DOI: 10.15199/13.2015.5.4

# Badania teoretyczne i eksperymentalne zwodów z elektromagnetycznym układem wspomagającym emisję wczesnego lidera (ESE) w ochronie odgromowej – przykłady zastosowania na obiektach rzeczywistych

**dr hab. inż. ADAM SKOPEC emer. prof. P.Wr.**
Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii
**dr Inż. EUGENIUSZ SMYCZ,** Ecole Superieure de Physique et de Chimie Industrielles, Paris
**dr inż. CZESŁAW STEC,** Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii
**mgr inż. STANISŁAW ZAJĄC,** Okręgowy Urząd Górniczy we Wrocławiu

Wyładowania atmosferyczne należą do klasy zjawisk elektrycznych towarzyszących człowiekowi od zarania jego dziejów. Zjawiska te powszechnie nazywane błyskawicą, piorunem, gromem dla człowieka pierwotnego, ze względu na towarzyszącą im grozę i tajemniczość, stwarzały psychologiczną potrzebę ich zrozumienia przez tworzenie kultu, mitów i wierzeń, w których były one przejawem działania sił nadprzyrodzonych (gromowładny Zeus). W rozwoju człowieka jako gatunku homo sapiens spełniły również rolę szczególnie korzystną jako źródło i nośnik ognia, który uznany jest jako pierwszy warunek stymulujący rozwój człowieka (mit Prometeusza). Również w powstawaniu relacji społecznych zjawiska te były czynnikiem motywującym i dyscyplinującym w tworzeniu się postaw moralnych (piorun – gniew bogów). Na pierwotnym poziomie rozwoju (np. człowieka jaskiniowego) nie istniała potrzeba ochrony zasobów materialnych. Późniejszy rozwój społeczny i cywilizacyjny człowieka, skupianie się w grodach, zamkach, miastach stwarzał realne zagrożenie jego bytu i dorobku materialnego. Znane są w historii z czasów średniowiecza wielkie pożary, pustoszące miasta (Kolonia, Wrocław). Wraz z dalszym szybkim rozwojem cywilizacyjnym i technologicznym wzrastają zagrożenia dla człowieka i jego materialnego otoczenia wynikające z wyładowań atmosferycznych. W coraz większym stopniu wzrasta potrzeba ochrony obiektów gabarytowo dużych, zbiorników paliw, hangarów samolotów pasażerskich, jak również obiektów wysokich. Szczególnie ważne jest zapewnienie niezakłóconego działania łączy informatycznych i telekomunikacyjnych. Powstaje potrzeba skutecznej ochrony wszelkiego typu masztów telewizyjnych, masztów telefonii komórkowej i anten satelitarnych. W tym przypadku ochrona winna zapewniać selektywną lokalizację punktów uderzenia pioruna w taki sposób, by skutki jego działania nie powodowały uszkodzenia chronionej aparatury.

Doniosłym faktem historycznym jest pionierskie odkrycie i zastosowania piorunochronu przez B. Franklina w 1752 r. Należy zauważyć, że odkrycie Franklina wyprzedziło znacznie podstawowe badania naukowe o elektryczności XIX wieku o prawie sto lat (prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya) a po upływie ponad dwóch wieków, dopiero obecnie czyni się poszukiwania nowych rozwiązań ochrony odgromowej. Od kilkunastu lat obserwuje się coraz bardziej powszechne stosowanie tak zwanych zwodów aktywnych, z wykorzystaniem szerszego zakresu wiedzy o mechanizmach powstawania wyładowań atmosferycznych.

Od czasu Franklina obowiązuje niekwestionowany pogląd, że wyładowanie atmosferyczne rozwija się na powierzchni ziemi w postaci niepełnych wyładowań, jako tak zwane wczesne strimery lub w bardziej zaawansowanej formie lidera, co stanowi niejako przygotowanie do głównego uderzenia pioruna, które w pełni rozwija się od chmury. Faza pierwsza wstępna może być poprawnie opisana równaniami pola quasi elektrostatycznego, natomiast rozwój zjawisk fazy głównej wymaga opisu elektrodynamicznego. Fakt istnienia fazy pierwszej umożliwia sformułowanie względnie prostego modelu matematycznego, co następnie stanowi podstawę poszukiwania konstrukcji różnych rodzajów zwodów typu ESE (*Early Streamer Emission*).

W opracowaniu niniejszym rozważania dotyczyć będą jedynie konstrukcji zwodu z wykorzystaniem odkrytego w połowie XIX w (1831 r) zjawiska indukcji elektromagnetycznej M. Faradaya. W aspekcie klasyfikacyjnym z teorii obwodów w badanym obiekcie występują tylko elementy pasywne (rezystory kondensatory, induktory) i zaliczanie ich do układów aktywnych jest błędne. Właściwe byłoby skrótowe oznaczenie a jednocześnie oddające ideę działania tego zwodu jako ESE(FF+) (*Franklin+ Faraday*).

W obszarze literatury francuskiej przyjęta jest nazwa bardziej właściwa PDA (Paratonnerre à Dispositif d'Amorçage) oznaczająca zwody z układem wspomagającym. Wspomaganie to odbywa się przez wykorzystanie energii magnetycznej gromadzonej w cewce.

Zastrzeżenia czynione przez oponentów [3, 5, 7] wyrażane jakoby napięcie indukowane w cewce zwodu typu ESE nie jest na tyle wysokie aby wytworzyć wyładowanie w postaci lidera, nie są argumentami istotnymi i nie są uzasadnione a wynikają raczej z niepełnego zrozumienia fizycznej zasady działania zwodów typu ESE. W istocie napięcie indukowane w cewce obniża potencjał zwodu względem ziemi powodując jego doładowanie i akumulację większego ładunku.

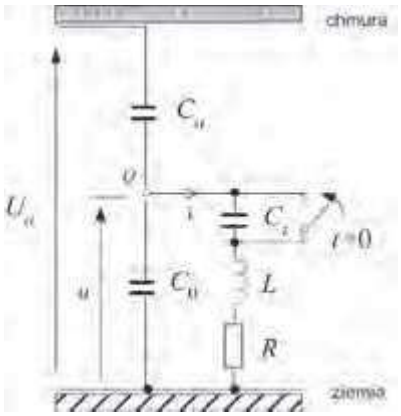
Na podstawie przytoczonych wyżej uwag jest istotne podkreślenie, że celem napięcia indukowanego w cewce (równe zawsze z przeciwnym znakiem wartości potencjału położenia zwodu) jest tylko doładowanie dodatkowym ładunkiem czyli zwiększenie koncentracji pola i jego gradientu w otoczeniu zwodu a tym samym przyspieszenie procesu inicjacji wyładowania. Natomiast sam proces wyładowania rozwija się tak samo jak w zwodzie Franklina.

