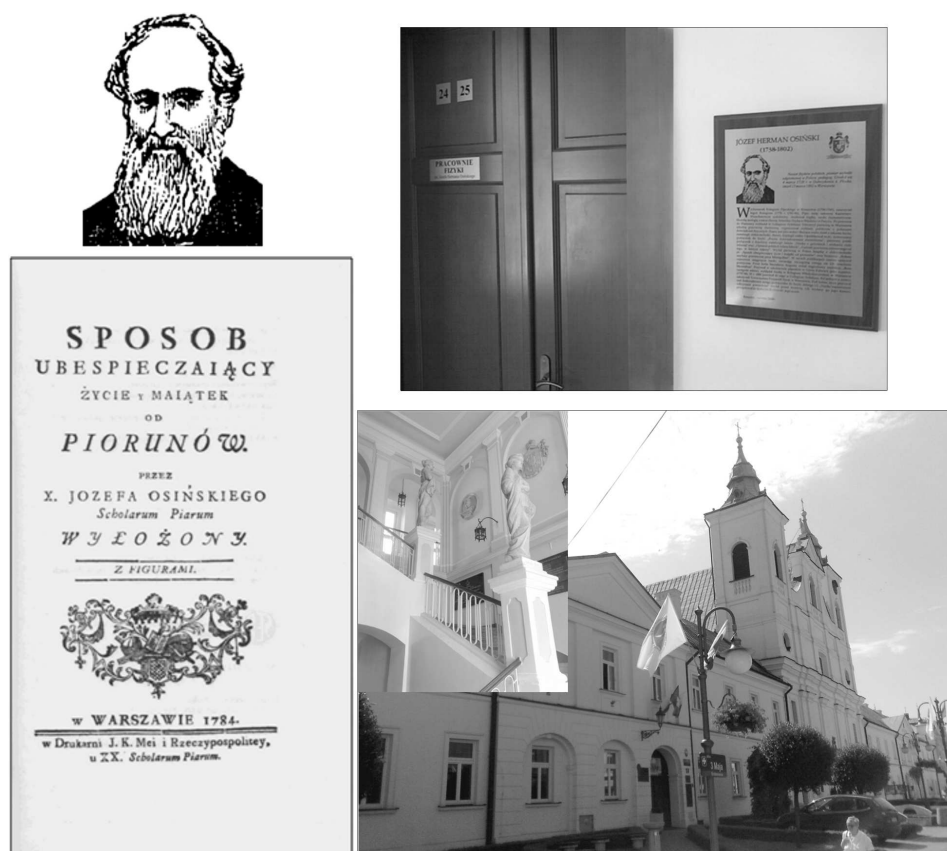
Clerk Maxwell, który prawdopodobnie nie wiedział o nowatorskim pomysłu Franklina [5].



Rys. 1. Eksperyment pierwszy (a) zaproponowany przez Benjamina Franklina w liście do Petera Collinsona z Londynu w 1750 roku [2] oraz drugi (b) przeprowadzony przez Franklina w Ameryce z wykorzystaniem latawca [3]

Nowe trendy w ochronie odgromowej przeniknęły również szybko do Polski. Duże zasługi w propagowaniu nowych idei należy przypisać pierwszemu polskiemu elektrykowi ks. Kazimierzowi Osińskiemu (1738-1802), znanemu też jako Józef Herman Osiński. Ukończył on w 1759 r. Kolegium Pijarskie w Rzeszowie (obecnie – I Liceum Ogólnokształcące im. ks. Stanisława Konarskiego – rys. 2.). Studiował początkowo nauki humanistyczne, logikę, filozofię. W Wiedniu i Paryżu zaznajomił się z najnowszymi osiągnięciami fizyki, chemii i botaniki. W 1783 roku powrócił do Rzeszowa [6] na cztery lata, gdzie jako nauczyciel Kolegium Pijarskiego (1783-1786) wydał trzy ważne prace [7-9], w tym jedną pt. *Sposób ubezpieczający życie y majątek od piorunów*, obecnie uznawaną za pierwszy w Polsce podręcznik z dziedziny elektrotechniki. Opisał w niej między innymi budowę oraz zasady instalacji urządzenia piorunochronnego. Ks.

Kazimierz Osieński był także autorem i tłumaczem wielu prac z fizyki, chemii oraz metalurgii.

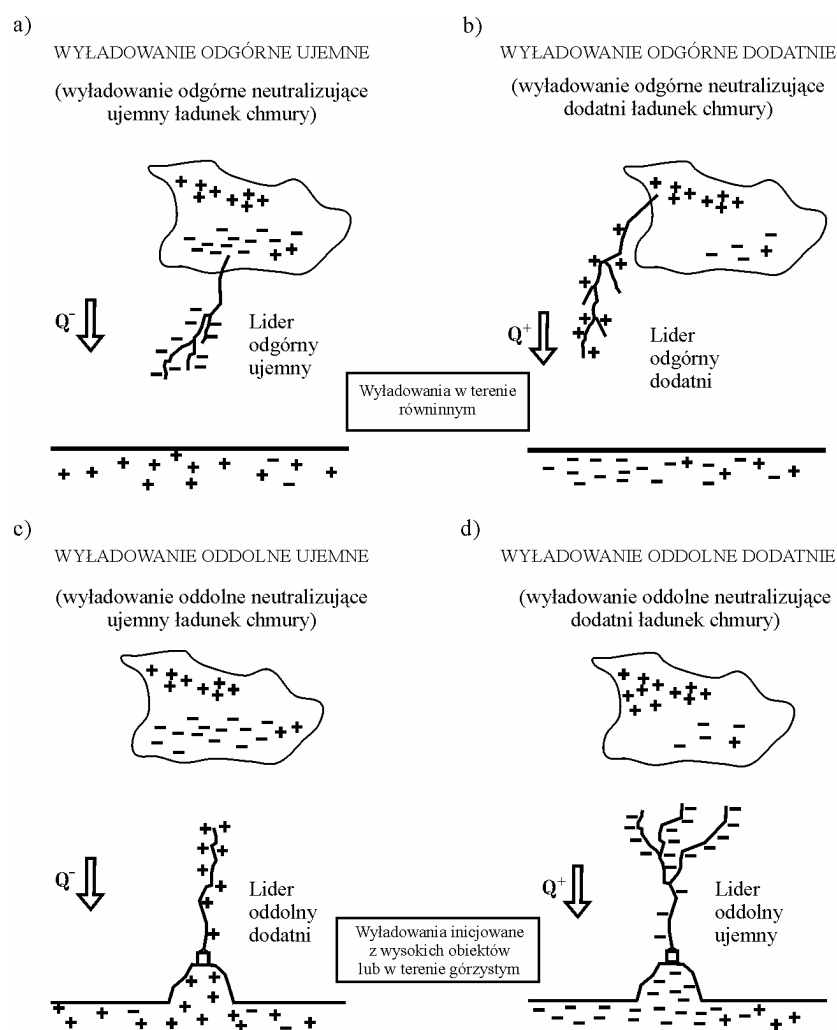


Rys. 2. Okładka pierwszej w Polsce pracy z dziedziny elektrotechniki i popiersie jej autora ks. Kazimierza Osieńskiego, wychowanka i nauczyciela Kolegium Pijarów w Rzeszowie [9]. Szkoła, której wykładowcą był też ks. Stanisław Konarski, twórca Collegium Nobilium, założona została w 1658 roku (obecnie I LO – zdjęcia w prawej kolumnie), a jej wychowankami byli między innymi tacy znani Polacy jak gen. Władysław Sikorski, św. Józef Sebastian Pelczar, Julian Przyboś czy też Kazimierz Dejmek [6]

Podsumowując, należy stwierdzić, że zaproponowane w XVIII wieku koncepcje zwođu Franklina i klatki Faradaya nadal z powodzeniem są wykorzystywane do ochrony współczesnych obiektów i urządzeń technicznych przed wyładowaniami atmosferycznymi. Ciekawe ujęcie historii rozwoju ochrony odgromowej w Polsce zawarto również w pracy [10].

