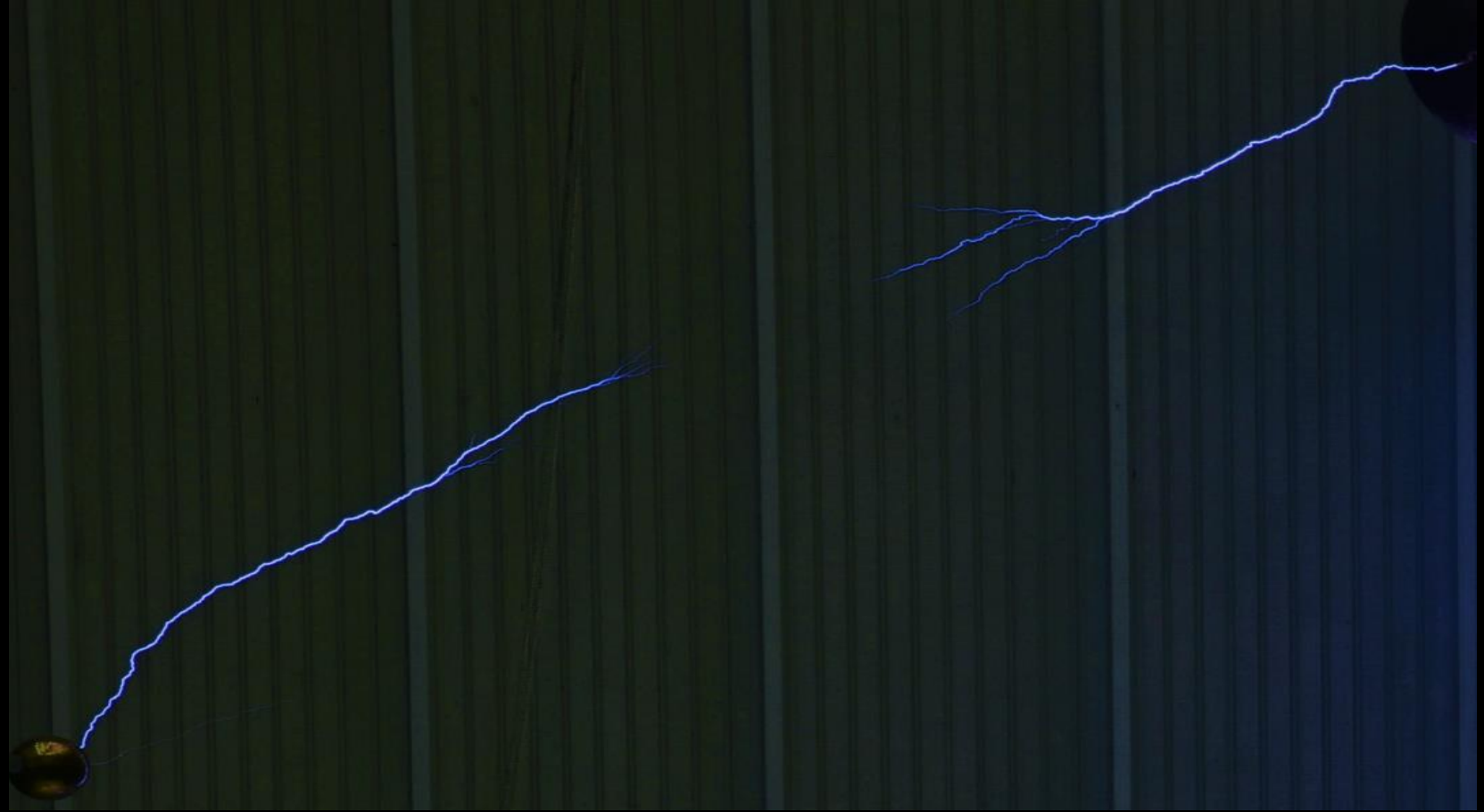


Badania laboratoryjne i symulacyjne wyładowań iskrowych w napowietrznych układach izolacyjnych



Instytut Energetyki - Hala Najwyższych Napięć



Wyładowanie zarejestrowane w Laboratorium Wysokich Napięć IEn. Udar łączeniowy 250/2500 μ s

Plan prezentacji

Wprowadzenie

Instytut Energetyki

Iskra długa

Część I - modelowanie

Modelowanie wyładowań elektrycznych

Model fraktalny

Modelowanie iskry długiej

Zmodyfikowany model fraktalny iskry długiej

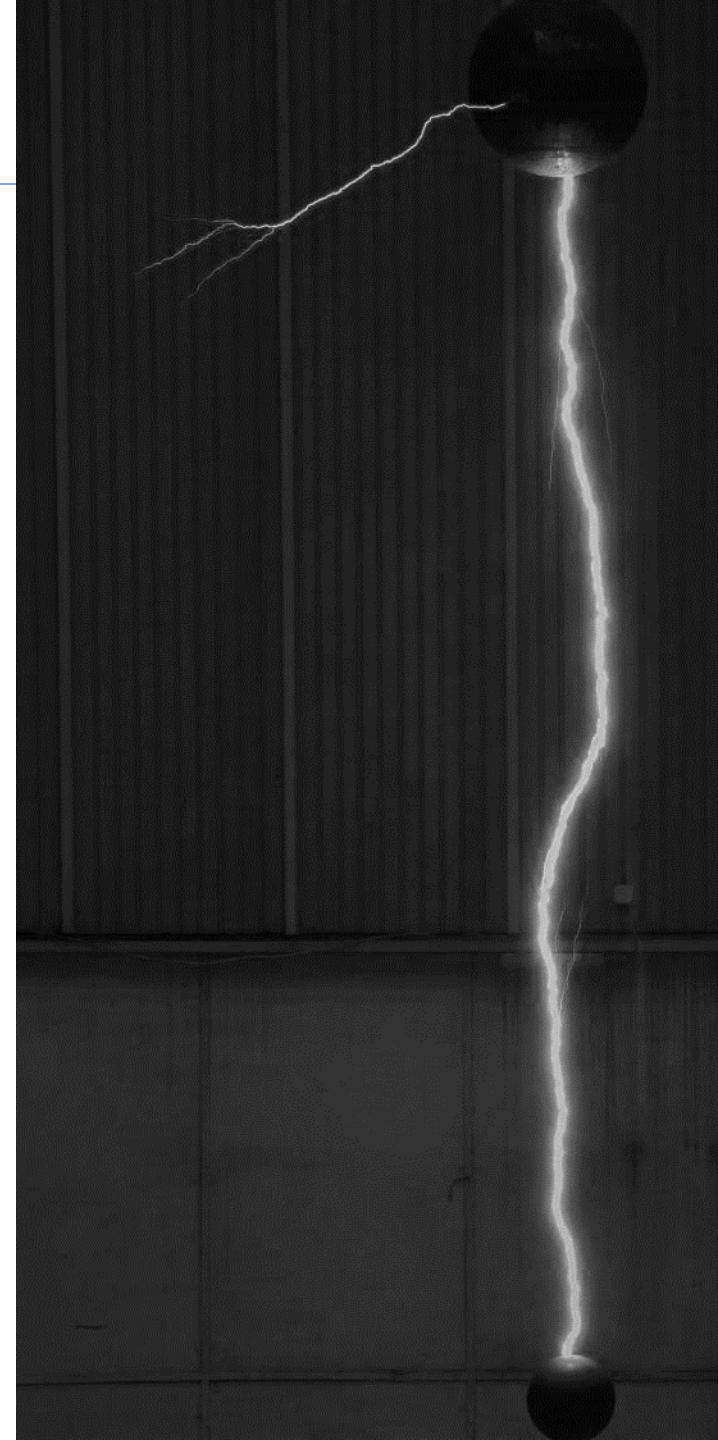
Część II - pomiary

Budowa i opis układu pomiarowego

Analiza wyników pomiarów

Wyniki pomiarów

Pomiary a modelowanie





Instytut
Energetyki



Źródło: D., WU et al. "Challenges in bringing UHVDC from 800 kV to higher voltages." (2017)



Źródło: Zehong, Liu, et al. "Research Work of ± 1100 kV UHVDC Technology." *State Grid Corporation of China, CIGRE* (2014)



Hala Najwyższych Napięć IEn

Wymiary wewnętrzne Hali Najwyższych Napięć: **40x40x33**

Możliwości probierczo-pomiarowe:

- Udar piorunowy 1,2/50 μ s **4 100 kV**
- Udar łączeniowy 250/2500 μ s **2 800 kV**
- Napięcie przemienne 50 Hz **860 kV**

Iskra długa

Definicja zjawiska

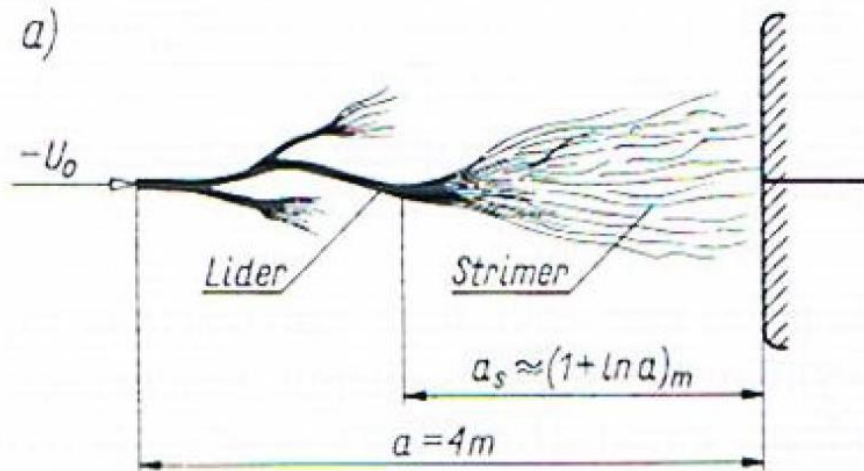
Iskra długa to rodzaj wyładowania elektrycznego występującego w powietrzu o ciśnieniu zbliżonym do ciśnienia atmosferycznego, którego rozwój można opisać mechanizmem kanałowym strimerowo-liderowym.



Źródło: Evaluation of Lightning Shielding Analysis Methods for EHV and UHV DC and AC Transmission-lines: Technical Brochures - 704 (2017)



Źródło: Evaluation of Lightning Shielding Analysis Methods for EHV and UHV DC and AC Transmission-lines: Technical Brochures - 704 (2017)



Źródło: Flisowski, Zdobysław. Technika wysokich napięć. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2005



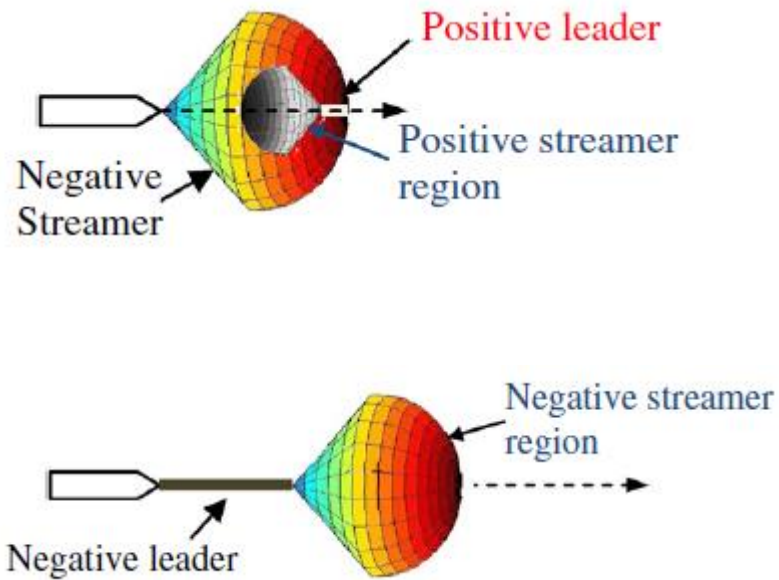
CZĘŚĆ I

Modelowanie fraktalne i badania
symulacyjne iskry długiej

Modelowanie wyładowań elektrycznych

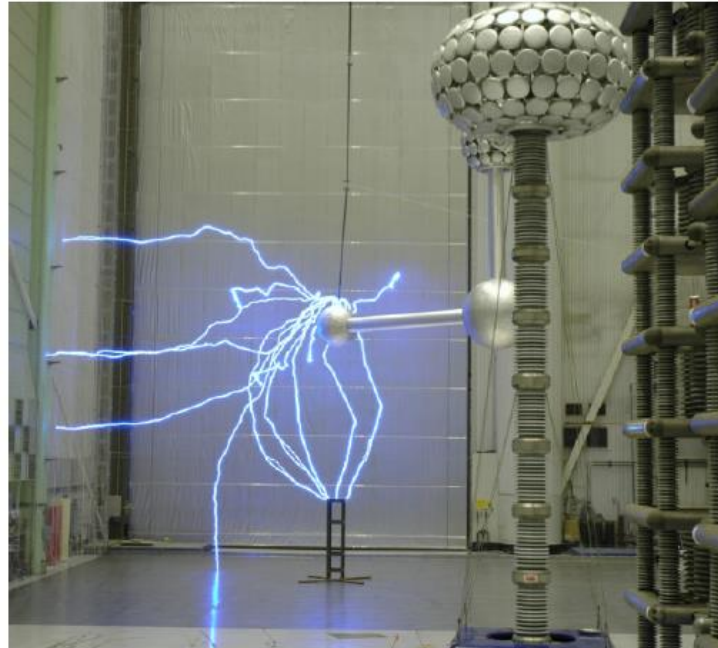
Rodzaje modeli

Modele LPM



Źródło: Arevalo, Liliana, and Vernon Cooray. "Preliminary study on the modelling of negative leader discharges." *Journal of Physics D: Applied Physics* 44.31 (2011): 315204

Modele fraktalne



„It is well established in literature that the discharge trajectories can not follow exactly the background E field-lines due to the distortion of local E-field by space charges.”