## Podstawy teoretyczne sformułowanego modelu

Rozpatrywany jest ideowy schemat zastępczy jednego ze stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych zwodu aktywnego (*rys. 1*).

Na schemacie zastępczym określono następujące wielkości:

- $C_a$ – pojemność cząstkowa zwodu związana z ładunkiem zgromadzonym na powierzchni chmury,
- $C_0$ – pojemność cząstkowa zwodu związana z ładunkiem na powierzchni ziemi,
- $C_i$ – pojemność konstrukcyjna przerwy iskrowej zwodu,
- $L$, $R$ – indukcyjność cewki wewnętrznej zwodu, rezystancja łączna zwodu i uziomu,
- $U_a$ – napięcie naładowania atmosferycznego chmury względem ziemi,
- $u$ – napięcie miedzy powierzchnią zwodu a powierzchnią ziemi,
- $i$ – prąd w stanie nieustalonym wywołany zwarciem iskiernika o pojemności Ci,
- $Q$ – ładunek całkowity zgromadzony na powierzchni zwodu
- $E_0$ – natężenie pola wymuszenia zewnętrznego.




**Rys. 1. Schemat zastępczy zwodu aktywnego**
**Fig. 1. Equivalent circuit of active air terminal**

Przedmiotem szczegółowej dalszej analizy jest wyznaczenie przebiegu w czasie ładunku gromadzonego na powierzchni zwodu $Q(t)$ po zamknięciu samoczynnym wyłącznika, czyli zwarciu iskrownika.

Jako wynik rozwiązania poszukiwana jest maksymalna wartość oscylacji ładunku $Q$ w stanie przejściowym, w odniesieniu do zmiany ładunku wymuszonego stanu niestacjonarnego i jego bezpośrednie porównanie z ładunkiem zwodu klasycznego (Franklina) w tych samych warunkach.

## Sformułowanie i rozwiązanie równań wyjściowych

W pierwszej kolejności rozważano stan statyczny naładowania z warunkami początkowymi $i = 0$, $u = u_0$ $Q = 0$ dla $t<0$ przed zwarciem iskrownika. Z prawa (bilansu) zachowania sumarycznego ładunku, przy założeniu zerowego ładunku początkowego, wynika równanie

$$Q(t) = -C_a\left[U_a(t) - u\right] + C_0 u = -C_a U_a(t) + C u \qquad (1)$$

gdzie przez $C$ oznaczono pojemność sumaryczną zwodu

$$C = C_a + C_0 \qquad (2)$$

Po zwarciu iskrownika dla $t \geq 0$ występuje stan przejściowy określony przez równania bilansu ładunku i napięć

$$Q(t) = C\,u - C_a U_a(t) \qquad (3)$$

$$Q(t) = -\int_0^t i\,dt \quad lub \quad i = -\frac{dQ}{dt} \qquad (4)$$

z warunkiem początkowym $Q(0) = 0$.

$$u = L\frac{di}{dt} + R\,i \qquad (5)$$

warunkiem początkowym $i(0) = 0$

$$u = -L\frac{d^2Q}{dt^2} - R\frac{dQ}{dt} \qquad (6)$$

Stąd po podstawieniu do (3) i uporządkowaniu, wynika równanie

$$CL\frac{d^2Q}{dt^2} + R\frac{dQ}{dt} + Q = -C_a U_a(t) \qquad (7)$$

przy czym przyjmuje się warunki początkowe zerowe

$$Q(0) = 0, \quad \frac{dQ}{dt}\Big|_0 = -i(0) = 0 \qquad (8)$$

W celu wyznaczenia rozwiązania równania (7) z warunkami (8) zastosujmy metodę operatorową.

Po wykonaniu operacji obustronnej transformaty Laplace'a dla równania (7), uzyskuje się zależność

$$\mathcal{L}\{Q(t)\} = -\frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} C_a \mathcal{L}\{U_a(t)\} \qquad (9)$$

co można zapisać

$$\mathcal{L}\{Q(t)\} = -\frac{1}{\omega_0 LC}\left[\frac{\omega_0}{(s+\alpha)^2 + \omega_0^2}\right]\mathcal{L}\{C_a U_a(t)\} \qquad (10)$$

czyli

$$\mathcal{L}\{Q(t)\} = -\frac{1}{\omega_0 LC}\mathcal{L}\{e^{-\alpha t}\sin\omega_0 t\}\,\mathcal{L}\{C_a U_a(t)\} \qquad (11)$$

przy czym

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \qquad \omega_0 = \sqrt{1/LC - \alpha^2} \qquad (12)$$

Wzór (11), po przejściu z dziedziny transformat do dziedziny czasowej oryginałów, zgodnie z twierdzeniem Borela przedstawiony jest w postaci całki splotowej

$$Q(t) = -\frac{C_a}{\omega_0 LC}\int_0^t e^{-\alpha(t-\tau)}\sin\omega_0(t-\tau)\,U_a(\tau)\,d\tau \qquad (13)$$

Na podstawie wzoru (13) może być określona reakcja impulsowa zwodu na wymuszenie napięciowe w postaci impulsu Diraca $U_a(t)=\delta(t)$. Ze wzoru (13) przy wykorzystaniu własności filtracyjnej funkcji Diraca, wynika odpowiedź impulsowa:

$$Q_\delta(t) = -\frac{C_a}{\omega_0 LC}e^{-\alpha t}\sin\omega_0 t \qquad (14)$$

Jest widoczne, że reakcja (odpowiedź) impulsowa ładunku (14) pozwala na wyznaczenie zmiany w czasie ładunku gromadzonego na zwodzie przy dowolnej funkcji napięcia między chmurą a ziemią w postaci całki splotowej

$$Q(t) = \int_0^t Q_\delta(t-\tau)\,U_a(\tau)\,d\tau \qquad (15)$$

Równoważnym sposobem opisu przebiegu ładunku jest wykorzystanie odpowiedzi jednostkowej (reakcji skoku jed-

nostkowego) i całki superpozycji Duhamele'a

$$Q(t) = Q_1(t)U_a(0+) + \int_0^t Q_1(t-\tau)U_a'(\tau)d\tau \qquad (16)$$

gdzie: $Q_1(t)$ jest reakcją skokową ładunku, $U'_a(t)$ pochodną funkcji napięcia między chmurą a ziemią.