### 3. Klasyfikacja wyładowań doziemnych

K. Berger [11] wyróżnił osiem typów wyładowań atmosferycznych. Cztery z nich, pokazane schematycznie na rys. 3., to wyładowania doziemne z ciągłym kanałem pomiędzy chmurą i ziemią. Pozostałe cztery typy dotyczą tzw. wyładowań urwanych (ang. *air discharges*), gdy lider nie dochodzi do ziemi (wyładowania urwane inicjowane odgórnie) lub do chmury (wyładowania urwane inicjowane oddolnie).



Rys. 3. Cztery typy wyładowań doziemnych [12]: a) wyładowanie ujemne inicjowane odgórnie, b) wyładowanie dodatnie inicjowane odgórnie, c) wyładowanie ujemne inicjowane oddolnie, d) wyładowanie dodatnie inicjowane oddolnie

Wyładowania ujemne inicjowane odgórnie liderami o polaryzacji ujemnej występują najczęściej na terenach równinnych (rys. 3a). Wyładowanie ujemne oznacza neutralizację ujemnego ładunku elektrycznego chmury, na skutek przepływu prądu w kanale piorunowym. W rezultacie do ziemi zostaje dostarczony wypadkowy ładunek ujemny, równy ładunkowi neutralizowanemu w chmurze. Znacznie rzadziej występują wyładowania dodatnie inicjowane odgórnie liderami o polaryzacji dodatniej (rys. 3b). Mogą się one rozwijać po serii wyładowań ujemnych, gdy w górnej części chmury pozostaje nieskompensowany ładunek dodatni. Pozostałe dwa typy to wyładowania inicjowane oddolnie, charakterystyczne dla terenów górzystych i tzw. obiektów wysokich. Silne pole elektryczne w pobliżu wyniosłości wywołuje rozwój lidera oddolnego o polaryzacji dodatniej lub ujemnej.

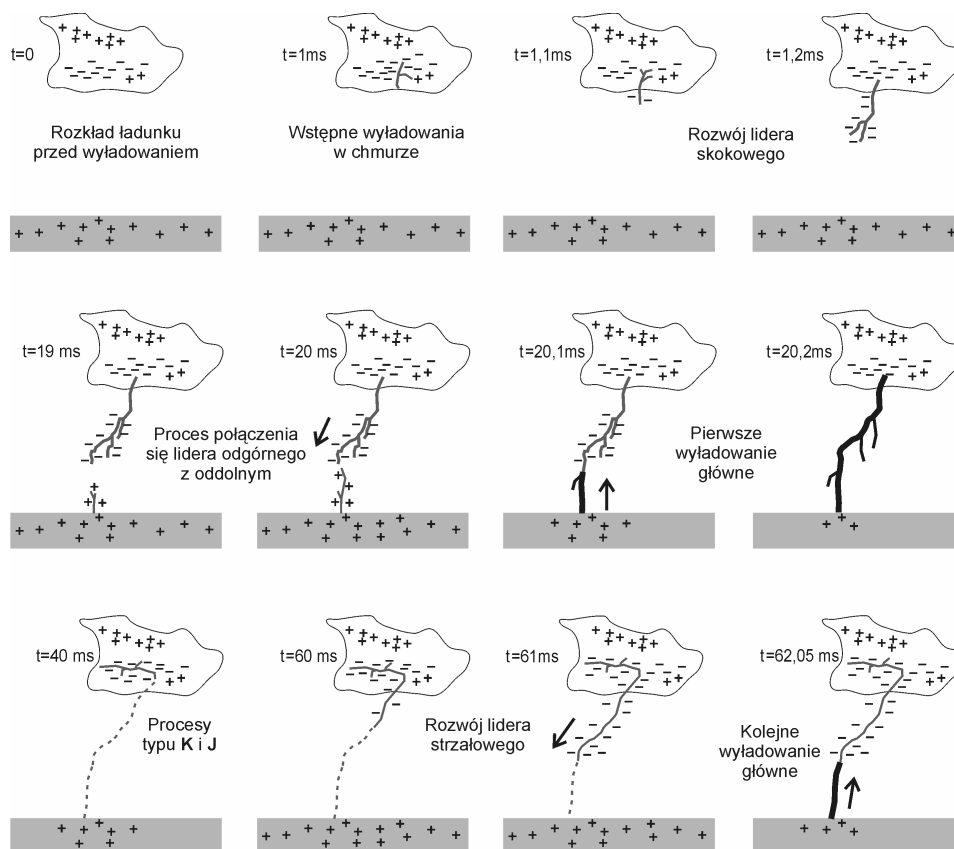
W pierwszym przypadku, znacznie częściej występującym, mamy do czynienia z wyładowaniami ujemnymi inicjowanymi oddolnie liderami o polaryzacji dodatniej (rys. 3c), natomiast w drugim przypadku mamy do czynienia z wyładowaniami dodatnimi inicjowanymi oddolnie liderami o polaryzacji ujemnej (rys. 3d). Przedstawiona klasyfikacja przyjmuje zatem jako główne kryterium znak neutralizowanego w chmurze i dostarczanego do ziemi wypadkowego ładunku elektrycznego, a nie rodzaj polaryzacji lidera [12].

#### 4. Główne fazy doziemnego wyładowania odgórnego

Cały proces wyładowania odgórnego można umownie podzielić na kilka faz obejmujących: wstępne wyładowania w chmurze (ang. *preliminary breakdown*), rozwój lidera skokowego (ang. *stepped leader*) oraz pierwsze wyładowanie główne (ang. *first return stroke*) mające charakter udaru krótkotrwałego (ang. *first short stroke*), którego prąd zanika praktycznie do zera w ciągu 2-4 ms. W przypadku wyładowań ujemnych bardzo często występują również następne wyładowania główne (ang. *subsequent return stroke*). Każde z nich poprzedza lider strzałowy (ang. *dart leader*) lub strzałowo-skokowy (ang. *dart-stepped leader*), który inicjuje z kolei w chmurze tzw. wyładowania strimerowe typu J i K (rys. 4.).

Bezpośrednio po pierwszym lub następnym wielkoprądowym udarze krótkotrwałym może w kanale piorunowym nastąpić przepływ prądu długotrwałego (ang. *continuing current*), zwanego też udarem długotrwałym (ang. *continuing stroke*), na który mogą nakładać się tzw. składowe prądu pioruna typu M (ang. *M-components*). Prąd udaru krótkotrwałego osiąga największe wartości natężenia i generuje najwyższy poziom zaburzeń elektromagnetycznych. Największy ładunek elektryczny przenoszą z kolei udary długotrwałe, które są przyczyną pożarów lasów i obiektów budowlanych oraz trwałych uszkodzeń urządzeń technicznych na skutek wywoływanych efektów cieplnych. Szybkozmiennie zaburzenia elektromagnetyczne, generowane przez pozostałe składowe wyłado-

wania atmosferycznego, mogą również zakłócać pracę czułych urządzeń elektronicznych.