„As a practical issue in the design of UHVDC substations, it is difficult to identify a safe area where discharge will not hit.”

Źródło: Ming, Li, et al. "Intriguing observation on the breakdown trajectory of large air-gaps under switching impulse voltages." *16th Int'l. Sympos. High Voltage Eng.(ISH)*. Vol. 100. 2009

„... we have to rely more on statistical results and phenomenological descriptions. Fractal approach is such a tool.”

Źródło: CIGRE WG C4.26, "Evaluation of lightning shielding analysis methods for EHV and UHV DC and AC transmission lines," *Technical Brochure 704*, Oct. 2017

Model fraktalny

Sposób symulacji wyładowań

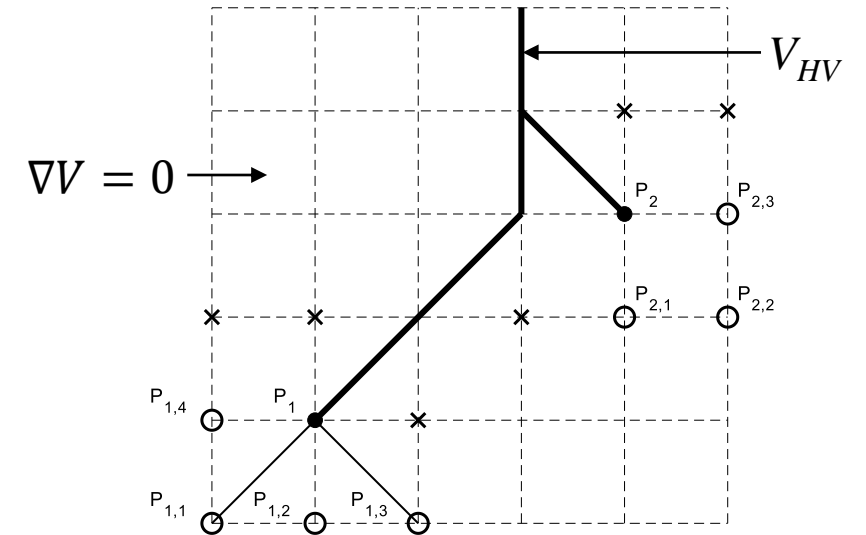
Ogólny schemat modelowania

Wyznaczanie rozkładu potencjału w otoczeniu kanału wyładowania

Określenie kierunku rozwoju wyładowania

Modyfikacja geometrii modelu polegająca na dodaniu nowych fragmentów do kanału wyładowania

Kierunek rozwoju wyładowania



$$p(P_i \rightarrow P_{i,j}) = \begin{cases} \frac{(E_{P_i P_{i,j}})^\eta}{\sum_{j=1}^{M_i} (E_{P_i P_{i,j}})^\eta}, & \text{jeżeli } E_{P_i P_{i,j}} \geq E_{cr} \\ 0, & \text{jeżeli } E_{P_i P_{i,j}} < E_{cr} \end{cases}$$

$$p(P_i \rightarrow P_{i,j}) \geq r$$

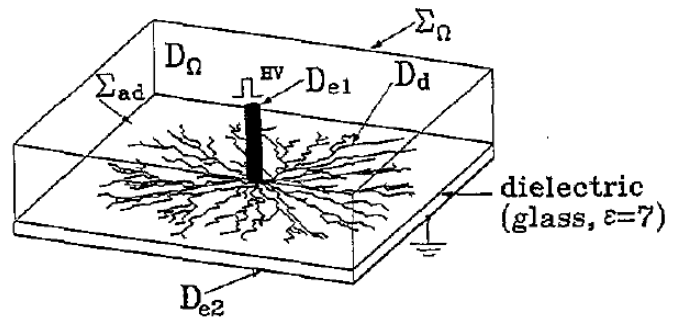
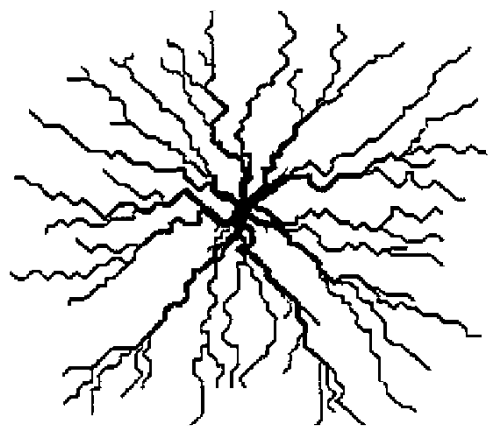
$$p(P_i \rightarrow P_{i,j}) < r$$

r - liczba losowa z zakresu od 0 do 1

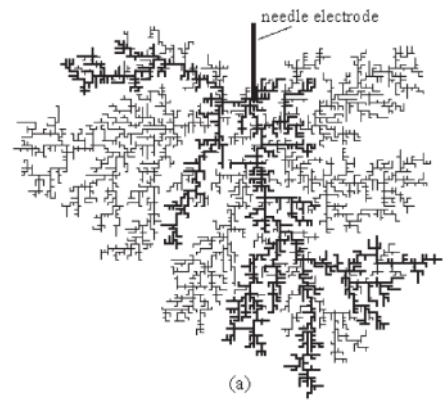
Model fraktalny

Zastosowanie

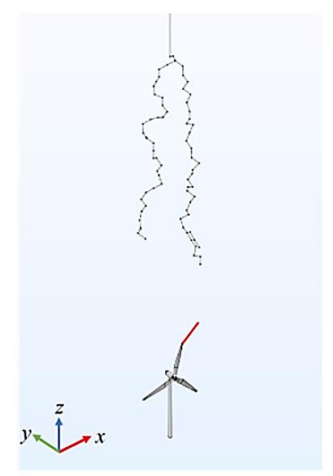
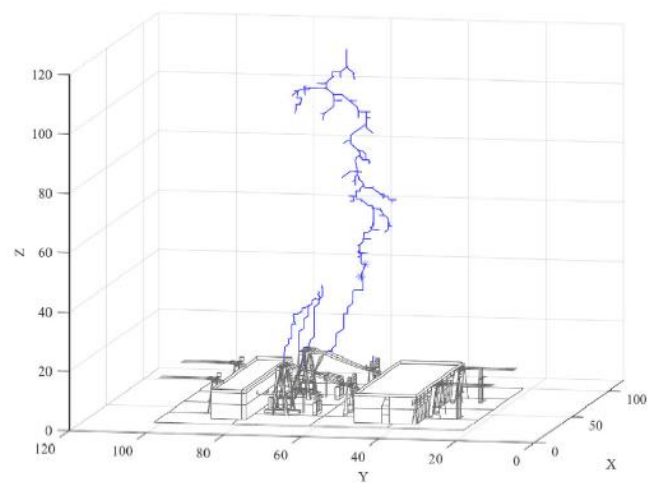
Wyładowania powierzchniowe



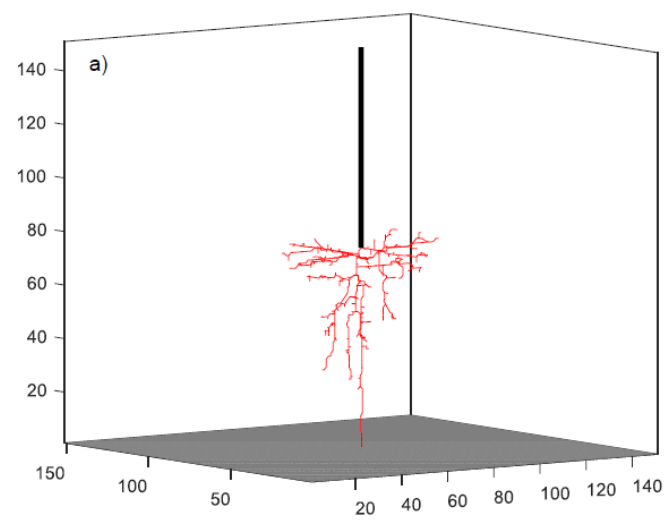
Wyładowania drzewiaste



Wyładowania piorunowe



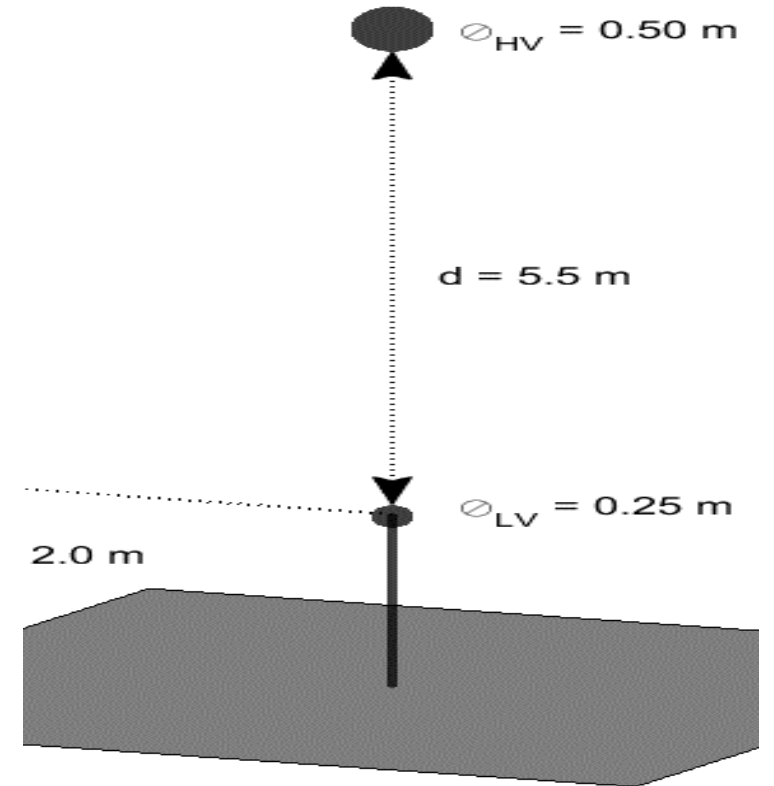
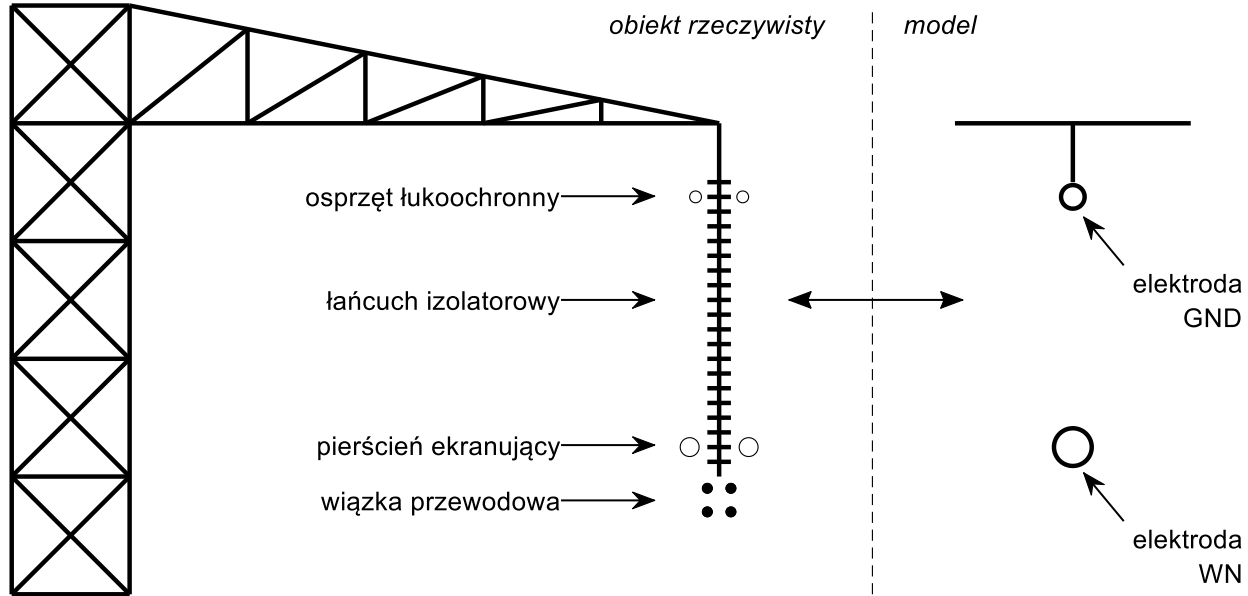
Wyładowania iskrowe