Odpowiedź skokowa jest związana z odpowiedzią impulsową zależnością całkową na podstawie (15) przy $U_a = \mathbf{1}(t)$ wynika

$$Q_1(t) = \int_0^t Q_\delta(\tau)d\tau \qquad (17)$$

Po podstawieniu wyrażenia (14) do wzoru (17) otrzymujemy

$$Q_1(t) = -C_a\left[1 - e^{-\alpha t}\frac{\cos(\omega_0 t - \varphi)}{\cos\varphi}\right] \qquad (18)$$

gdzie

$$\cos\varphi = \omega_0\sqrt{LC} = \sqrt{1 - \frac{1}{4k_q^2}} \qquad (19)$$

przy czym przyjęto znane oznaczenia współczynnika dobroci $k_q$ i rezystancji charakterystycznej układu $\rho$

$$k_q = \frac{\rho}{R}, \qquad \rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (20)$$

Wprowadzone wyżej zależności będą wykorzystane w analizie szczegółowych przykładów w następnym rozdziale.

W stanie statycznym przyjmuje się $U_a = const = U_0$, $U_a' = 0$ stąd po uwzględnieniu (18) i podstawieniu do (16) otrzymujemy

$$Q(t) = Q_1(t)U_0 = -C_aU_0\left[1 - e^{-\alpha t}\frac{\cos(\omega t - \varphi)}{\cos\varphi}\right] \qquad (21)$$

Z wyrażenia powyższego jest widoczne, że ładunek zmienia się w czasie w postaci tłumionego przebiegu oscylacyjnego i przy zanikaniu oscylacji dąży do granicznej wartości

$$Q_0 = -C_aU_0 \qquad (22)$$

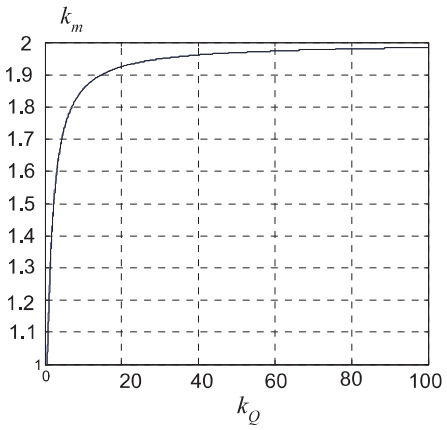
Rozpatrzmy funkcję

$$k(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} = 1 - e^{-\alpha t}\frac{\cos(\omega t - \varphi)}{\cos\varphi} \qquad (23)$$

Jest widoczne i jak pokazano w [8] wartość maksymalna funkcji $k(t)$ jest osiągana dla $\omega t_m = \pi$ i wyraża się wzorem

$$k_m = \max_t[k(t)] = 1 + \exp\left(-\frac{\alpha}{\omega_0}\pi\right) \approx 2 \text{ dla } k_q \geq 20 \qquad (24)$$

Wykres zależności wartości $k_m$ jako funkcji współczynnika dobroci $k_q$ przedstawiono na *rys. 2.*




**Rys. 2. Wykres wartości maksymalnej $k_m$ jako funkcji współczynnika dobroci $k_Q$**
**Fig. 2. Diagram value of the maximum $k_m$ as a function of the quality factor $k_q$**

## Wyniki analizy

W celu zbadania zmiany w czasie ładunku gromadzonego na powierzchni zwodu rozpatrzone będą cztery przypadki szczegółowe:

a) stan statyczny

$$U_a(t) = U_0 = const. \qquad (25a)$$

b) stan niestacjonarny liniowego narostu napięcia

$$U_a(t) = U_0(1 + \beta t) \qquad (25b)$$

c) stan niestacjonarny wykładniczego narostu napięcia

$$U_a(t) = U_0\exp(\beta t) \qquad (25c)$$

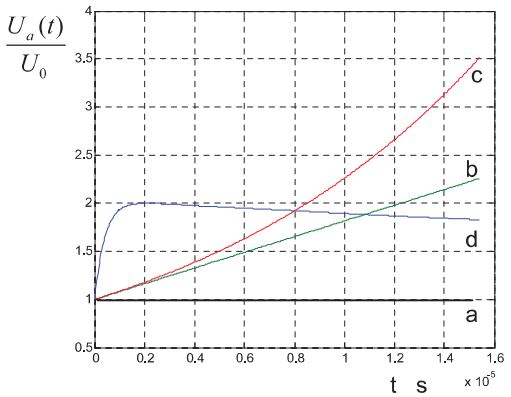
d) stan niestacjonarny przy udarowym narośnie napięcia

$$U_a(t) = U_0\left\{1 + A_0\left[\exp(-\beta_1 t) - \exp(-\beta_2 t)\right]\right\} \qquad (25d)$$

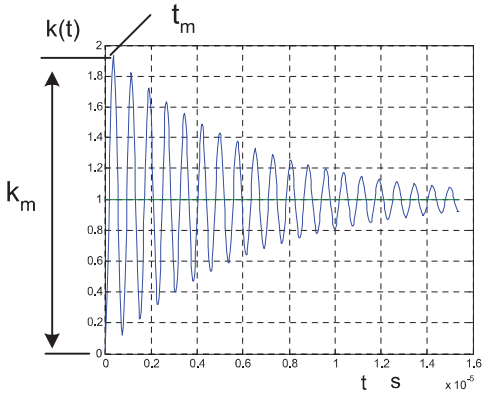
gdzie we wzorach (25a, b, c, d) oznaczono:
$U_0 = U_a(0+)$ – napięcie stanu początkowego inicjacji oscylacji,
$\beta$, $\beta_1$, $\beta_2$ – współczynniki narostu, wykładniczego oraz udarowego.

Wykresy funkcji narostu potencjału przedstawiono na *rys. 3.*

Na *rysunku 4* przedstawiono oscylacje ładunku zgromadzonego na zwodzie aktywnym po zwarciu iskrownika w stosunku do ładunku zwodu klasycznego $Q_0$, do którego dąży ładunek po wygaśnięciu oscylacji. W zaznaczonej skali maksymalna wartość chwilowa ładunku jest prawie dwukrotnie większa.