Rys. 4. Przebieg doziemnego wyładowania ujemnego inicjowanego odgórnie z zaznaczonymi poszczególnymi fazami przepływu prądu w kanale piorunowym wg [13]

Wyładowania odgórne ujemne stanowią ok. 90% wszystkich wyładowań doziemnych występujących w terenie równinnym. Są one najczęściej wielokrotne, tzn. w trakcie ich trwania występuje kilka lub nawet kilkadziesiąt wyładowań głównych [14]. Pierwsze wyładowanie główne poprzedza **lider skokowy** inicjowany wyładowaniami wstępnymi zachodzącymi w dolnych partiach chmury burzowej. Lider skokowy rozwija się od chmury w kierunku ziemi w obszarze niezawierającym ładunku przestrzennego (niezjonizowanym), przez co jego kanał ma skomplikowany kształt i dodatkowo często ulega rozdzieleniu, tworząc charakterystyczne odgałęzienia. Losowy kształt i układ gałęzi widoczny w skali makroskopowej wynika z warunków lokalnych istniejących podczas rozwoju poszczególnych skoków lidera. Długość skoków lidera zmierzona przez B.F.J. Shonlanda zmieniała się w zakresie 10-200 m, natomiast odstępy czasowe po-

między poszczególnymi skokami wynosiły 40-100  $\mu\text{s}$  [15]. Późniejsze badania przeprowadzone na podstawie równoczesnych pomiarów pola elektrycznego i promieniowania świetlnego ograniczyły zakres długości skoku lidera do 50 m, a interwału czasowego do około 50  $\mu\text{s}$  [13].

Zarejestrowany czas narastania impulsów pola elektrycznego, wytwarzanych przez prąd płynący w trakcie rozwoju pojedynczego skoku lidera, wynosi około 0,3  $\mu\text{s}$ , a czas do pólsczytu na grzbiecie opadającym około 0,5  $\mu\text{s}$ . Oszacowana na ich podstawie wartość maksymalna prądu w rozwijającym się blisko ziemi kanale zawiera się w przedziale 2-8 kA, a jego stromość narastania w przedziale 6-24 kA/ $\mu\text{s}$  [16]. Średnie wartości prądu w całym kanale są oczywiście dużo niższe i wynoszą 100-200 A. Wartość średnia nie może jednak stanowić w tym przypadku o poziomie ryzyka wystąpienia groźnych zaburzeń elektromagnetycznych. Wytwarzane w pobliżu ziemi, tuż przed pierwszym wyładowaniem głównym, impulsy pola mogą być przyczyną zakłóceń czułych urządzeń elektronicznych. Wyznaczone parametry lidera skokowego przedstawiono w tabeli 1. Wynika z niej, że całkowity czas trwania tego lidera wynosi około 35 ms, a średnia prędkość rozwoju jest równa 0,2 m/ $\mu\text{s}$ , co odpowiada kanałowi o długości 7 km. Przyjmując dodatkowo, że ładunek elektryczny rozłożony wokół rdzenia kanału lidera skokowego wynosi przeciętnie 5 C [17], można oszacować średnią gęstość liniową tego ładunku na około 0,7 mC/m.

Tabela 1. Parametry lidera skokowego wg [12]

Długość pojedynczego skoku lidera [m]	50
Odstęp czasowy pomiędzy skokami [ $\mu\text{s}$ ]	20-50
Prąd w trakcie skoku [kA]	>1
Średni prąd w kanale [kA]	0,1-0,2
Ładunek wzdłuż pojedynczego skoku [mC]	>1
Średnia prędkość rozwoju lidera [m/ $\mu\text{s}$ ]	0,2
Czas rozwoju całego lidera [ms]	35
Ładunek rozłożony wzdłuż kanału [C]	5
Różnica potencjałów elektrycznych [MV]	ok. 50
Temperatura rdzenia kanału [K]	ok. 10000

Po pierwszym wyładowaniu głównym, w odstępach czasu wynoszących średnio 50 ms, dochodzi zwykle do następnych wyładowań głównych. W przerwach tych kanał stygnie i nie przewodzi prądu. M.A. Uman i R.E. Voshall [18] wykazali, że jeśli temperatura rdzenia kanału w trakcie wielkoprądowego udaru krótkotrwałego dochodzi do 30 000 K, to tempo stygnięcia umożliwia utrzymanie go w częściowej jonizacji przez okres kilkudziesięciu milisekund, przy czym najszybciej ulega degradacji dolna część kanału piorunowego. Jego nieciągłość w pobliżu ziemi jest właśnie przyczyną zaniku prądu, a zarazem warunkiem koniecznym do rozwoju w tym samym kanale kolejnego lidera. Dzięki zachod-



dzącym w chmurze procesom strimerowym typu J i K, które dostarczają nowe porcje ładunku do kanału, pod koniec przerwy inicjowany jest tzw. **lider strzałowy**. Lider ten, nazywany czasami niezbyt trafnie liderem ciągłym (ang. *continuous leader*), rozwija się bez odgałęzień w tym samym kanale co poprzedzający go pierwszy udar krótkotrwały. Typowy czas rozwoju całego lidera strzałowego zawiera się w przedziale 1-2 ms (tab. 1.).



Rys. 5. Wyładowanie piorunowe zarejestrowane w Rzeszowie 30 maja 2005 r.: a) kanał rozdzielił się tuż nad ziemią, lecz na podstawie zdjęcia wykonanego stacjonarnym aparatem fotograficznym nie można stwierdzić, czy miało miejsce bardzo rzadkie wyładowanie dwupunktowe, czy też jedna ze składowych wyładowania rozwijała się wzdłuż kanału lidera strzałowo-skokowego, który utworzył dodatkowe połączenie z ziemią, b) typowe wyładowanie doziemne jednopunktowe, c) dwa wyładowania doziemne mniej więcej z tego samego centrum w chmurze, pierwsze zmierza w przybliżeniu pionowo do ziemi, natomiast kanał drugiego jest początkowo prawie równoległy do powierzchni ziemi (fot. E. Gąsior-Antos)

Szacuje się, że ponad jedna trzecia liderów poprzedzających drugie wyładowanie główne ma nieco odmienny charakter [19]. W pierwszej fazie rozwijają się one podobnie jak typowy lider strzałowy, tzn. w przybliżeniu w sposób ciągły, a następnie skokowo, często zbaczając na wysokościach 0,7-3,4 km z pierwotnie uformowanego kanału piorunowego (rys. 5a). Taki typ lidera zwany jest **strzałowo-skokowym** (ang. *dart-stepped leader*) [20]. Jeśli skokowa faza odbywa się w pierwotnym kanale, to pojedyncze skoki i odstępy czasu pomiędzy nimi są krótsze niż w przypadku, gdy lider tworzy nowe połączenie z ziemią. Typowy czas trwania lidera strzałowo-schodkowego, który utworzył nowe odgałęzienie w pobliżu ziemi, wynosi 15 ms.

