

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA
I ELEKTROTECHNIKA
DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. Michał Molas

**Pomiary i analiza trajektorii iskry długiej
dla potrzeb modelowania fraktalnego**

Promotor

dr hab. inż. Marcin Szewczyk, prof. uczelni

WARSZAWA 2023

Streszczenie

Pomiary i analiza trajektorii iskry długiej dla potrzeb modelowania fraktalnego

Niniejsza rozprawa jest poświęcona symulacjom, pomiarom oraz analizie trajektorii iskry długiej, w celu zbadania możliwości wykorzystania modelowania fraktalnego do symulacji wyładowań elektrycznych powstałych w wyniku napięć udarowych.

W pierwszej kolejności przedstawiono założenia modelu fraktalnego oraz dokonano analizy możliwości jego zastosowania do symulacji wyładowań powierzchniowych, drzewiastych oraz piorunowych. Następnie opracowano model fraktalny dla iskry długiej oraz wykonano symulacje, których celem było zbadanie trajektorii rozwoju wyładowań iskrowych.

Na podstawie analizy wyników symulacji stwierdzono istnienie potrzeby wykonania nowych pomiarów laboratoryjnych, których celem byłoby zbadanie cech trajektorii wyładowań iskrowych zaobserwowanych podczas badań symulacyjnych

Po dokonaniu analizy literatury opisującej aktualne wyniki pomiarów wielkości opisujących trajektorię iskry długiej, zaprojektowano oraz zbudowano wysokonapięciowy układ laboratoryjny, umożliwiający wykonanie pomiarów trajektorii wyładowań powstałych w wyniku oddziaływania udarów piorunowych i łączeniowych obu biegunowości i o wartościach szczytowych do 4 MV.

Następnie opracowano nową metodę analizy danych pomiarowych, pozwalającą na wyznaczenie trajektorii wyładowania w oparciu o zaproponowaną metodę określania długości segmentów, co pozwoliło na rozwiązanie podnoszonego w literaturze problemu związanego z arbitralnym doбором parametrów wykorzystywanych do analizy wyników pomiarów oraz symulacji.

Kolejnym krokiem było wykonanie badań laboratoryjnych, podczas których dokonano pomiaru 540. wyładowań iskrowych, powstałych w układach kula-kula i kula-płyta i wygenerowanych w wyniku wykorzystania udarów piorunowych i łączeniowych obu biegunowości. Dokonano analizy wyników pomiarów przy wykorzystaniu opracowanych metod wyznaczania oraz opisu trajektorii wyładowania. Wnioski sformułowane na podstawie przeprowadzonych pomiarów zostały porównane z obserwacjami wynikającymi z badań symulacyjnych.

Słowa kluczowe: iskra długa, model fraktalny, trajektoria władowania

Abstract

Measurements and analysis of the long spark trajectory for fractal modeling

This dissertation will cover the simulation, measurement and analysis of long-spark trajectory to explore the potential of using fractal modelling to simulate electrical discharges from impulse voltages.

First, the assumptions of the fractal model were presented and the possibility of its use for the simulation of surface discharge, electrical treeing and lightning discharge was analyzed. Then, a fractal model for long spark was developed and simulations were performed to investigate the trajectory of the development of spark discharges.

Based on the analysis of simulation results, it was confirmed that new laboratory measurements were needed to investigate the characteristics of spark discharge trajectories observed during simulation.

Following the analysis of the literature describing the current measurements results of the long spark trajectory, a high-voltage laboratory system was designed and built, allowing the measurement of the trajectory of discharges caused by lightning and switching impulses with peak values up to 4 MV.

A new method of analysis of measurement data was then developed to determine the discharge trajectory based on the proposed method of determining segment lengths, which resolved the issue raised in literature related to arbitrary parameter selection used for analysis of measurement results and simulations.

The next step was to perform laboratory tests, which measured 540 spark discharges, created in sphere-sphere and sphere-plane electrode systems and generated by lightning and switching impulses of both positive and negative polarity. Measurements were analyzed using the devised methods of determination and description of the discharge trajectory. The conclusions based on the measurements performed were compared to the results of the simulations.