Modelowanie iskry długiej

Model geometryczny

Geometria modelu fraktalnego do badania iskry długiej



Konstrukcja modelu na podstawie:

"IEC 60071-2:2018 Insulation co-ordination - Part 2: Application guidelines",

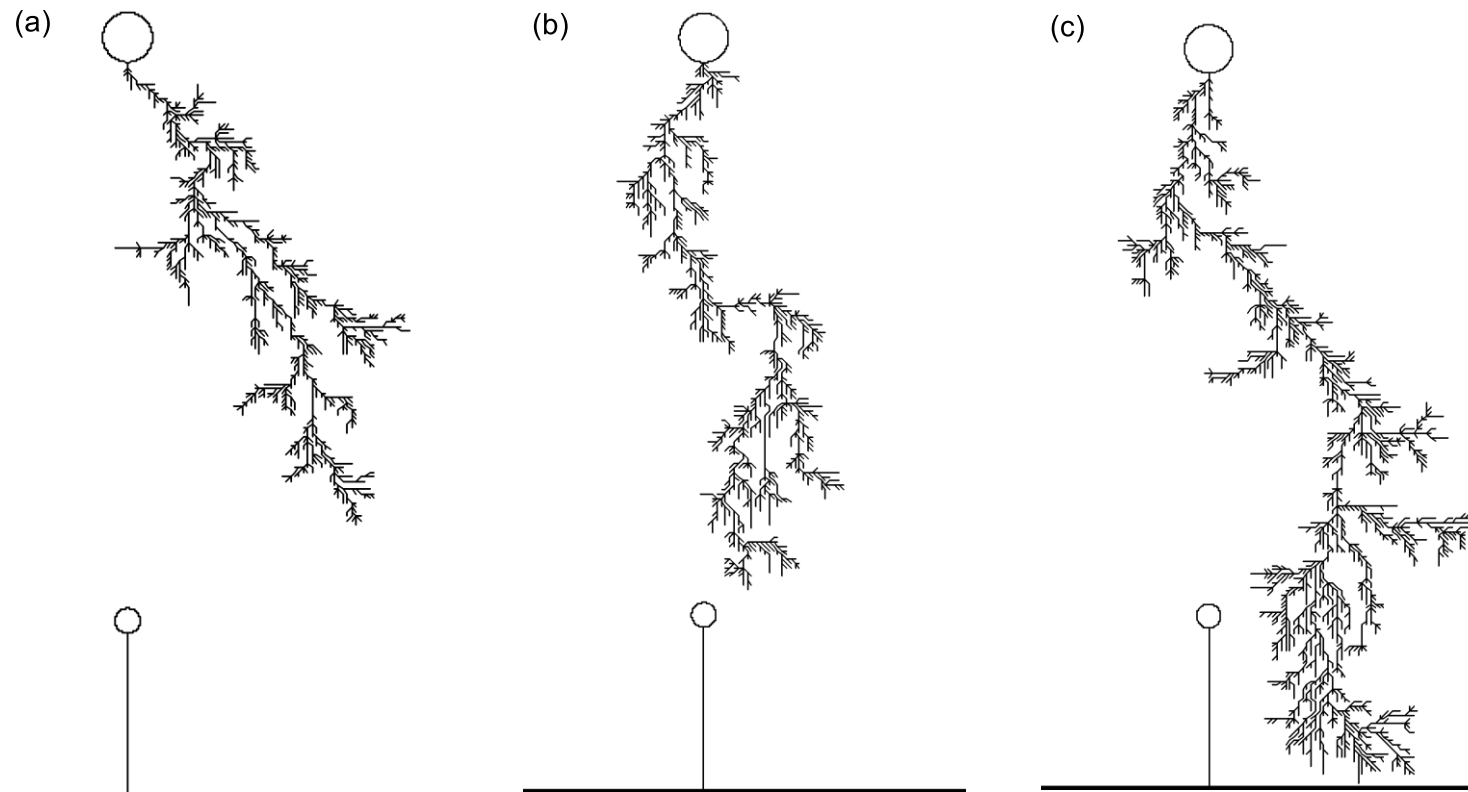
"IEEE Recommended Practice for Overvoltage and Insulation Coordination of Transmission Systems at 1000 kV AC and Above,,

CIGRE SC B2, "Overhead Lines" CIGRE Green Books, 2017

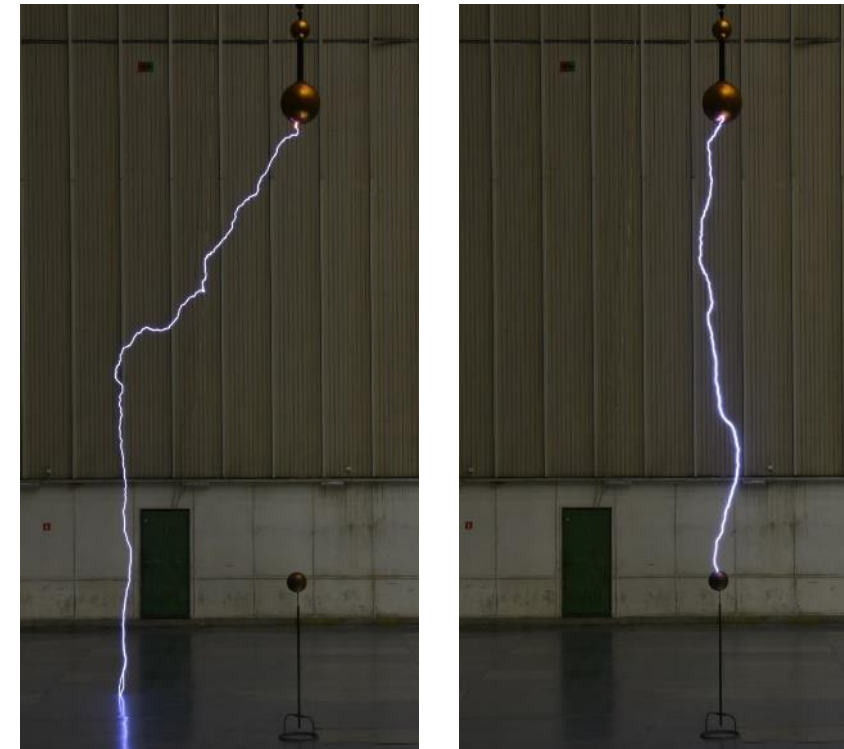
Modelowanie iskry długiej

Ocena jakościowa wyników symulacji

Wyniki symulacji



Rzeczywiste wyładowania



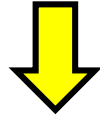
Udar łączeniowy 250/2500 μ s biegunowości dodatniej

Zmodyfikowany model fraktalny iskry długiej

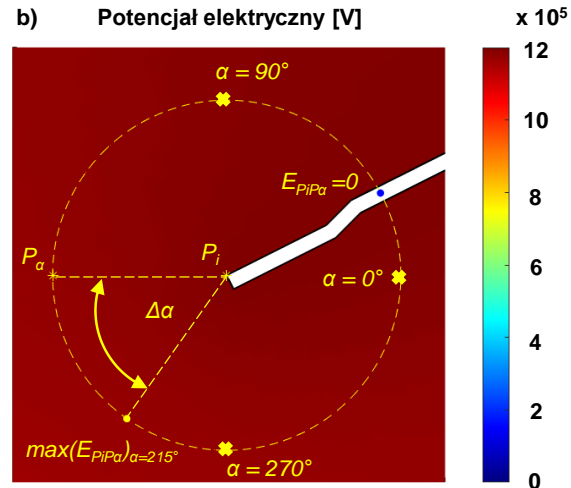
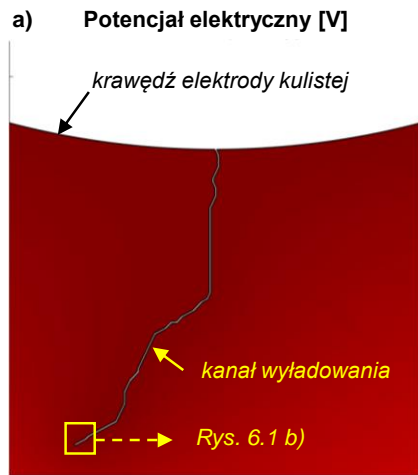
Sposób symulacji wyładowania

Opis opracowanego modelu iskry długiej

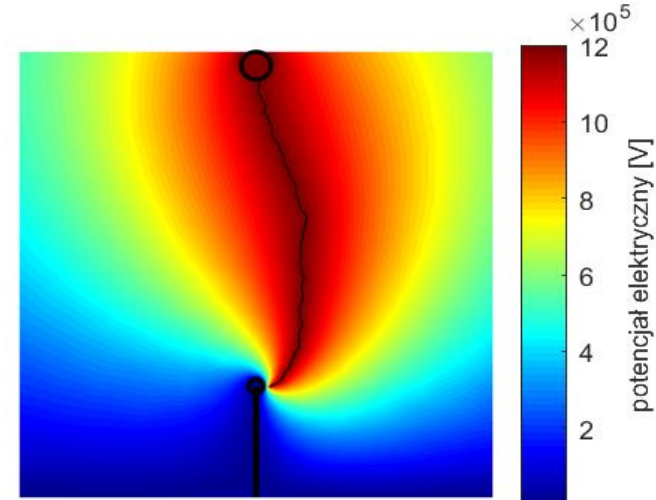
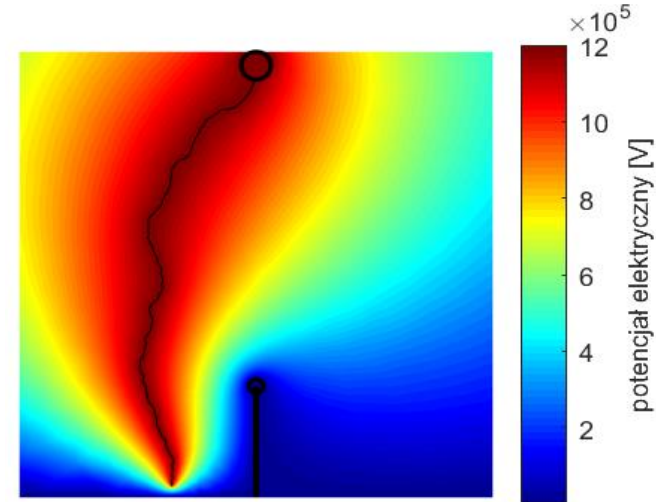
$$p(P_i \rightarrow P_{i,j}) = \begin{cases} \frac{(E_{P_i P_{i,j}})^\eta}{\sum_{j=1}^{M_i} (E_{P_i P_{i,j}})^\eta}, & \text{jeżeli } E_{P_i P_{i,j}} \geq E_{cr} \\ 0, & \text{jeżeli } E_{P_i P_{i,j}} < E_{cr} \end{cases}$$



$$p(P_i \rightarrow P_\alpha) = \begin{cases} \frac{(E_{P_i P_\alpha})^\eta}{\max(E_{P_i P_\alpha})^\eta}, & \text{jeżeli } E_{P_i P_\alpha} \geq E_{cr} \\ 0, & \text{jeżeli } E_{P_i P_\alpha} < E_{cr} \end{cases}$$