Według współczesnych poglądów występowanie tego typu liderów tłumaczy się zbyt długimi odstępami czasowymi pomiędzy kolejnymi wyładowaniami głównymi, co sprzyja degradacji kanału w pobliżu ziemi i rozwijaniu się liderów strzałowo-skokowych dochodzących do różnych miejsc na powierzchni ziemi. Jeśli przerwa jest dłuższa niż 100 ms, to rozwój kolejnego lidera i wielkoprądowego udaru krótkotrwałego w tym samym kanale nie jest już możliwy. Może natomiast rozwinąć się w pobliżu nowy lider skokowy, zapoczątkowując następne wyładowanie piorunowe. Od wyładowań wielokrotnych, dochodzących do różnych punktów na ziemi w różnym czasie, należy odróżnić bardzo rzadkie wyładowania wielopunktowe, podczas których ten sam lider rozdziela się nad ziemią na dwie lub więcej gałęzi, wzdłuż których równocześnie przepływa udar krótkotrwały. W tabeli 2. zamieszczono typowe parametry lidera strzałowego i lidera strzałowo-skokowego.

Tabela 2. Parametry lidera strzałowego i lidera strzałowo-skokowego wg [14]

<b>Lider strzałowy</b>	
Średnia prędkość lidera [m/μs]	10-20
Czas rozwoju całego lidera [ms]	1-2
Ładunek rozłożony wzdłuż kanału [C]	1
Średni prąd w kanale [kA]	1
Różnica potencjałów elektrycznych [MV]	ok. 15
Temperatura rdzenia kanału [K]	ok. 20000
<b>Lider strzałowo-skokowy</b>	
Średnia prędkość rozwoju lidera [m/μs]	1-2
Czas rozwoju całego lidera [ms]	15
Długość pojedynczego skoku [m]	10
Odstęp czasowy pomiędzy skokami [μs]	5-10

W trakcie wyładowań odgórnych zbliżający się do powierzchni ziemi lider skokowy inicjuje rozwój lidera oddolnego. Proces połączenia liderów (ang. *attachment process*), występujący najczęściej na wysokości kilkudziesięciu me-

trów, jest bardzo złożony i jego mechanizm nie jest dotychczas dokładnie zbadany. Czas trwania wielkoprądowego udaru krótkotrwałego do chwili, gdy prąd zanika w kanale praktycznie do zera wynosi z reguły 2-4 ms. Najważniejsze parametry wyładowań głównych wykorzystywane w ochronie odgromowej zostaną szczegółowo przedstawione w następnej sekcji.

Bezpośrednio po pierwszym lub następnym wyładowaniu głównym może w tym samym kanale piorunowym nastąpić przepływ tzw. **prądu długotrwałego**, który ze względu na kształt przebiegu można również określić udarem długotrwałym. W przypadku wyładowań ujemnych jego wartość szczytowa nie przekracza z reguły kilkuset amperów, a typowy czas jego trwania jest rzędu dziesiątek milisekund. Pomimo niewielkiego natężenia prądu wielkość przenoszonego ładunku elektrycznego może dochodzić do kilkudziesięciu kulombów (tab. 3.), co wywołuje groźne efekty cieplne będące przyczyną między innymi pożarów lasów, obiektów budowlanych, zerwania przewodów napowietrznych, wypalenia dziur w poszyciach metalowych samolotów, uszkodzenia zabezpieczeń transformatorów, jak również przepalenia urządzeń elektrycznych i elektronicznych.

Tabela 3. Parametry prądu długotrwałego i składowych typu M wg [12]

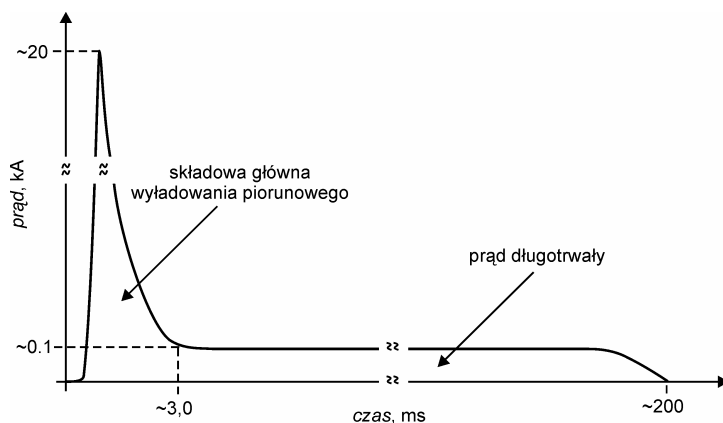
<b>Prąd długotrwały płynący dłużej niż 40 ms</b>	
Średnia wartość prądu [A]	100-200
Czas trwania [ms]	ok. 100
Ładunek przenoszony [C]	10-20
<b>Składowe prądu typu M</b>	
Wartość szczytowa prądu [A]	100-200
Czas narastania czoła fali prądowej [ $\mu$ s]	300-500
Ładunek przenoszony [C]	0.1-0.2

N. Kitagawa i in. [21] oraz M. Brook i in. [22] zdefiniowali prąd długotrwały jako prąd płynący w kanale piorunowym bezpośrednio po wyładowaniu głównym dłużej niż 40 ms (ang. „*long*” *continuing current*). M.A. Uman [23] do prądów długotrwałych zalicza również udary, które zanikają w ciągu 10-40 ms (ang. „*short*” *continuing current*), a nawet prąd płynący dłużej niż 1 ms i krócej niż 10 ms (ang. „*very-short*” *continuing current*). Dla odróżnienia udaru długotrwałego od wielkoprądowego krótkotrwałego M.G. Ballarotti i in. [24] zaproponowali ostatnio, aby dolna granica czasu trwania tego pierwszego nie była mniejsza niż 3 ms. W normie PN-EN 62305-1 [25] przyjęto natomiast, że maksymalny czas trwania udaru krótkotrwałego nie przekracza 2 ms.

W pracy [14] autorzy dokonali analizy dostępnych danych eksperymentalnych, z których wynika, że w przypadku wyładowań odgórnych ujemnych z pojedynczym wyładowaniem głównym prąd długotrwały rejestrowano tylko dla ok. 1% przypadków. Najczęściej prąd ten występował podczas wyładowań z dwoma wyładowaniami głównymi (ok. 15% przypadków), wśród których tyl-

ko niecałe 40% wyładowań miało go po drugim wyładowaniu głównym, natomiast aż 60% po pierwszym.

W wyładowaniach wielokrotnych, nieprzekraczających ośmiu wyładowań głównych, prąd długotrwały płynął w 10-15% przypadków, lecz tym razem udział wyładowań z prądem długotrwałym występującym na końcu wyładowania piorunowego był większy i wynosił ok. 60%. Gdy liczba wyładowań głównych wynosiła od 9 do 11, to prąd długotrwały występował w 10% przypadków i zaledwie 30% wyładowań miało go na końcu. W wyładowaniach ujemnych, mających jeszcze większą liczbę wyładowań głównych, prąd długotrwały występował już tylko w 3% przypadków. Z podanych danych wynika między innymi wniosek, że prąd długotrwały nie zawsze występuje na końcu wyładowania piorunowego, zawsze jednak towarzyszy mu jedno z wyładowań głównych. M. Brook [22] sugerował, że występuje on często bezpośrednio po wyładowaniu neutralizującym mały ładunek elektryczny, które wystąpiło po stosunkowo krótkiej przerwie po wyładowaniu neutralizującym z kolei duży ładunek elektryczny.