**Rys. 3. Wykresy funkcji narostu liniowego (b), wykładniczego (c) oraz udarowego (d), potencjału chmury**
**Fig. 3. Graphs of linear functions (b), exponential (c) and surge (d), accretion the potential of the cloud**




**Rys. 4. Wykres funkcji oscylacji *k(t)* określonej wzorem (23) ładunku zmieniającego się w czasie po zadziałaniu iskrownika**
**Fig. 4. Graph of oscillation *k(t)* defined by formula (23) charge varying with time after activation of the spar gap**

W stanie niestacjonarnym przy założeniu liniowego narostu potencjału w postaci funkcji określonej wzorem 25b po podstawieniu do (16) i wykonaniu operacji całkowania otrzymuje się wyrażenie

$$Q(t) = -C_a U_0 \left[1 - e^{-\alpha t} \frac{\cos(\omega t - \varphi)}{\cos\varphi}\right] - C_a U_0 \beta \left[t + RCe^{-\alpha t} \frac{\cos(\omega t + \psi)}{\cos\psi} - RC\right] \quad (26)$$

przy czym

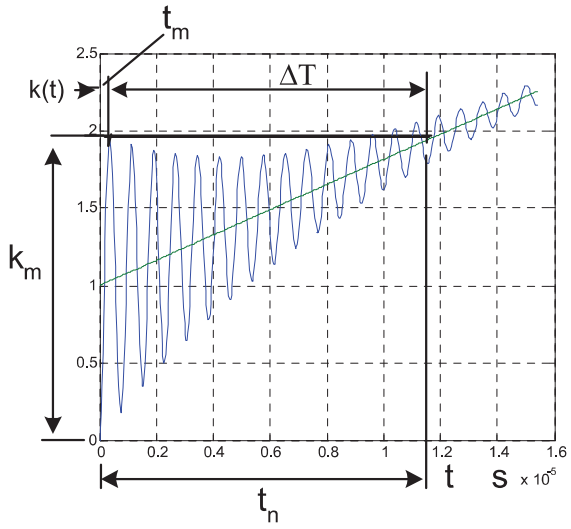
$$\cos\varphi = \omega_0 LC, \qquad \cos\psi = \omega_0 RC \quad (27)$$

Praktycznie w wyrażeniu (26) w drugim nawiasie kwadratowym dla $t > RC$ można pominąć drugi i trzeci składnik jako znacznie mniejsze.

W tym przypadku przebieg funkcji oscylacji $k(t)$ wyraża się wzorem

$$k(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} \approx 1 - e^{-\alpha t} \frac{\cos(\omega t - \varphi)}{\cos\varphi} + \beta t \quad (28)$$

Wykres tej funkcji oscylacji przedstawiono na wykresie *rys. 5*.




**Rys. 5. Wartości chwilowa funkcji oscylacji *k*(*t*) zwodu ESE przy naroście liniowym potencjału elektrycznego chmury**
**Fig. 5. Value instantaneous oscillation function *k*(*t*) ESE air terminal at accretion linear electric potential clouds**

W stanie niestacjonarnym przy wykładniczym naroście napięcia określonego wzorem

$$U_a(t) = U_0 e^{\beta t} \quad (29)$$

W tym przypadku funkcja oscylacji k(t) może być wyrażona przez całkę splotową uwzględniając wzór (14) w postaci

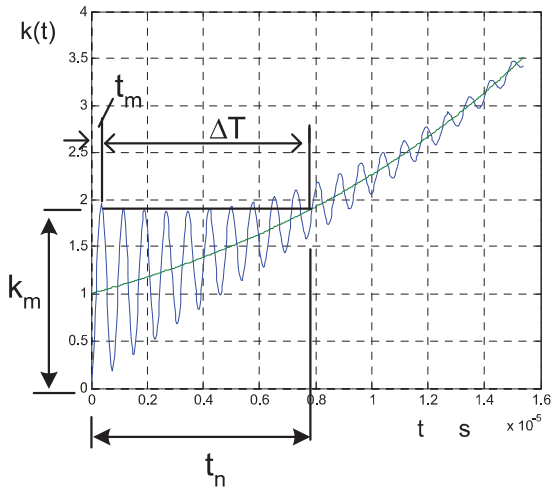
$$k(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} = \int_0^t Q_d(t-\tau)\, e^{\beta t}\, d\tau \quad (30)$$

Przebieg tej funkcji oscylacji $k(t)$ obliczony numerycznie przedstawiono na wykresie *rys. 6*.

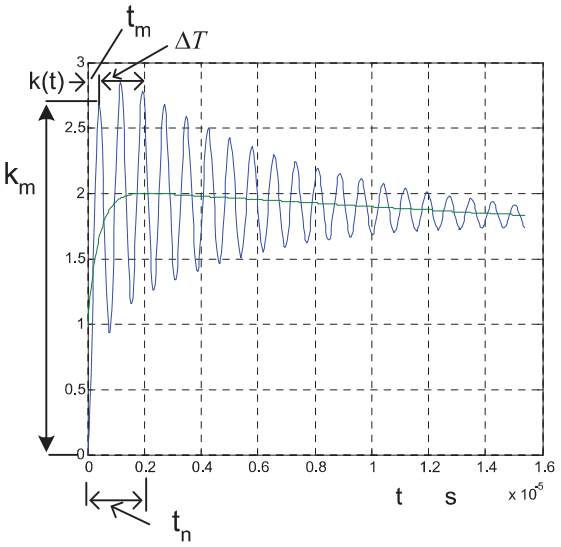
W stanie niestacjonarnym przy naroście potencjału określonego funkcją udarową, wyrażoną wzorem

$$U_a(t) = U_0 \left\{1 + A_0 \left[\exp\left(-\beta_1 t\right) - \exp\left(-\beta_2 t\right)\right]\right\} \quad (31)$$

funkcja oscylacji $k(t)$ wyraża się całką




**Rys. 6 Wartość chwilowa funkcji oscylacji *k*(*t*) zwodu ESE przy naroście wykładniczym potencjału elektrycznego chmury**
**Fig. 6. Value instantaneous oscillation function *k*(*t*) ESE air terminal at accretion exponential electric potential clouds**




**Rys. 7. Wartość chwilowa funkcji oscylacji *k*(*t*) zwodu ESE przy naroście udarowym potencjału chmury**
**Fig. 7. Value instantaneous oscillation function *k*(*t*) ESE air terminal at accretion shock potential clouds**

$$k(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} = \int_0^t Q_\delta(t-\tau)\left[1 + A_0\left(e^{-\beta_1 \tau} - e^{-\beta_2 \tau}\right)\right] d\tau \quad (32)$$

dla której wykres wartości obliczonych numerycznie przedstawiono na *rysunku 6*.