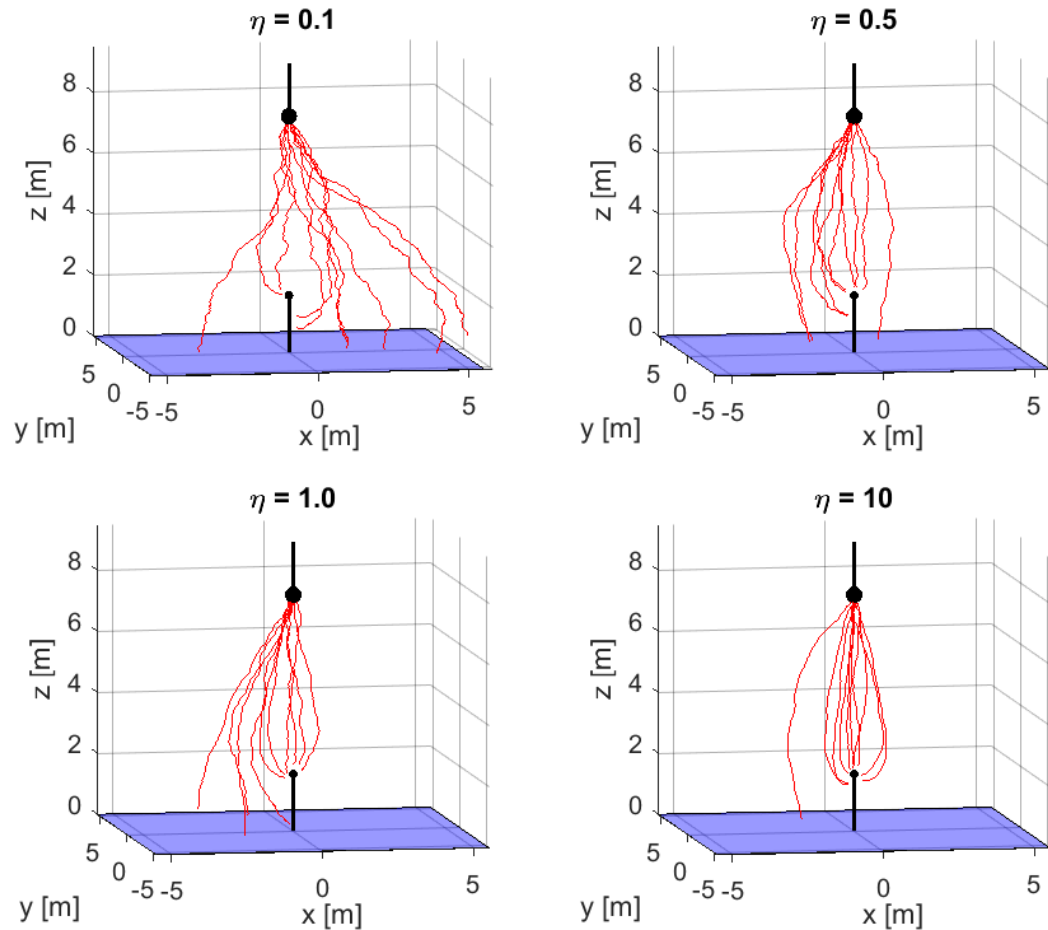
Ocena jakościowa wyników symulacji



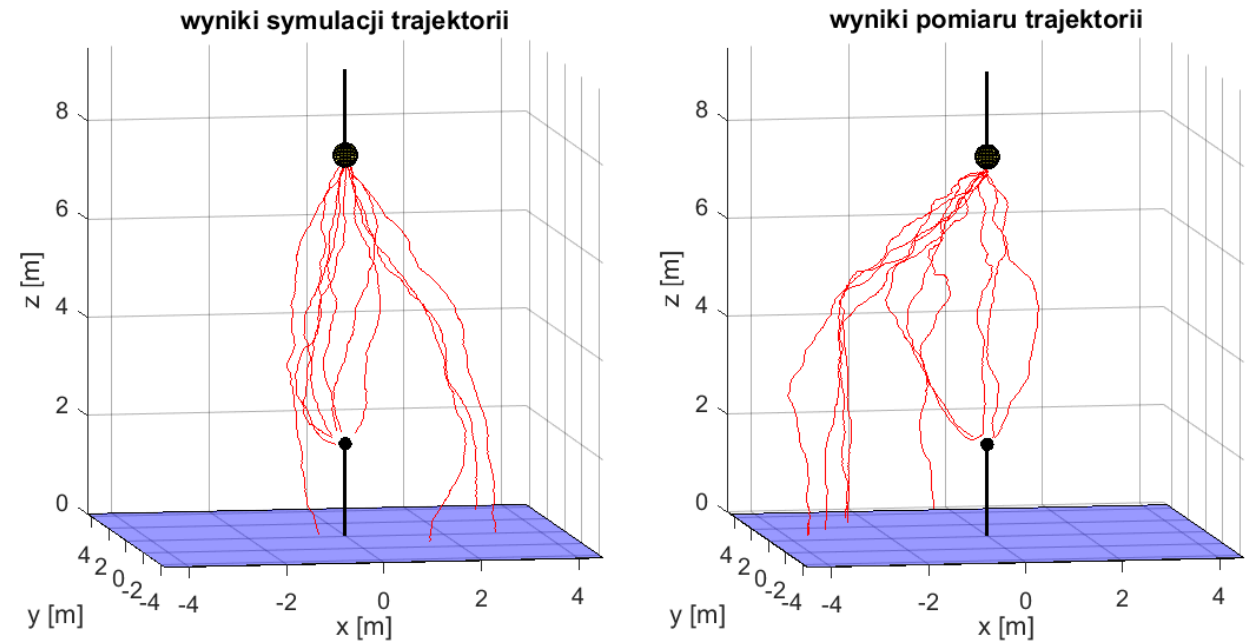
Zmodyfikowany model fraktalny iskry długiej

Ocena jakościowa wyników symulacji

Populacje wyładowań otrzymane w wyniku symulacji



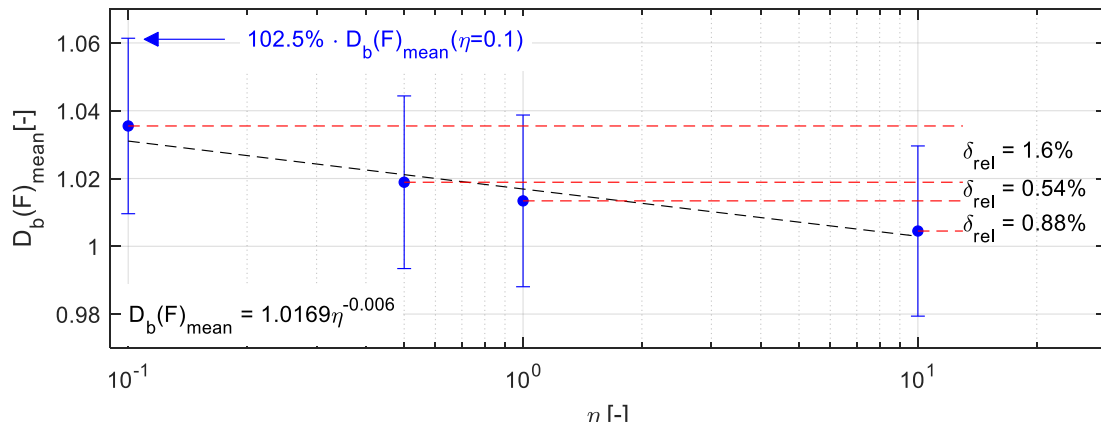
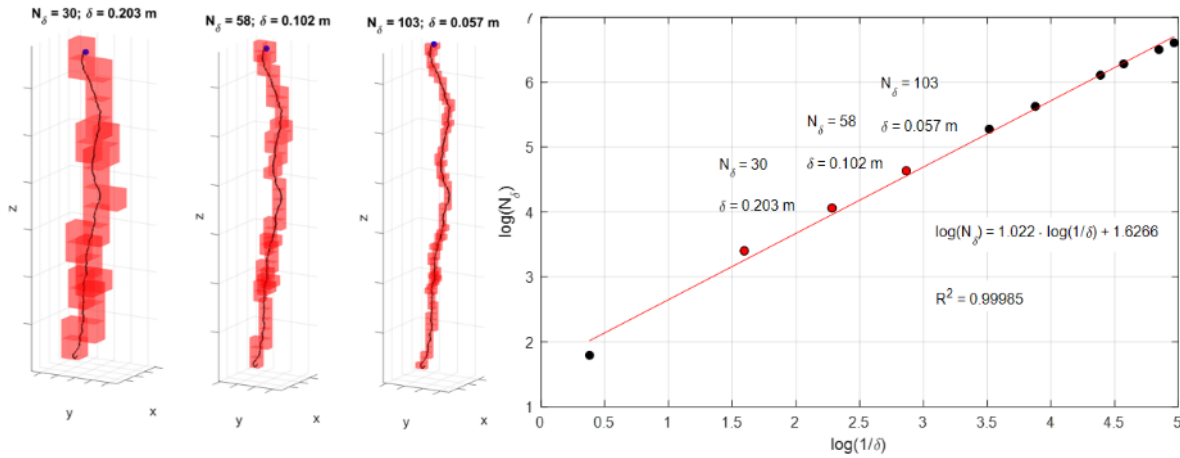
Porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarów



Zmodyfikowany model fraktalny iskry długiej

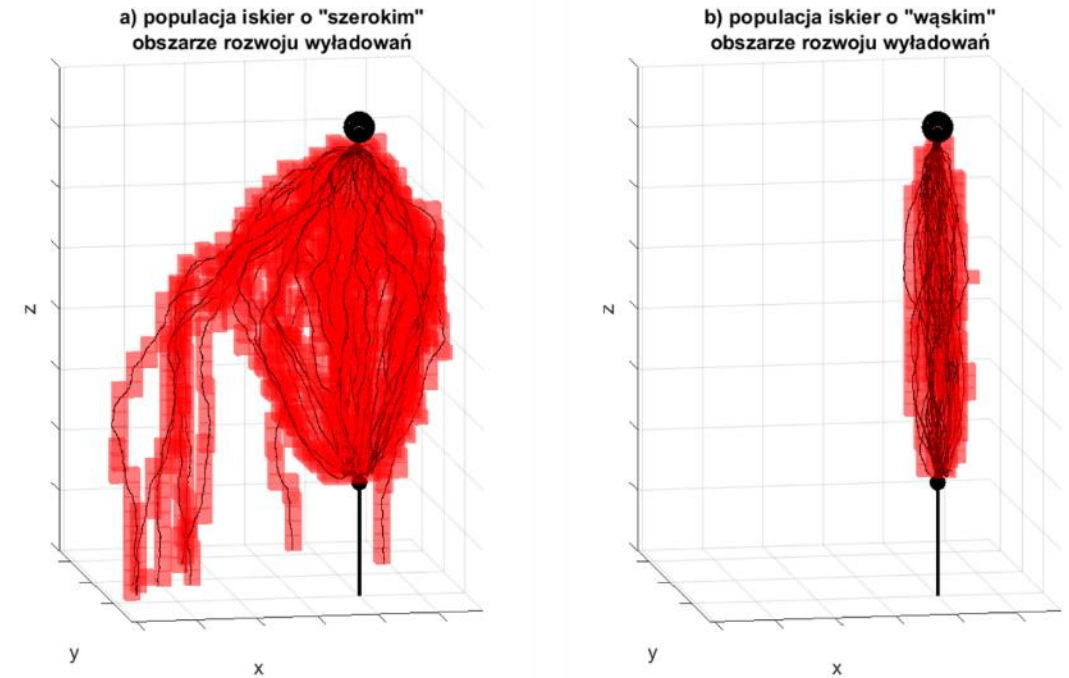
Ocena ilościowa wyników symulacji

Średni wymiar fraktalny



Wymiar fraktalny populacji wyładowań

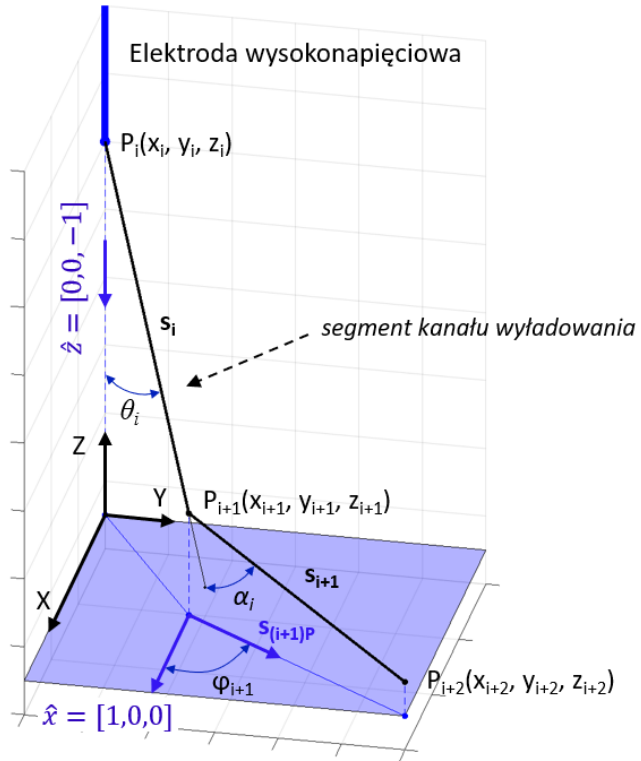
Ilustracja sposobu wyznaczania wymiaru fraktalnego populacji wyładowań dla dwóch populacji iskier, charakteryzujących się różnym rozmiarem obszaru, w którym rozwijają się wyładowania



Zmodyfikowany model fraktalny iskry długiej

Ocena ilościowa wyników symulacji

Model obliczeniowy stosowany podczas wyznaczania kątów krętości

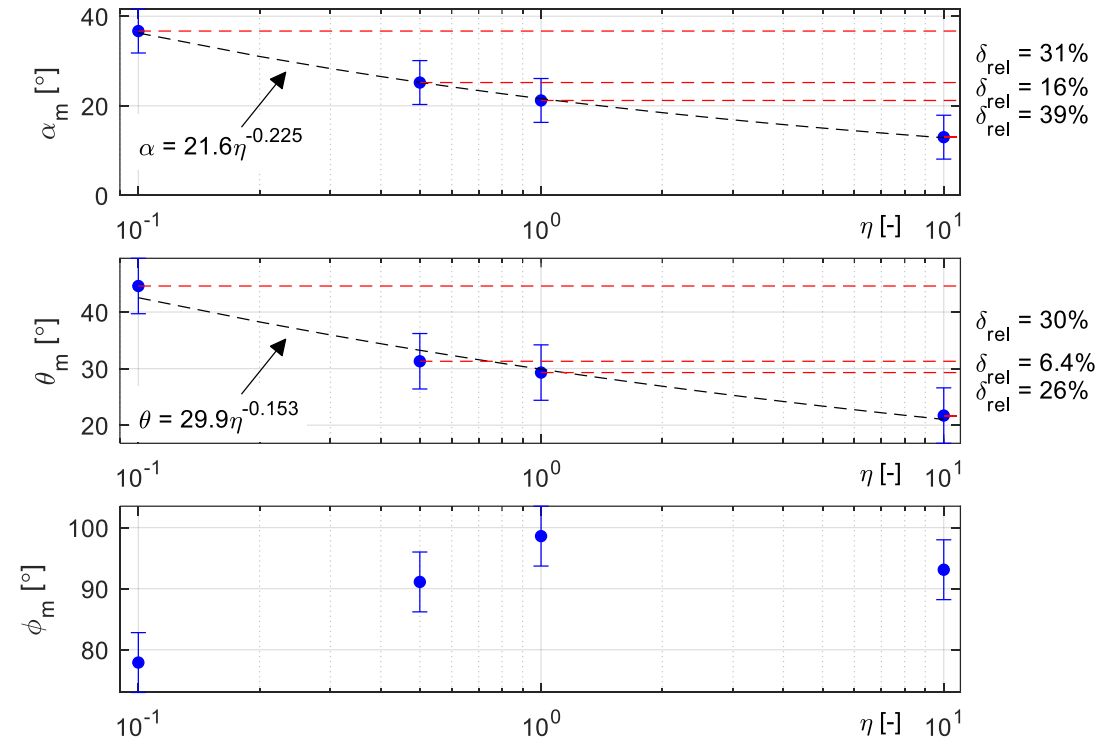


$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{s_i \cdot s_{i+1}}{|s_i||s_{i+1}|}\right)$$

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{s_i \cdot \hat{z}}{|s_i||\hat{z}|}\right)$$

$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{s_{iP} \cdot \hat{x}}{|s_{iP}||\hat{x}|}\right)$$

Wyniki obliczeń kątów krętości dla czterech wybranych populacji



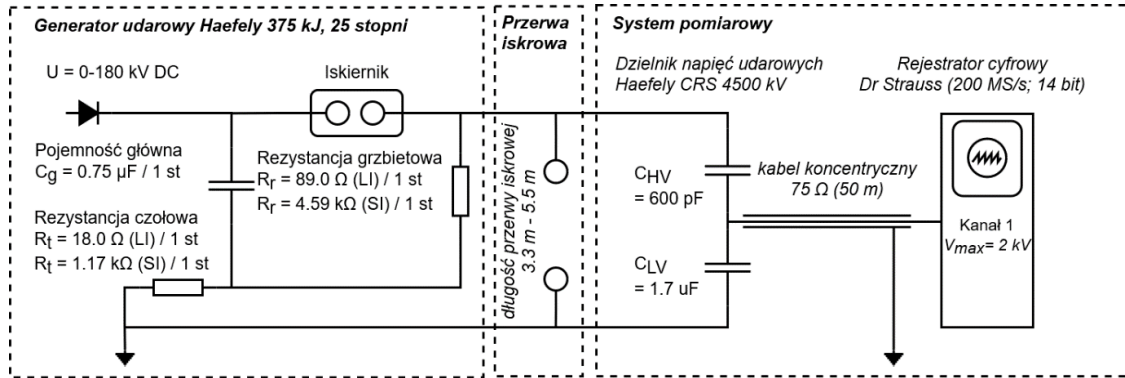


CZĘŚĆ II
Pomiary laboratoryjne
iskry długiej

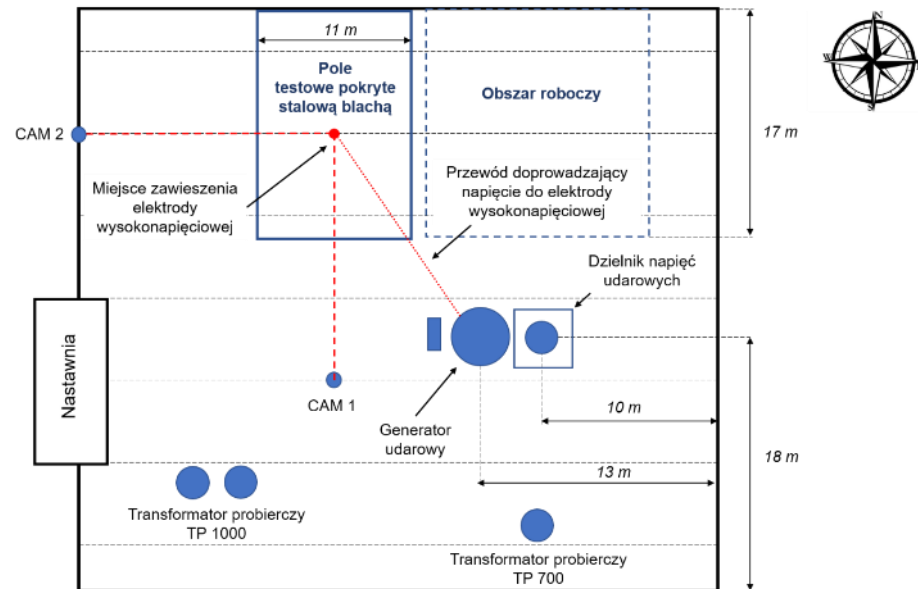
Budowa i opis układu pomiarowego

Wytwarzanie wyładowań iskrowych

Schemat do generacji i pomiaru napięcia probierczego



Rozmieszczenie elementów układu pomiarowego



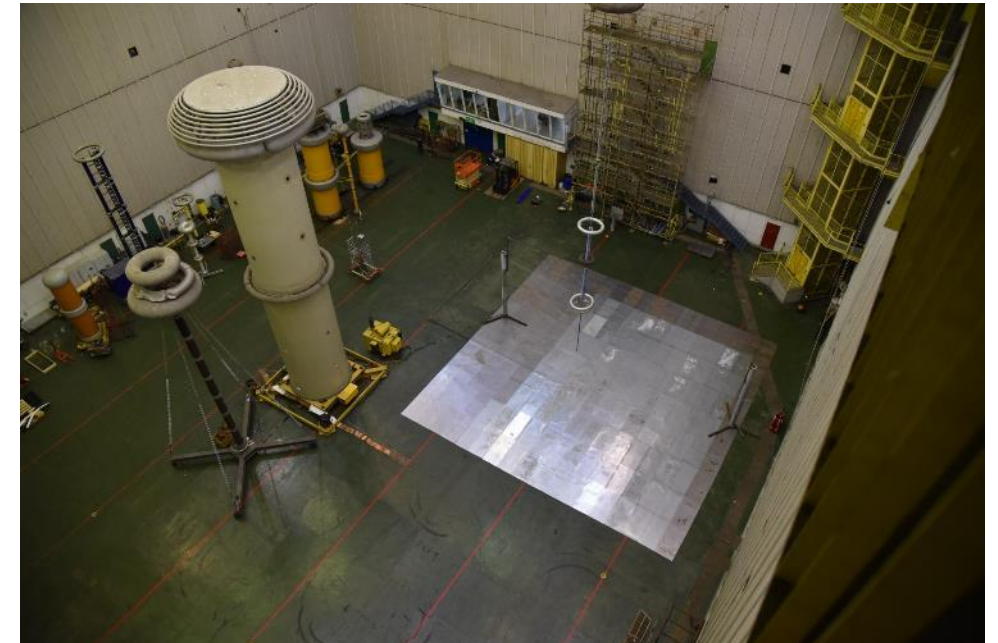
Możliwości badawczo-pomiarowe

Wymiary wewnętrzne Hali Najwyższych Napięć: **40x40x33**

Możliwości probierczo-pomiarowe:

- Udar piorunowy $1,2/50 \mu\text{s}$ **4 100 kV**
- Udar łączeniowy $250/2500 \mu\text{s}$ **2 800 kV**

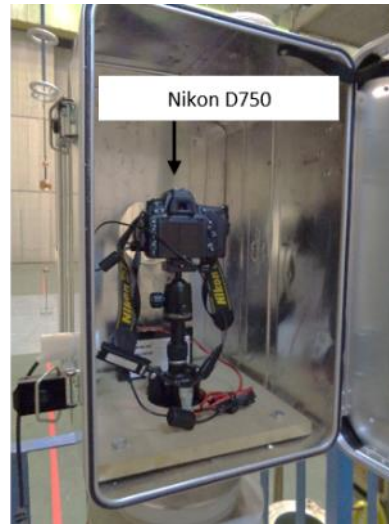
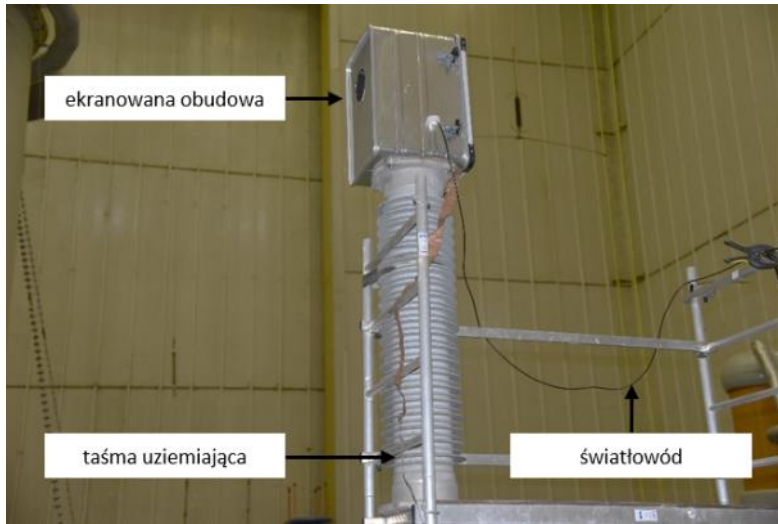
Widok na laboratorium