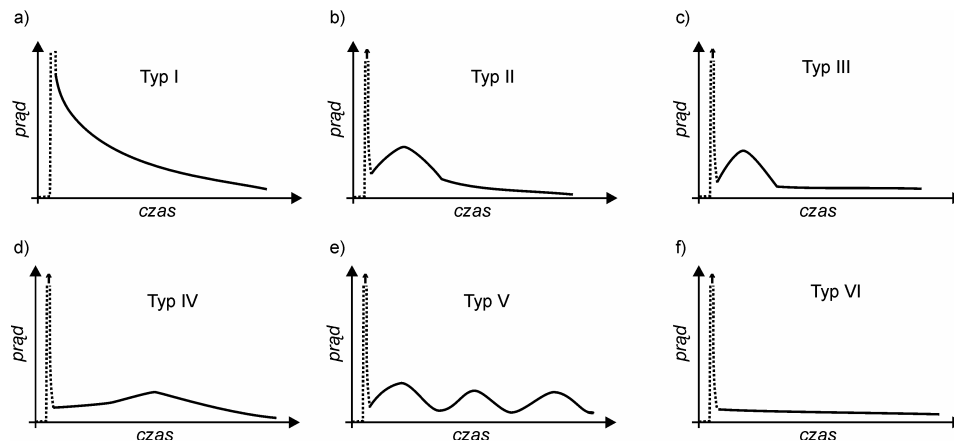


Rys. 6. Uproszczony kształt fali prądowej wyładowania głównego i następującego po nim prądu długotrwałego. Na osi pionowej i poziomej zaznaczono przykładowe wartości mieszczące się w przedziale zmienności prądu i czasu trwania wyróżnionych faz wyładowania piorunowego [12]

Ostatnie badania przeprowadzone w Brazylii pokazały, że istnieje związek pomiędzy wartością szczytową prądu wyładowania głównego poprzedzającego prąd długotrwały i jego czasem trwania. M.M.F. Saba i in. [26] zarejestrowali szybką kamerą wideo 311 wyładowań odgórnych ujemnych zawierających łącznie 1243 wyładowań głównych. Po 454 wielkoprądowych uderzeniach krótkotrwałych (37%) płynął prąd długotrwały dłuższy niż 3 ms. Odnotowano także 16 wyładowań odgórnych dodatnich, głównie pojedynczych, wśród których 9 miało na końcu prąd długotrwały. Rejestracje wideo przeprowadzone równoległe z pomiarami pola elektrycznego zostały uzupełnione danymi z brazylijskiego

systemu lokalizacji wyładowań atmosferycznych RINDAT (*Brazilian Lightning Detection Network*). Analiza danych wykazała, że w przypadku wyładowań ujemnych prąd długotrwały, dłuższy niż 40 ms, nie występuje po wyładowaniach głównych mających wartość szczytową większą niż 20 kA. Zasady tej nie stosuje się jednak do wyładowań dodatnich. Dla celów ochrony odgromowej przyjmuje się często uproszczony kształt prądu długotrwałego w postaci fali prostokątnej, występującej bezpośrednio po udarze krótkotrwałym (rys. 6.).

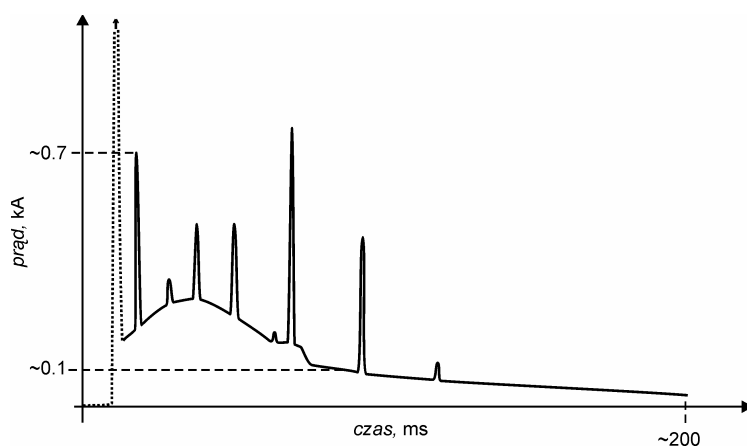
W rzeczywistości kształt ten jest bardziej złożony. R.J. Fisher i in. [27] wyróżnili w trakcie badań wyładowań prowokowanych cztery typy prądu długotrwałego. Po analizie rejestracji wyładowań naturalnych szybką kamerą wideo M.M.F. Saba i in. [28] wyróżnili sześć typów prądu długotrwałego, przy czym cztery z nich pokrywały się z typami opisanymi przez R.J. Fishera. Zakładali oni liniową zależność pomiędzy jasnością pikseli widocznych na poszczególnych klatkach i natężeniem prądu w kanale, co dla prądów nieprzekraczających kilkuset amperów zostało potwierdzone w innych badaniach. Poglądowy rys. 7. pokazuje główne różnice pomiędzy kształtami rejestrowanych udarów długotrwałych.



Rys. 7. Charakterystyczne cechy sześciu typów fal prądu długotrwałego wg [12] opisane w pracy [28] na podstawie badań wyładowań naturalnych: a) typ I – prąd zanika w przybliżeniu wykładniczo, b) typ II – prąd ma wyraźny garb na początku, po którym maleje jednostajnie, c) typ III – podobny do typu II, z tym że po garbie prąd przez dłuższy czas utrzymuje stałą wartość, d) typ IV – w pierwszej fazie prąd rośnie w przybliżeniu jednostajnie, a następnie w podobny sposób maleje, e) typ V – prąd pulsuje, tworząc charakterystyczne garby, f) typ VI – po zakończonym wyładowaniu głównym prąd utrzymuje się bardzo długo na stałym poziomie (linią przerywaną oznaczono część zbocza narastającego i opadającego wyładowania głównego)

W badaniach wyładowań prowokowanych najczęściej występował prąd długotrwały typu I (47% przypadków) i typu II (36% przypadków), rzadziej natomiast typu III (7% przypadków) i typu IV (10% przypadków). Z kolei w przypadku wyładowań naturalnych najczęściej rejestrowano w Brazylii udar

typu VI (35% przypadków), który nie występował w przypadku wyładowań prowokowanych. Prąd długotrwały mający kształt typu I wystąpił natomiast dla 24% przypadków.



Rys. 8. Uproszczony kształt prądu długotrwałego z nałożonymi składowymi typu M. Na osi pionowej i poziomej zaznaczono przykładowe wartości mieszczące się w przedziale zmienności prądu i czasu trwania wyróżnionych faz wyładowania piorunowego (linią przerywaną oznaczono część zbocza narastającego i opadającego wyładowania głównego) [12]

Na udar długotrwały często nakładają się impulsy prądowe, zwane **składowymi typu M**. Oznaczenie to pochodzi od nazwiska D.J. Malana, który wspólnie z H. Collensem po raz pierwszy w 1937 r. zarejestrował i opisał mniej lub bardziej intensywne rozświetlenia kanału piorunowego w trakcie przepływu prądu długotrwałego. R. Thottappillil [29], badając wyładowania prowokowane na Florydzie, także mierzył prąd składowych typu M. Obserwował on wzrost tego prądu do wartości kilkuset amperów w ciągu kilkuset mikrosekund, a następnie jego spadek w tym samym tempie do wartości początkowej. W niektórych przypadkach wartości szczytowe składowych typu M dochodziły nawet do kilku kiloamperów i były porównywalne z wartościami szczytowymi słabych wyładowań głównych. Późniejsze prace oparte na analizie dodatkowych pomiarów wyładowań sztucznie inicjowanych potwierdziły i uściśliły wcześniej sformułowane wnioski [29].