Wyprowadzone i podane wyżej ogólne zależności umożliwiły przeprowadzenie przykładowych obliczeń testujących.

Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wykresów na rysunkach (*rys. 4, 5, 6, 7*).

Jako wartość bazowa (odniesienia) jest przyjęta wartość $U_0 = U_a(0+)$, która oznacza napięcie inicjacji oscylacji. Wartość ta jest ustalana konstrukcyjne dla danego typu zwodu przez określenie przerwy iskrownika.

Na przedstawionych wykresach zaznaczono charakterystyczne wartości $k_m$ jako wartość maksymalną oscylacji i czasu wyprzedzenia $\Delta T$. Czas wyprzedzenia określa się jako różnicę

$$\Delta T = t_n - t_m \quad (33)$$

gdzie:

$t_n$ – oznacza czas narostu napięcia wymuszenia do wartości względnej $k_m$ (lub szczytowej)

$t_m$ – oznacza czas wystąpienia maksymalnej wartości względnej oscylacji $k_m$

Z przyjętego wyżej określenia czasu wyprzedzenia oraz podanej wcześniej zależności (24), wynikają wzory

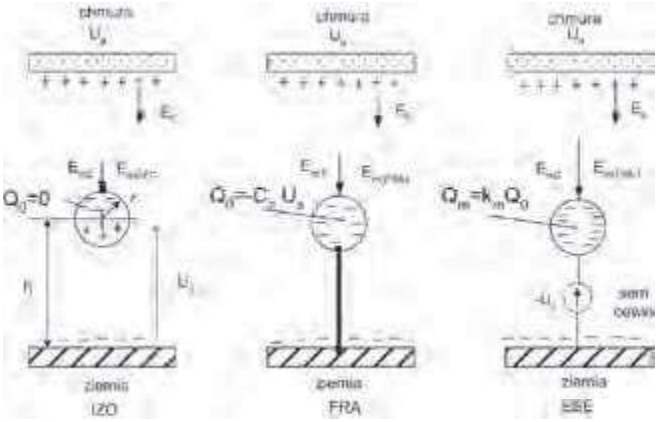
$$\Delta T = \begin{cases} \dfrac{k_m - 1}{\beta} - \dfrac{\pi}{\omega_0} & dla\ narostu\ liniowego \\ \dfrac{\ln k_m}{\beta} - \dfrac{\pi}{\omega_0} & dla\ narostu\ wykladniczego \\ \dfrac{1}{\beta_2 - \beta_1} \ln \dfrac{\beta_2}{\beta_1} - \dfrac{\pi}{\omega_0} & dla\ narostu\ udarowego \end{cases} \quad (34)$$

## Opis podstawy fizycznej zasady działania zwodu typu ESE

W celu wyjaśnienia podstawowej zasady działania zwodu typu ESE rozpatrzmy układ płaski elektrod (chmura – ziemia) wytwarzający pole elektryczne o natężeniu $E_0$ (równomierne) jak przedstawiono na *rysunku 8*.

W przestrzeni między elektrodami umieszczamy zwód o kształcie sfery o promieniu r której środek jest położony względem ziemi na wysokości h. Rozkład pola ulega zmianie.

W podstawowym kursie teorii pola elektrycznego rozwiązywane jest równania Laplace'a [14] dla sfery samotnej nie naładowanej $Q_0 = 0$ w polu równomiernym o natężeniu $E_0$ wyznacza się maksymalne natężenie pola na powierzchni $E_M = 3\ E_0$




**Rys. 8. Ilustracja zwodu izolowanego, zwodu Franklina, zwodu ESE**
**Fig. 8. Illustration of insulated rods, Franklin rods, ESE air terminal**

Parametrem charakteryzującym rozkład pola na powierzchni zwodu jest lokalny współczynnik koncentracji pola określony wzorem

$$k_E = \frac{E_m}{E_0} \quad (*)$$

gdzie:

$E_m$ – oznacza natężenie maksymalne pola elektrycznego na powierzchni zwodu (pionowa składowa normalna)

$E_0$ – oznacza natężenie pola w nieskończoności (na powierzchni chmury).

Wykonajmy teraz połączenie powierzchni sfery z ziemią. Przeprowadźmy przybliżoną ocenę współczynnika koncentracji po połączeniu. Ponieważ znajdowała się ona na potencjale

$$V_h = h\,E_0$$

sfera zostaje doładowana ładunkiem

$$Q_m = CV_h = 4\pi\,\varepsilon_0 r\,h\,E_0$$

Natężenie pola w punkcie M wyznacza się teraz z prawa Coulomba

$$E_M = \frac{Q_M}{4\pi\,\varepsilon_0\,r^2}$$

Stąd współczynnik koncentracji po podstawieniu do (*)

$$k_E = \frac{h}{r}$$

Bardziej dokładna wartość wyprowadzona w [7] wyraża się wzorem

$$k_E = \frac{h}{r} + 1 + \frac{r}{h}$$

Udowodnimy twierdzenie, że dla współczynnika koncentracji pola zwodu typu ESE i zwodu klasycznego Franklina (przy jednakowym kształcie geometrycznym) spełniona jest nierówność

$$k_{E(ESE)} > k_{E(FRA)}$$

Twierdzenie o współczynniku koncentracji pola

*Założenie:*

Z rozpatrzonego wyżej przykładu była widoczna nierówność

$$a)\quad k_{E(FRA)} > k_{E(IZO)}$$

$$b)\quad k_m > 1$$

Nierówność a) była spełniona w rozpatrzonym przykładzie powierzchni sferycznej $k_{(FRA)} = 100$, $k_{(IZO)} = 3$, również zachodzi dla dowolnego geometrycznego kształtu (co można sprawdzić pomiarowo lub metodą obliczeniową MES (metoda elementów skończonych), nierówność b) jak wykazano w [6, 11] ($k_m \approx 2$). Założenia są więc prawdziwe.

*Teza*:

$$k_{E(ESE)} > k_{E(FRA)}$$

*Dowód*:

Z zasady superpozycji wynika, że natężenie pola w dowolnym punkcie na powierzchni przewodnika jest sumą wpływu ładunków zewnętrznych i wewnętrznych

$$E_M = E_{Mz} + E_{Mw} = AQ_z + B\,Q_w$$

gdzie: $A$, $B$ stałe, $Q_z$, $Q_w$ oznaczają odpowiednio ładunki zgromadzone na zewnątrz powierzchni przewodnika (chmury) i na powierzchni własnej przewodnika.