Keywords: long spark, fractal model, discharge trajectory

Spis treści

CZĘŚĆ I WPROWADZENIE.....	9
1. PROBLEMATYKA ROZPRAWY	11
2. TEZA, CEL I ZAKRES ROZPRAWY	13
3. PRZEGLĄD ZAWARTOŚCI ROZPRAWY	17
CZĘŚĆ II MODELOWANIE FRAKTALNE I BADANIA SYMULACYJNE ISKRY DŁUGIEJ	19
4. PRZEGLĄD ZASTOSOWAŃ MODELOWANIA FRAKTALNEGO	21
4.1. Założenia modelu fraktalnego	21
4.2. Zastosowanie modelowania fraktalnego do symulacji wyładowań elektrycznych ...	24
4.2.1. Wyładowania powierzchniowe	24
4.2.2. Wyładowania drzewiaste.....	25
4.2.3. Wyładowania piorunowe.....	26
4.2.4. Iskra długa	28
4.3. Podsumowanie.....	30
5. OPIS TRAJEKTORII ISKRY DŁUGIEJ PRZY UŻYCIU MODELU FRAKTALNEGO	31
5.1. Cel opracowania modelu fraktalnego iskry długiej	31
5.2. Geometria modelu fraktalnego do badania iskry długiej.....	31
5.3. Parametry modelu	33
5.4. Wymiar fraktalny.....	35
5.5. Ocena jakościowa wyników symulacji.....	37
5.6. Podsumowanie.....	41
6. BADANIA SYMULACYJNE TRAJEKTORII ISKRY DŁUGIEJ	43
6.1. Opis opracowanego modelu iskry długiej	43
6.2. Symulacje trajektorii iskry długiej w przestrzeni dwuwymiarowej	46
6.3. Symulacje trajektorii iskry długiej w przestrzeni trójwymiarowej	47
6.3.1. Modelowanie iskry długiej w przestrzeni trójwymiarowej.....	47
6.3.2. Rekonstrukcja przestrzenna kanału wyładowania.....	50

6.4.	Analiza symulacyjna parametrów opisujących trajektorię iskry długiej.....	53
6.4.1.	Średni wymiar fraktalny	53
6.4.2.	Wymiar fraktalny populacji wyładowań	54
6.4.3.	Krętość	56
6.4.4.	Długość segmentu	60
6.5.	Podsumowanie.....	62
CZĘŚĆ III POMIARY LABORATORYJNE ISKRY DŁUGIEJ.....		65
7.	PRZEGLĄD BADAŃ POMIAROWYCH TRAJEKTORII ISKRY DŁUGIEJ	67
7.1.	Wprowadzenie	67
7.2.	Wymiar fraktalny.....	67
7.3.	Krętość kanału wyładowania.....	69
7.4.	Podsumowanie.....	70
8.	BUDOWA I OPIS UKŁADU POMIAROWEGO	73
8.1.	Wprowadzenie	73
8.2.	Układy wytwarzania napięć udarowych.....	74
8.3.	Układy rejestracji trajektorii wyładowań iskrowych.....	81
8.4.	Podsumowanie.....	87
9.	WYZNACZENIE TRAJEKTORII ISKRY DŁUGIEJ METODĄ TRIANGULACYJNĄ	89
9.1.	Wprowadzenie	89
9.2.	Sposoby wyznaczania linii centralnej kanału wyładowania.....	90
9.3.	Analiza działania wybranych metod wyznaczania trajektorii	93
9.4.	Weryfikacja działania metod wyznaczania trajektorii wyładowania	100
9.5.	Wykorzystanie triangulacji w celu podziału kanału wyładowania na segmenty	103
9.6.	Podsumowanie.....	106
10.	BADANIA TRAJEKTORII ISKRY DŁUGIEJ	109
10.1.	Procedura wykonywania pomiarów	109
10.2.	Potencjalny obszar rozwoju wyładowania	113

10.3. Wymiar fraktalny.....	117
10.4. Kąty krętości.....	120
10.5. Długość segmentów.....	125
10.6. Podsumowanie.....	128
CZĘŚĆ IV PODSUMOWANIE	131
11. WNIOSKI	133
12. MOŻLIWOŚCI DALSZYCH BADAŃ.....	137
BIBLIOGRAFIA.....	139

Część I
Wprowadzenie

1. Problematyka rozprawy

Wytrzymałość elektryczna wysokonapięciowych układów izolacyjnych jest jednym z podstawowych zagadnień związanych z projektowaniem elementów systemu elektroenergetycznego. Intensywny rozwój linii EHV (ang. *Extra High Voltage*) i UHV (ang. *Ultra High Voltage*), który jest obserwowany na przestrzeni ostatnich lat spowodował, że problematyka właściwej koordynacji izolacji stała się szczególnie istotna [1]. Wytrzymałość elektryczna powietrznych przerw izolacyjnych jest powiązana z mechanizmem rozwoju iskry długiej [2]. W badaniach rozwoju wyładowań elektrycznych wykorzystywane są modele symulacyjne budowane między innymi w oparciu o dane uzyskiwane z pomiarów laboratoryjnych.