W latach 2003-2005 rejestrowano w Brazylii składowe typu M wyładowań naturalnych z wykorzystaniem szybkiej kamery wideo [28]. Z uzyskanych danych wynika, że ich typowy czas trwania wynosi około 4 ms, czyli jest porównywalny z czasem trwania całego procesu wyładowania głównego. W przypadku wyładowań prowokowanych czas trwania składowych typu M jest prawie dwukrotnie krótszy, co potwierdza nieco odmienną naturę tego rodzaju wyładowań. Przykładowy kształt prądu długotrwałego wraz ze składowymi typu M i poprzedzającym wyładowaniem głównym pokazano w uproszczony sposób na

rys. 8. Wybrane parametry fal prądowych odpowiadających składowym typu M zamieszczono w tabeli 3. razem z parametrami udaru długotrwałego.

Na zakończenie omawiania głównych faz wyładowania piorunowego należy zwrócić uwagę na zjawiska występujące w chmurze burzowej. Otóż dużą rolę podczas inicjacji kolejnych wyładowań głównych przypisuje się tzw. procesom strimerowym typu J (ang. „*junction*”), które są rejestrowane jako wolno zmieniające się pole elektryczne, nieco słabsze w porównaniu z polem elektrycznym prądu długotrwałego. Ocenia się, że są one odpowiedzialne za dostarczanie w okolice kanału piorunowego nowych porcji ładunku ujemnego, rozmieszczonego w dalszych obszarach chmury. Transport tego ładunku odbywa się w czasie rzędu dziesiątek milisekund. Na oscylogramach pola elektrycznego widoczne są także znacznie krótsze impulsy o czasie narastania wynoszącym ok. 3 ms, które nakładają się na zmiany pola typu J. Impulsy te związane są z innymi procesami strimerowymi typu K (niem. „*kleine*”). Ich natura nie jest jeszcze do końca wyjaśniona. Przypuszcza się, że mogą one być wywołane ujemnymi wyładowaniami wewnątrzchmurowymi (ang. *recoil streamer*), powstającymi w trakcie rozwoju dodatniego lidera formującego kanał dla procesów typu J. Według innej hipotezy procesy typu K występują w urwanym liderze odgórnym, który nie zdołał uformować ciągłego kanału pomiędzy chmurą i ziemią. Zmianom pola elektrycznego typu K często towarzyszą ciągi regularnych impulsów (ang. *regular pulse bursts*) widoczne na rejestratorach w skali mikrosekundowej [14].

## 5. Parametry wyładowania piorunowego wykorzystywane w ochronie odgromowej

W tabeli 3. przedstawiono parametry prądu pierwszego i kolejnych wyładowań głównych występujących w trakcie ujemnych wyładowań doziemnych. Zalecenia CIGRE ([30-33]), tylko w przypadku wartości szczytowych i stromości narastania prądu, nieznacznie różnią się od wartości parametrów ustalonych przez K. Bergera ([34-35]). Pozostałe parametry, takie jak czas narastania czoła, czas do półszczytu na grzbiecie opadającym fali, przenoszony ładunek oraz energia właściwa wyładowania, są identyczne. Parametry charakteryzujące cały proces wyładowania odgórnego ujemnego zamieszczono w tabeli 4.

W obydwu tabelach pokazano również typowe wartości parametrów prądu piorunowego uzyskane na podstawie analizy danych eksperymentalnych dotychczas zgromadzonych w Międzynarodowym Centrum Badań Wyładowań Atmosferycznych na Florydzie [14]. Zaproponowane przez V.A. Rakova i M.A. Umana wartości parametrów wyładowań głównych w większości pokrywają się z parametrami wyznaczonymi przez K. Bergera dla kwantyli rzędu 0,5. Wyjątek stanowi czas narastania czoła kolejnego wyładowania głównego oraz jego maksymalna stromość narastania. Dla całego procesu wyładowania piorunowego ujemnego autorzy pracy [14] przewidują dłuższy czas jego trwania, większy

ładunek elektryczny neutralizowany w chmurze oraz nieco dłuższe odstępy czasu pomiędzy kolejnymi wyładowaniami głównymi.

Obecnie za najbardziej wiarygodne uznaje się nadal parametry wyładowań atmosferycznych wyznaczone przez K. Bergera w trakcie pomiarów na górze Szwajcarii. Jak już wspomniano, przyjęto je z drobnymi modyfikacjami w zaleceniach międzynarodowych CIGRE oraz w opracowanych normach ochrony odgromowej serii PN-EN 62305. Obecnie trwają prace związane z uzupełnieniem i uszczegółowieniem parametrów wyładowań atmosferycznych w oparciu o wyniki badań z ostatnich kilkunastu lat, głównie w oparciu o dostępne rejestracje systemów lokalizacji wyładowań doziemnych.

Tabela 4. Wartości parametrów wyładowań głównych ujemnych wraz z prawdopodobieństwem ich przekroczenia (dane wg K. Bergera ([34-35]), zgodne z zaleceniami CIGRE ([30-33]) oraz Rakova i Umana [14])

Źródło danych	Wartość szczytowa prądu [kA]					
Berger <sup>(1)</sup> CIGRE <sup>(2)</sup> Rakov i Uman <sup>(3)</sup>	pierwsze wyładowanie główne			kolejne wyładowanie główne		
	95%	50%	5%	95%	50%	5%
	14	30	80	4,6	12	30
	4 (98%)	20 (80%)	90	4,9	11,8	28,6
	30			10-15		
Berger (di/dt) <sub>max</sub> CIGRE (di/dt) <sub>max</sub> CIGRE (di/dt) <sup>(4)</sup> Rakov i Uman (di/dt) <sub>max</sub> <sup>(3)</sup> Rakov i Uman (di/dt) <sup>(3),(5)</sup>	Stromość narastania prądu [kA/μs]					
	pierwsze wyładowanie główne			kolejne wyładowanie główne		
	95%	50%	5%	95%	50%	5%
	5,5	12	32	12	40	120
	9,1	24,3	65	9,9	39,9	161,5
	–	–	–	4,1	20,1	98,5
	10-20			100		
	–			30-50		
Berger, CIGRE <sup>(6)</sup> Rakov i Uman <sup>(1),(7)</sup>	Czas narastania czoła fali prądowej [μs]					
	pierwsze wyładowanie główne			kolejne wyładowanie główne		
	95%	50%	5%	95%	50%	5%
	1,8	5,5	18	0,22	1,1	4,5
	5			0,3-0,6		
Berger, CIGRE <sup>(8)</sup> Rakov i Uman <sup>(3)</sup>	Czas do półszczytu [μs]					
	pierwsze wyładowanie główne			kolejne wyładowanie główne		
	95%	50%	5%	95%	50%	5%
	30	75	200	6,5	32	140
	70-80			30-40		
Berger, CIGRE Rakov i Uman <sup>(3),(9)</sup>	Przenoszony ładunek [C]					
	pierwsze wyładowanie główne			kolejne wyładowanie główne		
	95%	50%	5%	95%	50%	5%
	1,1	4,5	20	0,22	0,95	4
	5			1		
Berger, CIGRE	Energia właściwa [kJ/Ω]					
	pierwsze wyładowanie główne			kolejne wyładowanie główne		
	95%	50%	5%	95%	50%	5%
	6	55	550	0,55	6	52



## Objaśnienia do tabeli 4.:

- (1) przy minimalnej wartości prądu 2 kA wynikającej z czułości przyrządów pomiarowych,
- (2) w zaleceniach CIGRE dla pierwszego wyładowania głównego podane wartości szczytowe prądu odpowiadają prawdopodobieństwom 98, 80 i 5%,
- (3) typowe parametry przyjęte na podstawie analizy opublikowanych oraz niepublikowanych danych eksperymentalnych zgromadzonych w Międzynarodowym Centrum Badań Wyładowań Atmosferycznych na Florydzie,
- (4) średnia stromość narastania na czole fali wyznaczona w przedziale zmienności prądu  $[0, 3i_{\max}, 0, 9i_{\max}]$ ,
- (5) średnia stromość narastania na czole fali wyznaczona w przedziale zmienności prądu  $[0, 1i_{\max}, 0, 9i_{\max}]$ ,
- (6) czas narastania czoła fali w przedziale  $[2 \text{ kA}, i_{\max}]$ ,
- (7) czas narastania czoła fali w przedziale  $[0, 1i_{\max}, 0, 9i_{\max}]$ ,
- (8) czas trwania wyładowania do półszczytu na grzbiecie fali liczony od momentu, gdy prąd osiągnął wartość 2 kA.