Przyjmując, że przewodnik jest izolowany i nie naładowany $Q_w = 0$

$$E_M = AQ_z = E_{(IZO)}$$

Po połączeniu przewodnika z ziemią $Q_w = Q_0 = -C_a\,U_a$, natężenie pola

$$E_M = E_{(FRA)} = E_{(IZO)} + BQ_0$$

Z tego związku może być wyznaczona stała B.

$$B = \frac{E_{(FRA)} - E_{(IZO)}}{Q_0}$$

Stąd wynika, że przy naładowaniu przewodnika innym ładunkiem $Q_m = k_m Q_0 \neq 0$,natężenia pola na powierzchni przewodnika może być wyrażone wzorem

$$E_M = E_{(ESE)} = E_{(IZO)} + k_m \left(E_{(FRA)} - E_{(IZO)}\right)$$

lub po przekształceniu

$$E_{(ESE)} = E_{(FRA)} + \left(k_m - 1\right)\left(E_{(FRA)} - E_{(IZO)}\right)$$

dzieląc stronami przez $E_0$ otrzymujemy związek dla współczynnika koncentracji

W powyższej zależności uwzględniając założenia a), b) obydwa nawiasy są dodatnie, a więc widoczne jest spełnienie nierówności zawartej w tezie.

Udowodnione twierdzenie ma znaczenie zasadnicze dla ochrony odgromowej przy zastosowaniu zwodów ESE, wyraża jedno z porównawczych kryteriów teoretycznych.

*Przykład:*

W przypadku rozpatrywanego wyżej zwodu sferycznego otrzymano wartości $k_{E(IZO)} = 3$, $k_{E(FRA)} = 100$, po podstawieniu do (2) otrzymujemy

$$k_{E(ESE)} = 100 + (2-1)(100-3) = 197$$

Ilustruje to różnicę zachowania się zwodu typu ESE i zwodu Franklin. O ile na zwodzie klasycznym koncentracja pola na powierzchni zwodu w stosunku do pola wymuszającego na chmurze jest rzędu 100 razy większa, to dla zwodu typu ESE jest 197 a więc prawie dwa razy większa niż na zwodzie klasycznym Franklina.

Teoretycznie wynika stąd, że zwód typu ESE umieszczony na wysokości h jest równoważny zwodowi klasycznemu Franklina na wysokości 2h. Stąd przy tym samym stożku ochronnym, powierzchnia chroniona jest cztery razy większa. Jest to ocena przybliżona, a szczegółowe wartości reguluje norma [13].

Warto podkreślić dodatkową przesłankę fizyczną zwiększającą skuteczność zwodów typu ESE w stosunku do zwodów Franklina. Na zwodach Franklina występuje zjawisko korony (świecenie) wynikające z emitowanego ładunku przestrzennego ostrza powodujące obniżenie wartości pola. Na zwodzie typu ESE przed jego zadziałaniem, z uwagi na odcięcie przez istniejący otwarty iskrownik, natężenie pola przy ostrzu jest małe i zjawisko korony nie występuje.

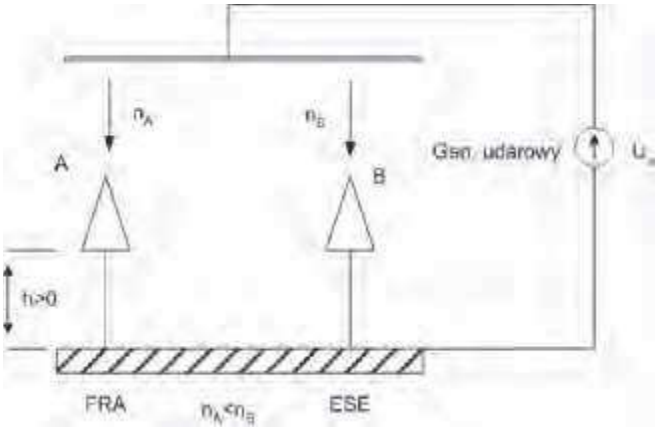
## Badania laboratoryjne

W celu porównania wyników z analizy teoretycznej przeprowadzono próby pomiarowe napięcia i czasów wyładowania zwodów typu ESE i klasycznych Franklina.

**Rys. 9. Zwód ESE na stanowisku badawczym i próba pomiarowa wyładowania przy napięciu udarowym 540 kV**
**Fig. 9. Air terminal ESE on the bench and try to measuring discharge at a voltage of 540 kV surge**

W zakresie badań laboratoryjnych o charakterze porównawczym zwodów ESE i Franklina bezpośrednią informację uzyskuje się w układzie jednoczesnego wymuszenia napięcia udarowego w układach schematycznie przedstawionych jak na rysunkach (*rys. 10*).

Zgodnie z podanym wyżej opisem fizycznym zasady działania przy $h = 0$ czyli na potencjale zerowym ziemi $V_p = 0$ zwo-




**Rys. 10. Próba porównawcza zwodu Franklina i ESE**
**Fig. 10. Comparative Franklin and ESE air terminal**

dy ESE i Franklina zachowują się identycznie i liczba uderzeń rozkłada się w badanej serii prawie równomiernie ($n_A$, $n_B$ po 50%). W tym przypadku cewka jest niejako zwarta i nie może wytworzyć się w niej SEM indukowana-powodująca przepływ dodatkowego ładunku.

Różnica w zachowaniu się zwodu ESE i Franklina zwiększa się zasadniczo wraz ze wzrostem wysokości położenia zwodów $h > 0$ jak na *rysunku 10, 11*. Wielkość indukowanej SEM w cewce jest dokładnie równa wartości potencjału (ze znakiem przeciwnym) jaki występuje na wysokości położenia zwodów, i wymusza przepływ dodatkowego ładunku tym większego im wyżej jest położony zwód. W tym przypadku w przeprowadzonej serii prób obserwuje się istotną różnicę $n_A < n_B$ w liczbie wyładowań ze zwodów Franklina i ESE.