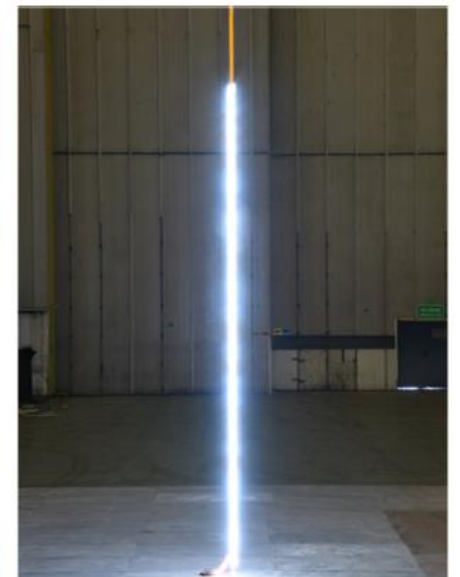
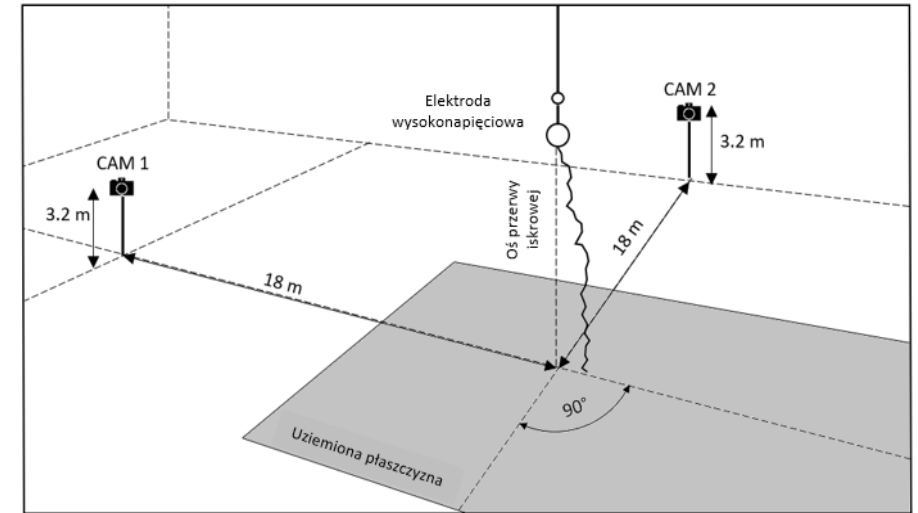
Budowa i opis układu pomiarowego

Rejestracja kanału wyładowania

Rejestracja obrazów przedstawiających kanał wyładowania



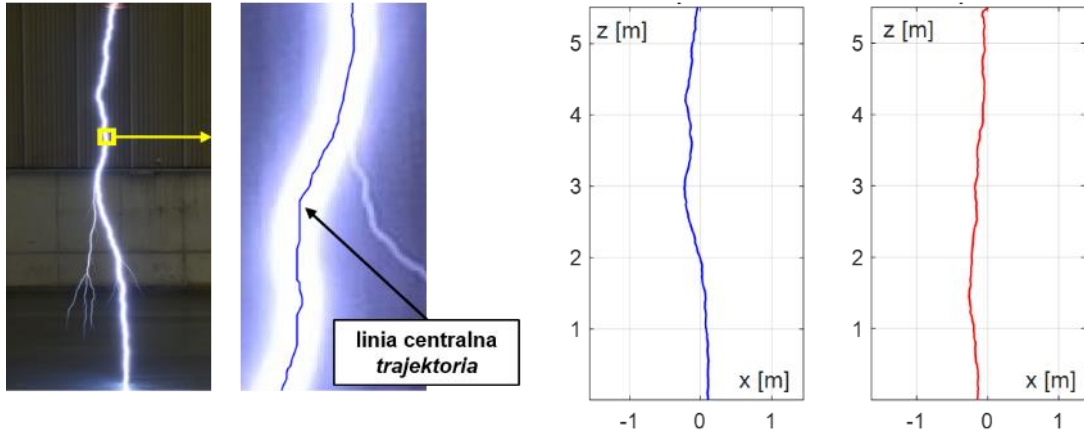
Ustawienie aparatów umożliwiające rekonstrukcję kanału



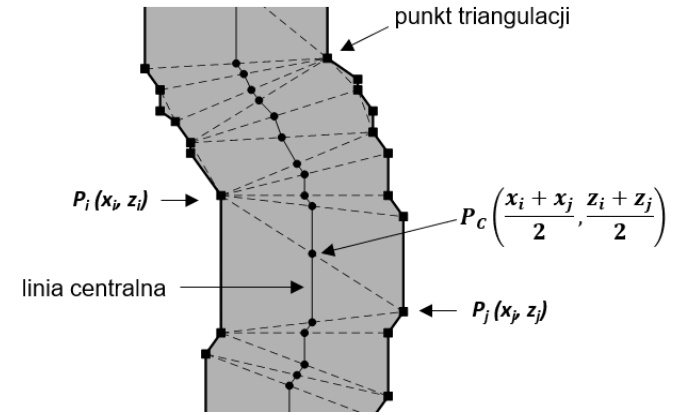
Analiza wyników pomiarów

Rekonstrukcja kanału wyładowania

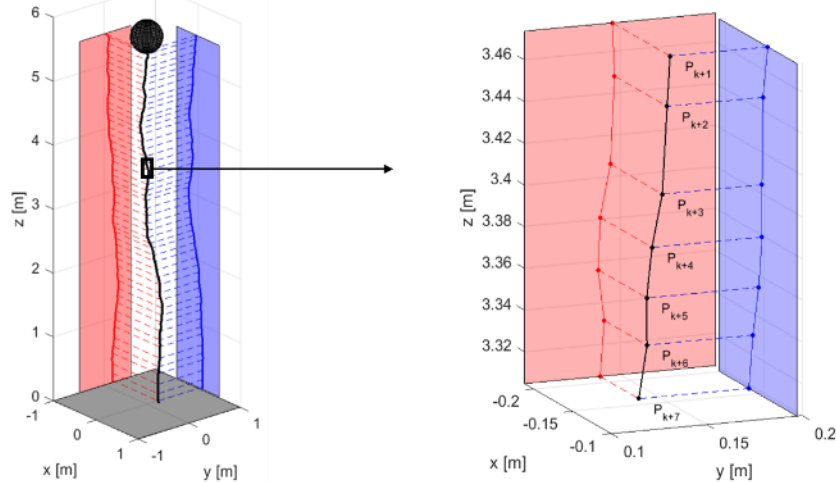
Trajektoria na płaszczyźnie dwuwymiarowej



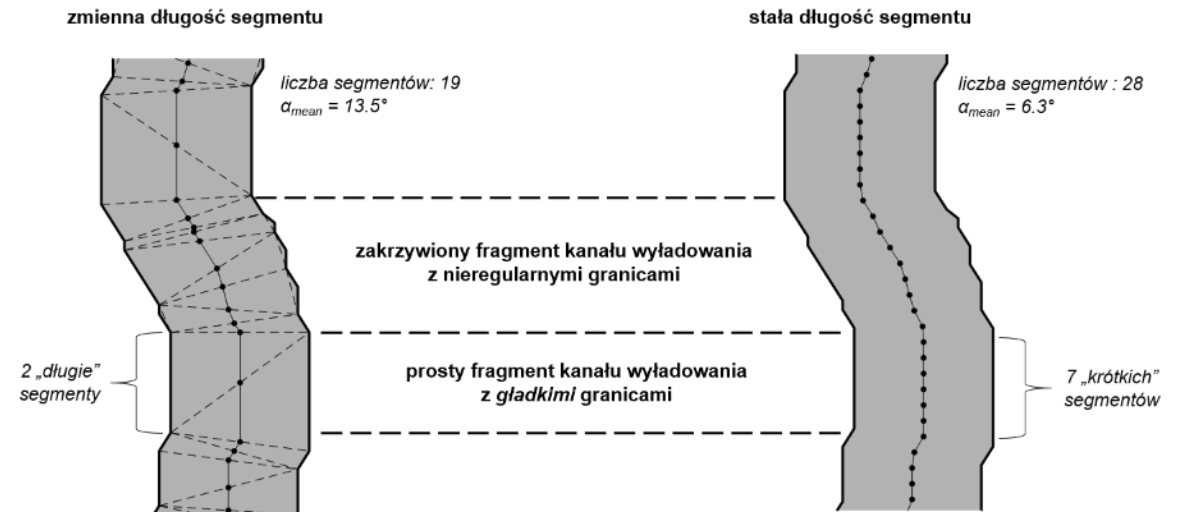
Ilustracja wyznaczania trajektorii przy wykorzystaniu triangulacji



Przestrzenna rekonstrukcja trajektorii



Porównanie metod wyznaczania trajektorii



Analiza wyników pomiarów

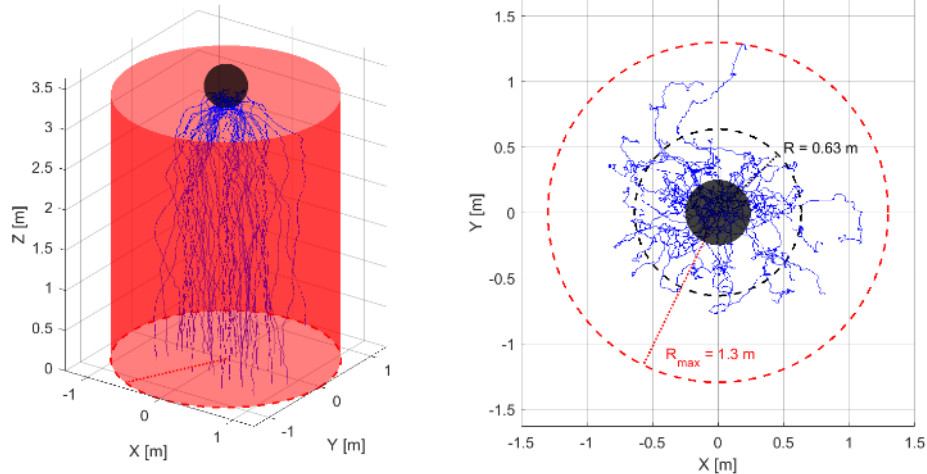
Rodzaj, biegunowość i wartość napięcia probierczego

Podsumowanie wykonanych badań				
Długość przerwy iskrowej	Układ elektrod	Rodzaj wyładowania	Biegunowość wyładowania	U_{mean} [kV]
d = 3,3 m	kula-płyta (S-P)	udar łączeniowy (SI)	dodatnia (+)	1200
			ujemna (-)	2161
		udar piorunowy (LI)	dodatnia (+)	2002
			ujemna (-)	2857
	kula-kula (S-S)	udar łączeniowy (SI)	dodatnia (+)	1423
			ujemna (-)	2295
		udar piorunowy (LI)	dodatnia (+)	2101
			ujemna (-)	2547
d = 5,5 m	kula-płyta (S-P)	udar łączeniowy (SI)	dodatnia (+)	1598
		udar piorunowy (LI)	dodatnia (+)	3181
	kula-kula (S-S)	udar łączeniowy (SI)	dodatnia (+)	1935
		udar piorunowy (LI)	dodatnia (+)	3364