Tabela 5. Parametry pierwszego i następnych uderzeń krótkotrwałych zgodne z zaleceniami CIGRE wraz z wartościami ustalonymi dla pierwszego poziomu ochrony odgromowej (ang. *Lightning Protection Level – LPL*) przyjęte w normie PN-EN 62305 [25]

Parametr	Wartości ustalone dla LPL I	Wartości			Typ uderu
		95%	50%	5%	
$I_p$ (kA)	–	4 (98%)	20 (80%)	90	pierwszy ujemny krótkotrwały <sup>(1)</sup>
	50	4,9	11,8	28,6	następny ujemny krótkotrwały
	200	4,6	35	250	pierwszy dodatni krótkotrwały (pojedynczy)
$Q_{\text{stroke}}$ (C)	–	1,1	4,5	20	pierwszy ujemny krótkotrwały
	–	0,22	0,95	4	następny ujemny krótkotrwały
	100	2	16	150	pierwszy dodatni krótkotrwały (pojedynczy)
$W/R$ (kJ/Ω) <sup>(2)</sup>	–	6	55	550	pierwszy ujemny krótkotrwały
	–	0,55	6	52	następny ujemny krótkotrwały
	10 000	25	650	15 000	pierwszy dodatni krótkotrwały
$di/dt_{\max}$ (kA/μs)	–	9,1	24,3	65	pierwszy ujemny krótkotrwały
	–	9,9	39,9	161,5	następny ujemny krótkotrwały
	20	0,2	2,4	32	pierwszy dodatni krótkotrwały
$di/dt_{30/90\%}$ (kA/μs)	200	4,1	20,1	98,5	następny ujemny krótkotrwały
Czas trwania czoła (μs) <sup>(3)</sup>		1,8	5,5	18	pierwszy ujemny krótkotrwały
		0,22	1,1	4,5	następny ujemny krótkotrwały
		3,5	22	200	pierwszy dodatni krótkotrwały (pojedynczy)
Czas trwania uderu (μs) <sup>(4)</sup>		30	75	200	pierwszy ujemny krótkotrwały
		6,5	32	140	następny ujemny krótki
		25	230	2 000	pierwszy dodatni krótkotrwały (pojedynczy)
Przedział czasu pomiędzy uderzeniami krótkimi (ms)		7	33	150	wyładowanie wielokrotne ujemne
$Q_{\text{flash}}$ (C)	–	1,3	7,5	40	wyładowanie ujemne
	300	20	80	350	wyładowanie dodatnie
Czas trwania całego wyładowania (ms)	–	0,15	13	1 100	wyładowanie ujemne (wszystkie)
		31	180	900	wyładowanie ujemne (bez pojedynczego)
		14	85	500	wyładowanie dodatnie
$Q_{\text{long}}$ (C)	200	–	–	–	długotrwały
$t_{\text{long}}$ (s)	0,5	–	–	–	długotrwały

Objaśnienia do tabeli 5.:

- (1) w zaleceniach CIGRE dla pierwszego ujemnego udaru krótkiego podane wartości szczytowe prądu odpowiadają prawdopodobieństwom 98, 80 i 5%,
- (2) energia właściwa określona zależnością  $W/R = \int i^2 dt$ ,
- (3) czas narastania czoła udaru w przedziale  $[2 \text{ kA}, i_{\text{max}}]$ ,
- (4) czas trwania udaru do półszczytu na grzbiecie fali liczony od momentu, gdy prąd osiągnął wartość 2 kA.

Przyjęte w dokumentach międzynarodowych parametry prądu pioruna pokazano w tabeli 5. Wyróżniono w niej trzy prawdopodobieństwa przekroczenia określonych wartości parametrów wraz z wymogami odpowiadającymi pierwszemu poziomowi ochrony odgromowej LPL I. Poziom ten oznacza, że wartości parametrów nie będą przekroczone z prawdopodobieństwem 99%. Dla LPL II maksymalne wartości ulegają zredukowaniu do 75%, a dla LPL III i IV do 50%. Wydaje się, że inicjowane w niektórych krajach próby określania dodatkowych poziomów LPL poniżej 50% nie są już celowe z punktu widzenia podstawowej idei stosowania ochrony odgromowej.

## 6. Podsumowanie

Mechanizm powstawania burz frontowych i termicznych jest złożony i obejmuje proces elektryzacji chmur burzowych, z których mogą rozwijać się wyładowania atmosferyczne doziemne neutralizujące ładunek dodatni lub znacznie częściej ładunek ujemny rozłożony w chmurze. Oprócz wyładowań doziemnych odgórnych lub oddolnych inicjowanych z wysokich obiektów, coraz częściej badane są obecnie wyładowania występujące w chmurach lub pomiędzy chmurami, które mogą oddziaływać bezpośrednio na samoloty i inne obiekty znajdujące się w pobliżu, jak również wywoływać zakłócenia elektromagnetyczne w czułych urządzeniach elektronicznych, pracujących na ziemi. Dlatego też w artykule zwrócono między innymi uwagę na procesy strimerowe typu J i K, które są odpowiedzialne za transport ładunku w chmurze pomiędzy kolejnymi wyładowaniami głównymi. Ponadto dokonano klasyfikacji wyładowań doziemnych oraz przedstawiono główne fazy wyładowania atmosferycznego wraz z charakterystycznymi parametrami prądu piorunowego, istotnymi z punktu widzenia ochrony odgromowej i przeciwprzepięciowej. Podczas charakterystyki prądu długotrwałego, który często jest przyczyną pożarów lasów i obiektów budowlanych, wyróżniono sześć często rejestrowanych kształtów fal oraz zwrócono uwagę na możliwość nakładania się na niego tzw. składowych typu M, które w znaczący sposób zwiększają ilość transportowanego do ziemi ładunku elektrycznego. W artykule zwrócono też uwagę na początki badań wyładowań atmosferycznych oraz rozwoju techniki ochrony odgromowej z uwzględnieniem pierwszej pracy ks. Kazimierza Osińskiego opublikowanej w Polsce w XVIII w., dotyczącej metod ochrony obiektów budowlanych przed wyładowaniami atmosferycznymi. Można wnioskować, że obecnie nadal są stosowane z powodze-

niem do ochrony odgromowej obiektów zwody pionowe zaproponowane przez Benjaminą Franklina w 1752 roku. Obserwowany niewątpliwie dynamiczny rozwój systemów ochrony jest związany głównie z nowymi technologiami wykorzystywanymi do produkcji urządzeń ograniczających przepięcia w instalacji oraz z wprowadzaniem optymalnych konfiguracji systemów ekranujących impulsowe pole elektromagnetyczne LEMP, jak i uziomów efektywnie odprowadzających do ziemi prąd wyładowania atmosferycznego.