## Próba napięciowa porównawcza

Dwa piorunochrony typu ESE (PDA) (GROMOSTAR) ze zwartym układem wspomagającym zostały umieszczone w układzie w jakim bada się piorunochrony wg normy francuskiej [13]:

Umiejscowienie (lokalizację) zwodów w polu pomiarowym dobrano tak, by w serii 30 prób uzyskać możliwie jednakową liczbę wyładowań w obydwa bierne (nieaktywne) zwody. Ustawienia tak, by można było uzyskać dokładnie po 15 wyładowań w jeden i drugi zwód nieaktywny (B) jest trudne do

**Rys. 11. Badania porównawcze dwóch zwodów (Franklina-ESE w stanie nieaktywnym (iskrownik zwarty) i aktywnym ESE (iskrownik otwarty)**
**Fig. 11. Comparative study of two -termination (Franklin – ESE in an inactive state (spar gape closed) and active ESE (spar gape open)**

wykonania z uwagi na przypadkowość wyładowań wynikająca z wpływu innych czynników (np. cyrkulacji powietrza). Praktycznie w I serii uzyskano liczbę wyładowań odpowiednio 13 i 17 oraz w drugiej i trzeciej próbie 16 i 14.

Następnie nie zmieniając ustalonej konfiguracji usunięto zwarcie układu wspomagającego z jednego zwodu A (jak jest widoczne na *rys. 3*). Otrzymano w serii I na 30 prób wynik 24 wyładowań w zwód z układem niezwartym (aktywny A) i 6 w zwód z układem zwartym (nieaktywny B), oraz w serii II 3 w zwód z układem zwartym (nieaktywny B) i 27 w zwód z układem otwartym (aktywnym A). W trzeciej próbie uzyskano tylko wyładowania do zwodu w stanie aktywnym (niezwartym A) Podczas prób wykonywana była regulacja parametrów eksploatacyjnych.

Wyniki pomiarów napięcia i czasu wyładowań zestawiono w *tabeli*.

| lp | n | B | B | $T_m$ | $U_m$ | B | A | $T_m$ | $U_m$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | – | – | – | µs | kV | – | – | µs | kV |
| 1 | 30 | 13 | 17 | 228 | 514 | 6 | 24 | 211 | 500 |
| 2 | 30 | 16 | 14 | 283 | 531 | 3 | 27 | 241 | 533 |
| 3 | 30 | 16 | 14 | 305 | 497 | 0 | 30 | 244 | 490 |

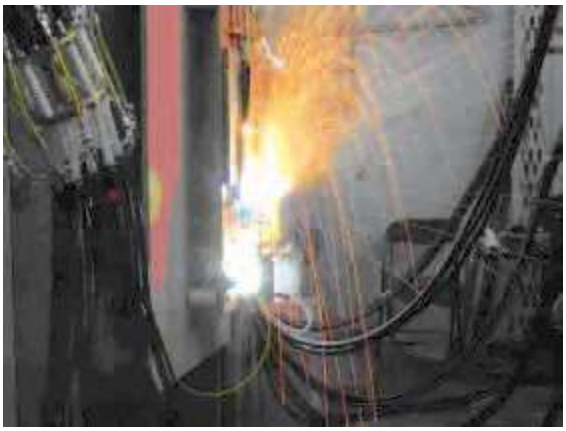
Badania wykonano w Laboratorium Wysokonapięciowym SIAM Uniwersytetu de Pau et des Pays de l'Adour i zostały przedstawione w raportach [14,15,16]. Ogólna ocena uzyskanych wyników eksperymentalnych potwierdza działanie efektywne zwodów ESE w zakresie skuteczności (80-90-100)%.

Przedstawiona wyżej analiza teoretyczna oraz założenia teoretyczne we wcześniej publikowanych artykułach [6, 12] zostały potwierdzone eksperymentalnie. Bardziej szczegółowe omówienie wyników podano w [23].

## Próba prądowa

Poza badaniami wysokonapięciowymi wykonane zostały badania silnoprądowe samego zwodu jak również pozostałych elementów instalacji (masztów, złączek, liczników itp.)

Badania zostały przeprowadzone w Laboratorium Symulowanych Wyładowań Atmosferycznych Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie. Badania wykonano zgodnie z normą PN-EN 50164-1:2010 oraz procedurą wewnętrzną SOP 31. Wyniki badań zawarto w sprawozdaniu [21].



**Rys. 12. Badanie prądowe zwodu Gromostar przy amplitudzie prądu 100 kA ±5%**
**Fig. 12. Testing of Gromostar air terminal with current an amplitude of 100 kA ±5%**

## Wnioski

W ogólnym skrótowym sformułowaniu zwody typu ESE spełniają następujące warunki:

1) warunek wzmocnienia pola $k_{E(ESE)} > k_{E(FRA)}$
2) warunek wyprzedzenia czasowego $\Delta T>0$
3) warunek selektywnego losowego wyboru p(A)<100%

Zasada wyboru losowego umożliwia stosowanie metody toczącej się kuli do wyznaczania stref ochrony, pod warunkiem dodatkowego uwzględnienia parametrów wynikających z zaleceń normy [13]

Należy kontynuować badania laboratoryjne mechanizmów wyładowania, z uwzględnieniem funkcji udarowej napięcia przy różnych czasach narostu czoła $T_1/T_2$ i czasu półzaniku. W opracowaniu ograniczono się do standardowej wartości (350–650) µs.

## Zastosowanie zwodów typu ESE w realizacji ochrony odgromowej obiektów rzeczywistych

Przedstawiona analiza teoretyczna i wyniki badań laboratoryjnych zwodów typu ESE a także ich rzeczywiste, zgodne z normą francuską [13] zastosowanie na obiektach zlokalizowanych w różnych częściach świata, na przestrzeni ostatnich lat, potwierdzają ich wysoką skuteczność i niezawodność. Zwodami typu ESE chronione są między innymi Hangar Airbus A380 na lotnisku Orly, Pałac Inwalidów i Panteon w Paryżu, wiadukt Millau, most na Wiśle k. Kwidzynia, centrum handlowe Auchan w Gdańsku, Motoarena w Toruniu.

**Rys. 13. Maszt instalacji odgromowej na hangarze samolotów Airbus 380 na lotnisku Orly w Paryżu**
**Fig.13. Mast of installation lightning protection for 380 Airbus aircraft hangar at Orly Airport in Pari**

**Rys. 14. Instalacja zwodów ESE dla ochrony odgromowej na podporach wiaduktu de Millau**
**Fig. 14. Installing the ESE air terminals for lightning protection Viaduct de Millau supports**

**Rys. 15. Widoczne spektakularne efekty działania ochrony odgromowej ze zwodami typu ESE wiaduktu de Millau**
**Fig. 15. Visible spectacular effects of lightning protection with the ESE air terminals of viaduct de Millau**

## Zakończenie

Prezentowane wyniki analizy potwierdzają istnienie warunków w aspekcie teoretycznym i przesłanek fizycznych zwiększających skuteczność zwodu typu ESE w stosunku do zwodu klasycznego Franklina. Przeprowadzone badania eksperymentalne w skali laboratoryjnej potwierdzają wnioski teoretyczne.