Analiza wyników pomiarów

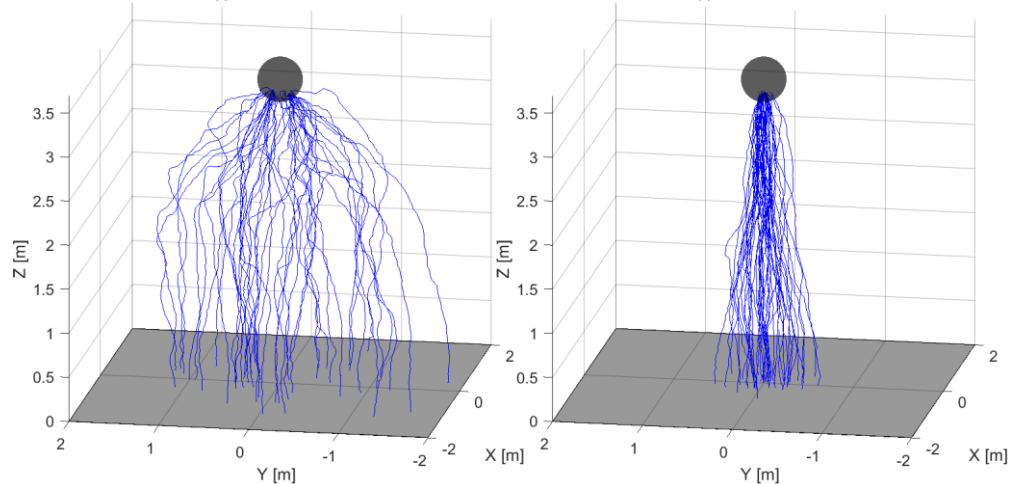
Parametry opisujące trajektorię wyładowania

Potencjalny obszar rozwoju wyładowania - definicja



$SI(-) / S - P / d = 3.3 \text{ m}$

$LI(-) / S - P / d = 3.3 \text{ m}$



Wymiar fraktalny

Wpływ liczby wyładowań na wartość wymiaru fraktalnego

Kąty krętości

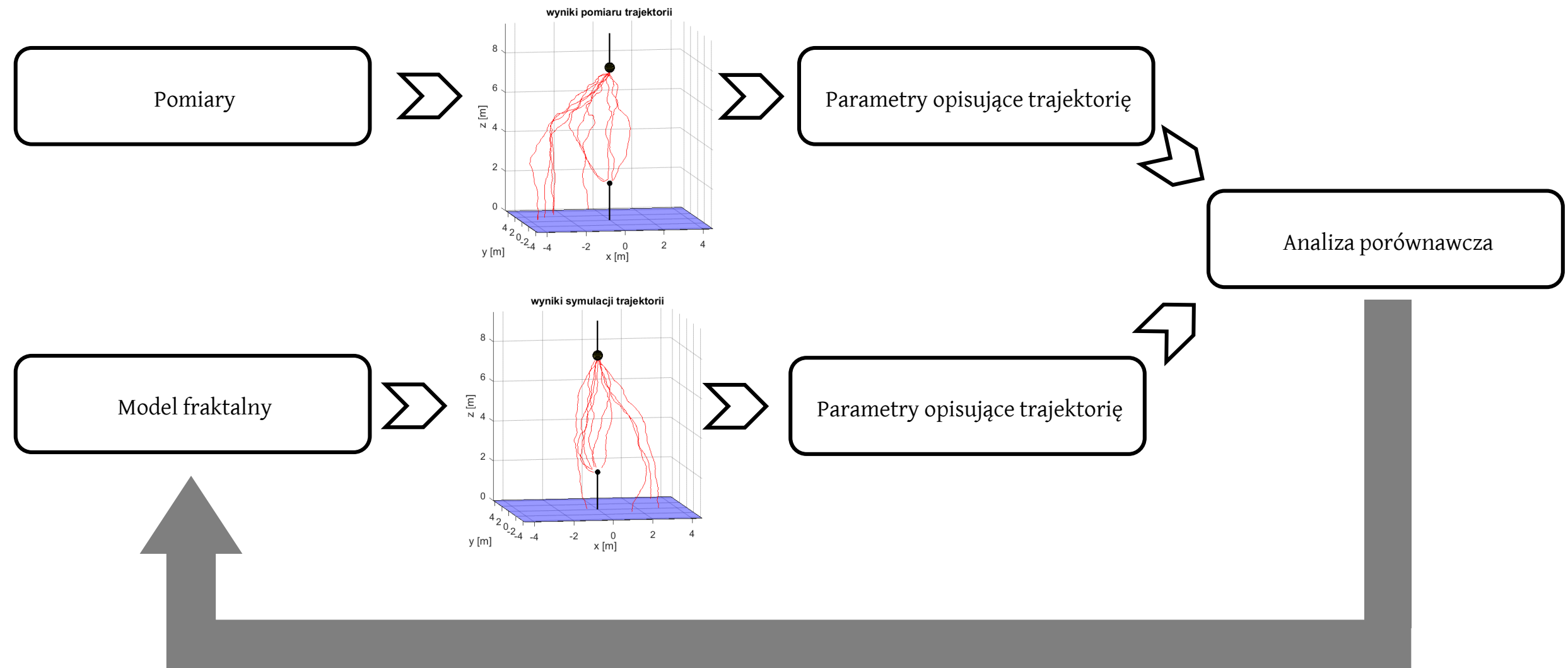
Rozkład wartości kątów wzdłuż kanału wyładowania

Długości oraz liczby segmentów tworzących kanał wyładowania

Długość iskiei oraz względna długość segmentów

Wyniki pomiarów

Wykorzystanie wyników pomiarów na potrzeby modelowania



Pomiary a modelowanie

Usprawnienie procesu modelowania przez wykorzystanie sztucznej inteligencji

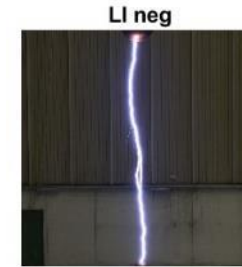
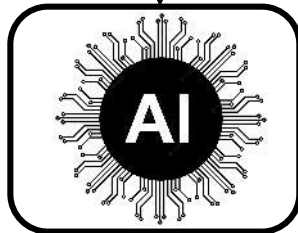
Rozbudowa modelu fraktalnego w oparciu o elementy związane z sieciami sztucznej inteligencji i algorytmami uczenia maszynowego

Rozkład pola elektrycznego w otoczeniu kanału wyładowania

2400 wyładowań

$$p(P_i \rightarrow P_{i,j}) = \begin{cases} \frac{(E_{P_i P_{i,j}})^\eta}{\sum_{j=1}^{M_i} (E_{P_i P_{i,j}})^\eta}, & \text{jeżeli } E_{P_i P_{i,j}} \geq E_{cr} \\ 0, & \text{jeżeli } E_{P_i P_{i,j}} < E_{cr} \end{cases}$$

Kierunek rozwoju wyładowania

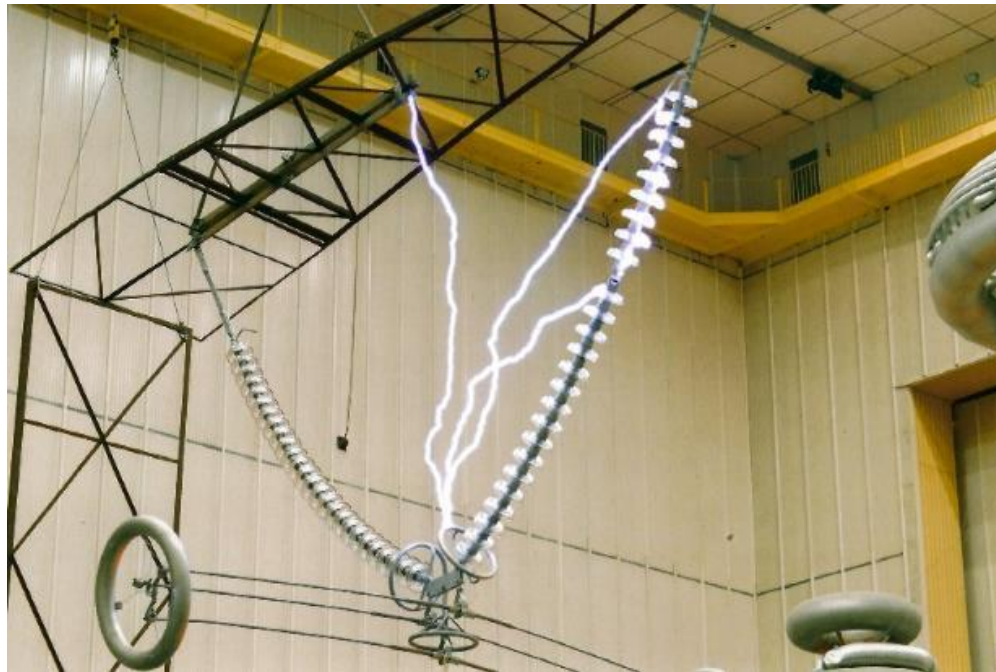


Model 1.2

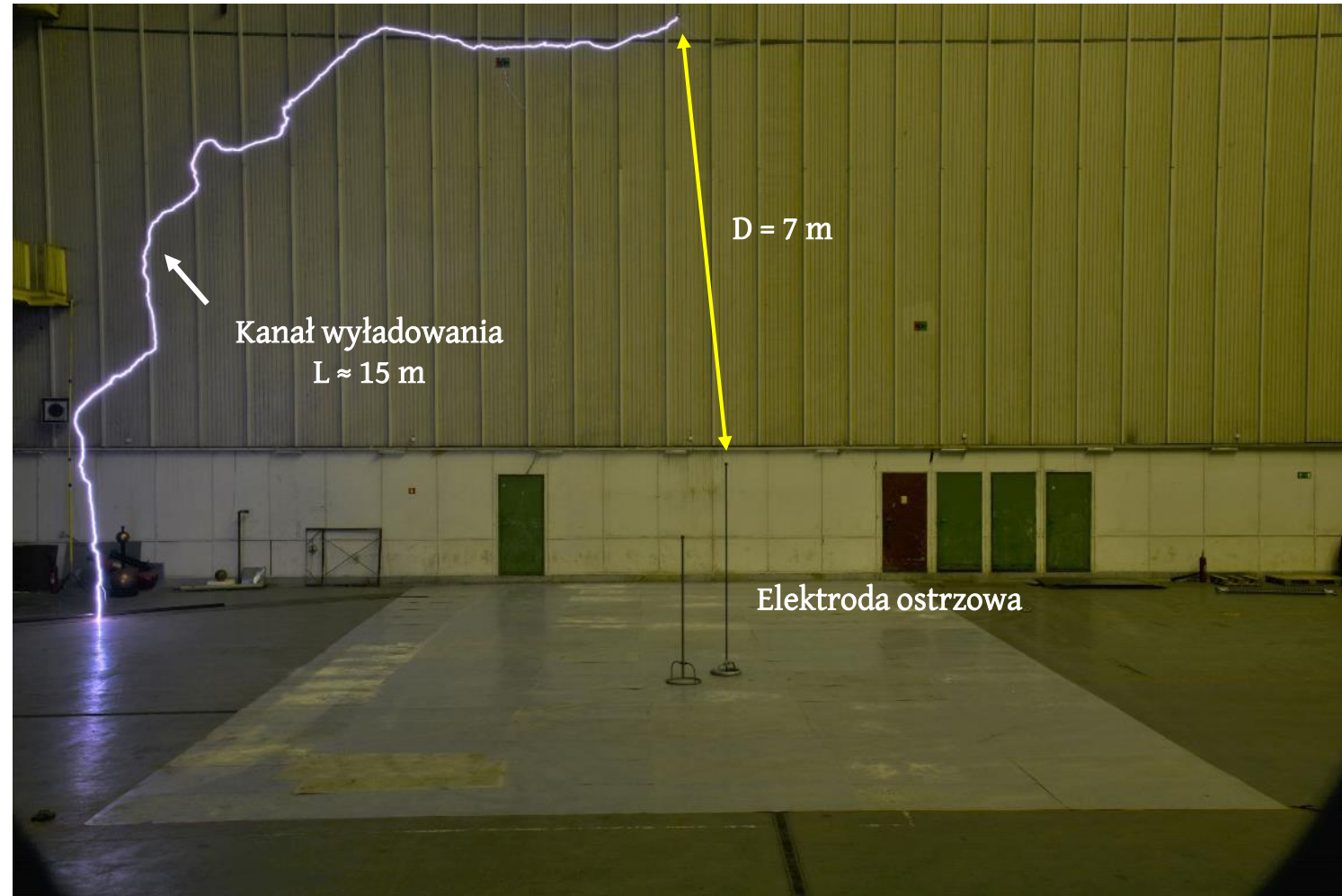
True class	Predicted class				Summary	
	LI neg	LI pos	SI neg	SI pos	True Positive	False Negative
LI neg	89%	11%			89%	11%
LI pos	3%	95%	1%	1%	95%	5%
SI neg		3%	95%	1%	95%	5%
SI pos				100%	100%	