## Literatura

- [1] MacGorman D.R., Rust W.D., *The Electrical Nature of Thunderstorms*, Oxford, University Press, New York 1998.
- [2] Franklin B., *Experiments and Observations of Electricity, Made at Philadelphia in America*, 5<sup>th</sup> ed., London, F. Newberry 1774.
- [3] Mazéas A., *Letters to Stephen Hales concerning the success of the late experiments in France*, Philosophical Transactions of the Royal Society, London, 47, 534-552.
- [4] Krider E.P., *Lightning rods in the 18<sup>th</sup> century*, 23<sup>rd</sup> Intern. Conference on Lightning Protection ICLP'96, Florence, Italy, 1996, 1-8.
- [5] Golde R.H., *Lightning*, ed. R.H. Golde, Academic Press, New York 1977.
- [6] Ochendusko T., Jakubowski Z., Kisiel R., *Dzieje I Gimnazjum i Liceum w Rzeszowie. Jego nauczyciele i wychowankowie – kalendarium*, Kollegium COLLEGIUM RESSOVIENSE, Rzeszów 2008.
- [7] Osiński J.H., *Gatunki powietrza odmiennego od tego, w którym żyjemy*, Warszawa 1783.
- [8] Osiński J.H., *Robota maszyny powietrzney p. Mongolfier*, Warszawa 1784.
- [9] Osiński J.H., *Sposób ubezpieczający życie y majątek od piorunów*, Warszawa 1784.
- [10] Chrzan K.L., *History of Lightning Protection in Poland*, 26<sup>th</sup> Intern. Conference on Lightning Protection ICLP'02, Cracow 2002, 695-699.
- [11] Berger K., *The Earth Flash*, In *Lightning*, Vol. 1, Physics of Lightning, ed. R.H. Golde, Academic Press, New York 1977.
- [12] Maślowski G., *Analiza i modelowanie wyładowań atmosferycznych na potrzeby ochrony przed przepięciami*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, seria: Rozprawy, Monografie nr 208, 2010.
- [13] Uman M.A., *Lightning*, Dover Public. Inc., New York 1984.
- [14] Rakov V.A., Uman M.A., *Lightning, Physics and Effects*, Cambridge University Press, New York 2003.
- [15] Schonland B.F.J., *The Lightning Discharge*, Springer-Verlag OHG, 22, Berlin 1956, 576-628.
- [16] Willett J.C., Krider E.P., *Rise times of impulsive high-current processes in cloud-to-ground lightning*, IEEE Trans. Ant. Propag. 2000, 48, 1442-1451.
- [17] Berger K.: *Novel Observations on Lightning Discharges: Results of Research on Mount San Salvatore*, J. Franklin Inst., 283, 1967, 478-525.
- [18] Uman M.A., Voshall R.E., *Time-interval between Lightning Strokes and the Initiation of Dart Leaders*, J. Geophys. Res. 1968, 73, 497-506.

- [19] Rakov V.A., Uman M.A., *Some properties of negative cloud-to-ground lightning flashes versus stroke order*, J. Geophys. Res. 1990, 95, 5447-5453.
- [20] Davis S.M., *Properties of lightning discharges from multiple-station wideband electric field measurements*, Ph.D. dissertation, University of Florida, Gainesville 1999.
- [21] Kitagawa N., Brook M., Workman E.J., *Continuing Currents in Cloud-to-Ground Lightning Discharges*, J. Geophys. Res. 1962, 67, 637-647.
- [22] Brook M., Kitagawa N., Workman E.J., *Quantitative Study of Strokes and Continuing Currents in Lightning Discharges*, J. Geophys. Res. 1962, 67, 649-659.
- [23] Miki M., Shindo T., Rakov V.A., Uman M.A., Diendorfer G., Mair M., Heidler F., Zischank W., Thottappillil R., Wang D., *Characterization of current pulses superimposed on the continuous current in upward lightning initiated from tall objects and in rocket-triggered lightning*, 28<sup>th</sup> Intern. Conference on Lightning Protection ICLP'06, Kanazawa, Japan, 2006, 83-88.
- [24] Ballarotti M.G., Saba M.M.F., Pinto Jr.O., *High-speed camera observations of negative ground flashes on millisecond-scale*, Geophys. Res. Lett., 32, L23802, doi:10.1029/2005GL023889.
- [25] PN-EN 62305-1:2008. Ochrona odgromowa – Część 1: Zasady ogólne.
- [26] Saba M.M.F., Pinto Jr.O., Ballarotti M.G., *Relation between lightning return stroke peak current and following continuing current*, Geophys. Res. Lett. 2006, 33, L23807, doi:10.1029/2006GL027455.
- [27] Fisher R.J., Schnetzer G.H., Thottappillil R., Rakov V.A., Uman M.A., Goldberg J.D., *Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama*, J. Geophys. Res. 1993, 98, 22887-22908.
- [28] Saba M.M.F., Pinto Jr. O., Ballarotti M.G., Campos L.Z.S., *Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural negative cloud-to-ground lightning from high-speed video observations*, Elsevier, Atmospheric Research 2007, 84, 302-310.
- [29] Rakov V.A., Crawford D.E., Rambo K.J., Schnetzer G.H., Uman M.A., Thottappillil R., *M-component mode of charge transfer to ground in lightning discharges*, J. Geophys. Res. 2001, 106, 22817-22831.
- [30] Anderson R.B., Eriksson A.J., *Lightning parameters for engineering application*, CIGRE Electra 1980, 69, 65-102.
- [31] Anderson R.B., Eriksson A.J., *A summary of lightning parameters for engineering application*, [in:] Proc. CIGRE 1980, Paper No. 33-06.
- [32] *Guide to Procedure for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines*, CIGRE 1991, Brochure 63.
- [33] Eriksson A.J., *Notes on Lightning Parameters for System Performance Estimations*, CIGRE 1986, Rep. 33-86 (WG 33-01) IWD.
- [34] Berger K., Anderson R.B., Kroninger H., *Parameters of lightning flashes*, Electra 1975, Vol. 80, 223-237.
- [35] Berger, K., *Blitzstrom-Parameter von Aufwärtsblitzen*, Bull. Schweiz. Elektrotech. 1978, Ver. 69, 353-360.

## ANALYSIS OF LIGHTNING DISCHARGES IN LIGHTNING PROTECTION FIELD

### Summary

First lightning protection concept and lightning research were indicated in the paper. Special attention was focused to Kazimierz Osiński who is of high merits in the popularization of lightning protection in Poland in the eighteenth century. Lightning discharges classification taking into account the sign of neutralized charge in the cloud, instead of the sign of leader polarization, has been defined in the paper. The main stages of lightning discharges, that is, downward stepped leader, the first and subsequent return strokes, continuing current without and with M-components, and streamer processes J and K types was briefly described. In the case of stepped and dart leaders, and also for return strokes, the key parameters of current used in lightning and overvoltage protection was also given. The six recently distinguished waveforms of the continuing current during lightning recordings together with superimposed M-type components has also been discussed.

*Złożono w redakcji w lipcu 2011 r.*

---

### **Autor:**

*Dr hab. inż. Grzegorz Masłowski, prof. PRz., Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektro-techniki i Informatyki, 35-959 Rzeszów, e-mail: maslowski@prz.edu.pl*