Obecnie zainstalowane już na tysiącach obiektów na całym świecie głowice typu ESE, wyposażane są obligatoryjnie od 2008 roku, w rejestratory wyładowań i stanowią bazę danych do analizy statystycznej skuteczności ochrony odgromowej w zakresie przyjętego stopnia ryzyka. Analiza tych danych całkowicie potwierdza skuteczność i niezawodność ochrony odgromowej z głowicami typu ESE.

Celowość rozwijania ochrony odgromowej z zastosowaniem zwodów typu ESE, potwierdza zawodność stosowanej obecnie metody klasycznej Franklina. Na przestrzeni kilku ostatnich lat odnotowano liczne przypadki powstania znacznych szkód, spowodowanych wyładowaniami atmosferycznymi w obiekty chronione zwodami klasycznymi. Najbardziej znane to: pożar wielko gabarytowego zbiornika paliwa w Rafinerii Nafty w Trzebini; uszkodzenie aparatury na maszcie łącza radiowo-telefonicznego Straży Pożarnej w Legnicy; uszkodzenie aparatury sieci komputerowej w gmachu sądu w Ząbkowicach Śląskich.

Technika ESE może być predysponowana do ochrony odgromowej obiektów w których występuje możliwość dużych zgromadzeń ludzi, szczególnie takich jak stadiony, aquaparki, otwarte skanseny, budowle sakralne, centra handlowe a także obiektów zabytkowych i obiektów o prestiżowym znaczeniu dla kultury.

## Literatura


[1] Szpor S.: Ochrona Odgromowa, WNT, Warszawa, 1983.
[2] Szpor S.: Ligthining protective zones, Archiwum Elektrotechniki, (1979), z. 3.
[3] Flisowski Z., Korycki P.: Promowana i rzeczywista skuteczność piorunochronów z wczesną emisją strimerów (ESE), Przegląd Elektrotechniczny, (1998), nr 11, 282.
[4] Chrzan K., Smycz E.: Zwody aktywne z wczesną emisją, III Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Urządzenia piorunochronne w projektowaniu i budowie, Kraków, (2000), s. 66–74.
[5] Sowa A.: Badanie zagrożeń występujących podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w obiekty budowlane, Wiadomości Elektrotechniczne 2005, nr 10.
[6] Skopec A., Smycz E., Stec Cz.: Inicjacja stanu nieustalonego jako główna przyczyna większej skuteczności aktywnego zwodu w ochronie odgromowej-analiza porównawcza zwodów aktywnych i klasycznych, Wiadomości Elektrotechniczne 2008, nr 8, ss. 8–11.
[7] Chrzan K.: Nieskuteczność pewnego zwodu aktywnego. Wiadomości Elektrotechniczne 2009, nr 1, s. 35–37.
[8] Polska Norma PN-92/E-04060: Wysokonapięciowa technika probiercza. Ogólne określenia i wymagania probiercze, 1992.
[9] IEC 60060-1 (1989-11) – High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements, ed. 2.0.
[10] IEEE Std 4-1995 – IEEE Standard Techniques For High-voltage Testing.
[11] Skopec A., Smycz E., Stec Cz: Zastosowanie reakcji impulsowej i skokowej w analizie działania ochrony odgromowej zwodu aktywnego typu ESE w stanie niestacjonarnego narostu potencjału elektrycznego chmury, Wiadomości Elektrotechniczne 2011, nr10, ss. 40–44.
[12] Skopec A., Smycz E., Stec Cz.: Kryteria teoretyczne oceny działania zwodów typu ESE w ochronie odgromowej. Potwierdzenie eksperymentalne analizy teoretycznej. Wiadomości elektrotechniczne 2012, nr 09, ss. 25–30.
[13] Norme Francaise: Protection against lightning-Early streamer emission lightning protection systems, NF C 17-102, Septembr 2011, pp. 1–92.
[14] Moon P., Spencer D.E., Field Theory for Engineers, Princeton, Toronto London New York, 1961.
[15] IEC 60060-1 (1989-11) – High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements, ed. 2.0.
[16] IEEE Std 4-1995 – IEEE Standard Techniques For High-voltage Testing.
[17] RAPPORT D'ESSAIS N° 100512, Comparaison de l'efficacite d'un PDA actif vis-avis d'un PTS en laboratoire,, LABORATORIRE SIAME EGE (Equipe Genie Electrique), Universite de Pau et des Pays de l'Adour, 10 Mai 2012.
[18] RAPPORT D'ESSAIS N° 050612, Comparaison de l'efficacite d'un PDA actif vis-avis d'un PTS en laboratoire, LABORATORIRE SIAME EGE (Equipe Genie Electrique), Universite de Pau et des Pays de l'Adour, 5 Juin 2012.
[19] RAPPORT D'ESSAIS N° 170612, Comparaison de l'efficacite d'un PDA actif vis-avis d'un PTS en laboratoire,, LABORATORIRE SIAME EGE (Equipe Genie Electrique), Universite de Pau et des Pays de l'Adour, 17 Juin 2012.
[20] SPRAWOZDANIE Z BADAŃ Nr S1/2012/LSWA Laboratorium Symulowanych Wyładowań Atmosferycznych, Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, Warszawa, 2012.
[21] Smycz E., Stec Cz., Zając St.: Aktywna ochrona odgromowa, Ochrona Przeciwpożarowa, 2014, nr.3, s. 10–14.
[22] Pecastaing L., Reess T., Silvestre de Ferron A., Souakri S, Smycz E, Skopec A, Stec Cz.: Experimental demonstration of the effectiveness of an early streamer emission air terminal versus a Franklin rod: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, Issue 2, pp. 789–798, April 2015.


**Artykuły publikowane w Elektronice są rejestrowane w bazie danych CrossRef. Każdemu artykułowi przyznawany jest numer identyfikacyjny DOI (*Digital Object Identifier*). Autorzy artykułów publikowanych w Elektronice są proszeni do stosowania numerów DOI w wykazach literatury, wszędzie tam gdzie jest to możliwe.**