Pomiary a modelowanie

Zastosowanie



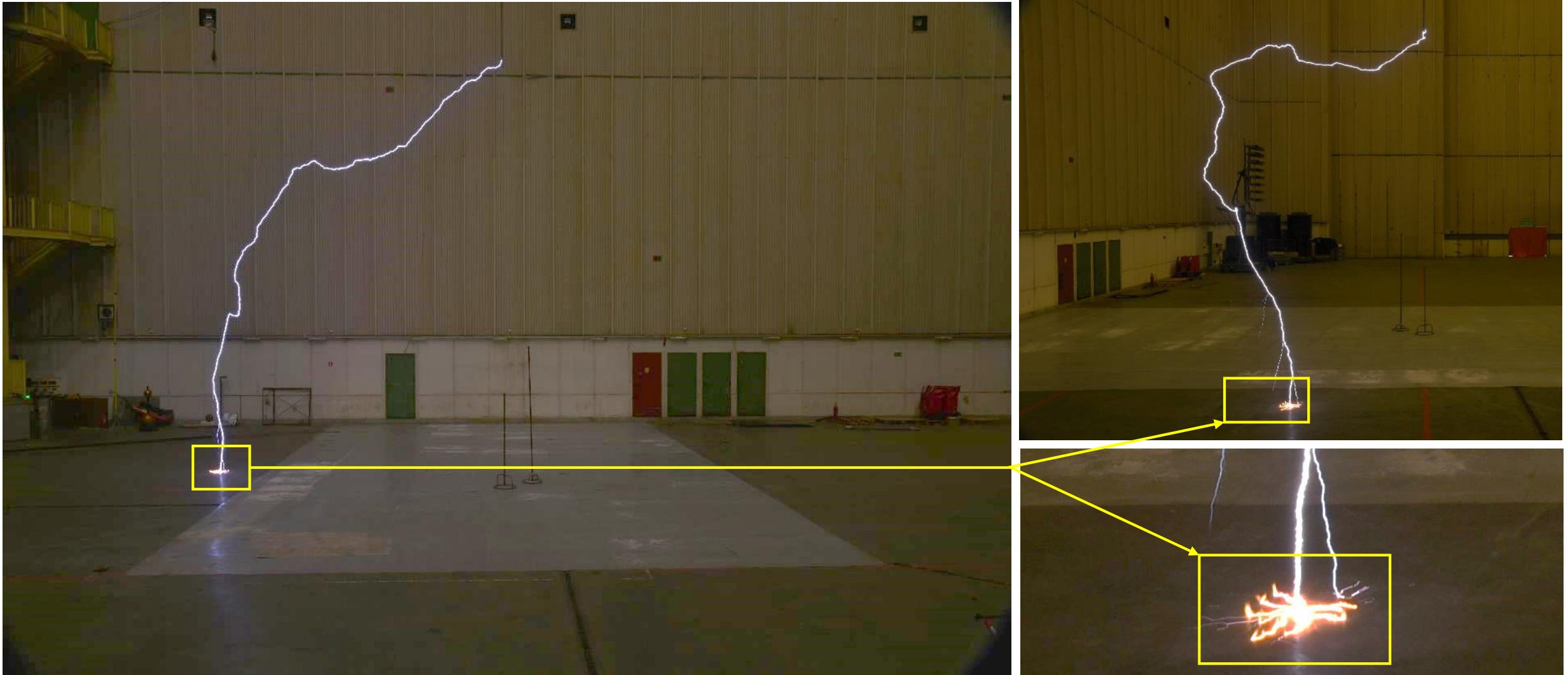
Źródło: A. Wielonek, Archiwum Laboratorium Wysokich Napięć IEn



Udar łączeniowy 250/2500 μ s biegunowości dodatniej

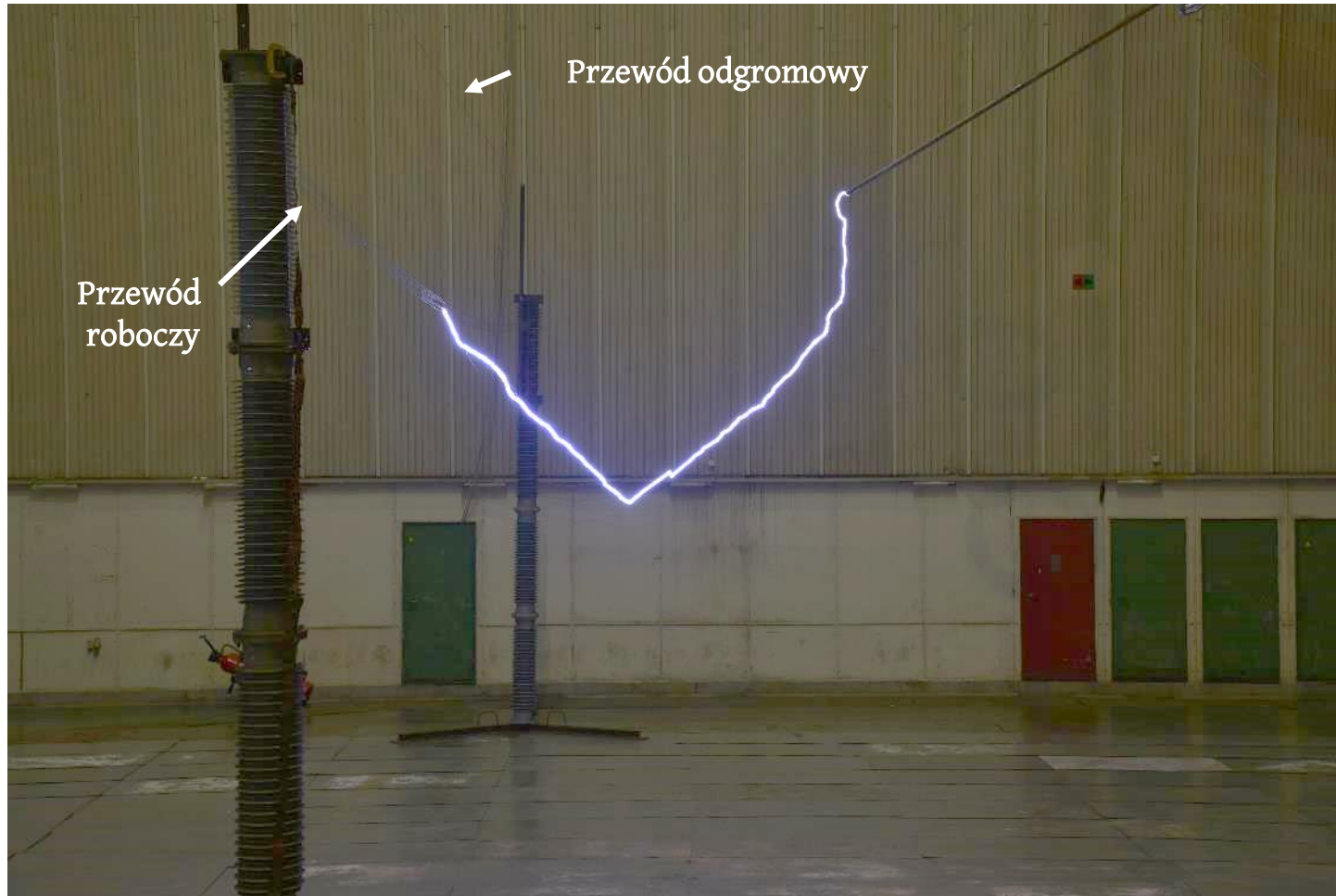
Pomiary a modelowanie

Zastosowanie



Pomiary a modelowanie

Zastosowanie



Badania modeli instalacji odgromowej linii UHV

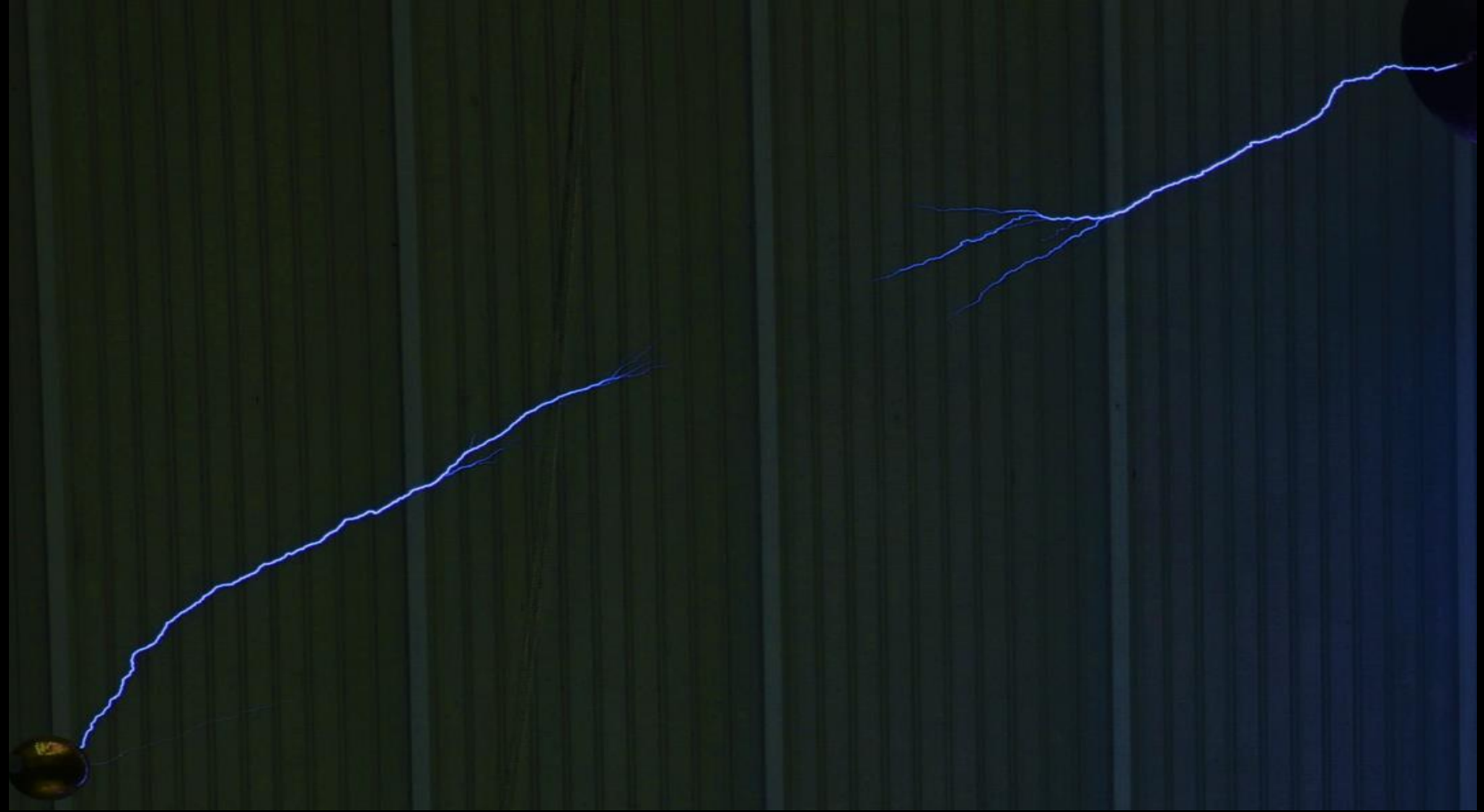


Źródło: J. Takami and S. Okabe,
2007. Characteristics of Direct
Lightning Strokes to Phase
Conductors of UHV
Transmission Lines. IEEE Trans.
Power Delivery, Vol. 22, pp.
537-546.

Badania laboratoryjne i symulacyjne wyładowań iskrowych w napowietrznych układach izolacyjnych



Instytut Energetyki - Hala Najwyższych Napięć



Wyładowanie zarejestrowane w Laboratorium Wysokich Napięć IEn. Udar łączeniowy 250/2500 μ s