Badania prowadzone pod kątem ochrony odgromowej wykazały wysoką skuteczność modelowania i symulacji, zwracając jednocześnie uwagę na potrzebę tworzenia nowych modeli numerycznych, tak by były one dostosowane do zwiększających się napięć znamionowych i wynikających z tego faktu zmian konstrukcyjnych linii wysokich napięć [3, 4].

Jednym z modeli opisujących mechanizm rozwoju wyładowań elektrycznych jest model fraktalny, należący do grupy tzw. modeli stochastycznych, uwzględniający fakt, że mechanizm rozwoju wyładowań elektrycznych nie jest w pełni deterministyczny. Poza takimi czynnikami jak rozkład pola elektrycznego, ładunki przestrzenne czy warunki atmosferyczne, istnieje jeszcze szereg innych zjawisk natury losowej, mających wpływ na to, w jaki sposób tworzy się wyładowanie. W efekcie trajektorie, wzdłuż których rozwija się kanał wyładowania, typowo tworzą kręte i skomplikowane struktury geometryczne o nieregularnym kształcie. Zjawisko to było od lat wielokrotnie opisywane w literaturze, czego przykładem są badania opublikowane już w latach 70 XX w. przez międzynarodowy zespół nazywany grupą Les Renardieres [5-7]. Powstanie modeli stochastycznych umożliwiło wprowadzenie czynników losowych do badań symulacyjnych rozwoju wyładowania iskrowego, rozszerzając w ten sposób możliwości klasycznych modeli, takich jak przykładowo model LPM (ang. *Leader Progression Model*) [8, 9].

Badania trajektorii rozwoju wyładowań elektrycznych, w szczególności iskiei długich, nie ograniczają się do symulacji komputerowych. Istotną rolę odgrywają pomiary laboratoryjne, które pozwalają zarówno na walidację działania powstałych modeli, jak i dostarczają niezbędnych danych do ich tworzenia. W kontekście modeli stochastycznych, szczególnie istotne są pomiary parametrów opisujących geometryczną strukturę kanału wyładowania, takich jak krętość i wymiar fraktalny.

2. Teza, cel i zakres rozprawy

Intensywny rozwój linii EHV i UHV sprawił, że znaczenie tych linii w procesie przesyłu energii jest coraz większe. Ze względu na swoją konstrukcję oraz wartości napięć znamionowych, a także ze względu na obniżony poziom koordynacji izolacji w liniach wysokich i najwyższych napięć, linie te są szczególnie narażone na zjawiska przebieciowe. Tym samym problem ochrony przed wyładowaniami wewnątrz układów izolacyjnych linii napowietrznych jest szczególnie istotny. Aby zwiększyć skuteczność metod koordynacji izolacji stosuje się modele symulacyjne umożliwiające badanie różnych rodzajów wyładowań.

Dlatego autor postawił następujące **tezy** niniejszej rozprawy:

Teza 1: Istnieją układy i warunki wyładowań, w których stosowany obecnie w modelowaniu fraktalnym sposób klasyfikacji wyładowań elektrycznych bazujący na wartości wymiaru fraktalnego pojedynczych wyładowań, nie pozwala na zobrazowanie różnic w trajektorii rozwoju iskier długich pod względem biegunowości oraz rodzaju napięcia będącego ich źródłem. Zastosowanie w tych układach dodatkowych parametrów, takich jak krętość kanału wyładowania oraz wymiar fraktalny populacji wyładowań, pozwala w sposób ilościowy zobrazować różnice pomiędzy trajektoriami różnych rodzajów wyładowań iskrowych.

Teza 2: Opis trajektorii rozwoju iskry długiej przy użyciu innych parametrów, niż stosowane dotychczas (wymiar fraktalny pojedynczej iskry lub kąty krętości), takich jak wymiar fraktalny populacji, potencjalna strefa rozwoju wyładowania, oraz rozkład długości segmentów wyładowania, umożliwia rozwój modelu fraktalnego i jego walidację poprzez analizę różnic między trajektoriami wyładowań piorunowych i łączeniowych o różnych biegunowościach i w różnych układach elektrod.

Teza 3: Możliwy jest podział kanału wyładowania na segmenty, oddający naturalny sposób zmian kierunku trajektorii rozwoju iskry długiej.

Dla udowodnienia powyższych tez, postawiony został następujący **cel pracy**:

Wykonanie wszechstronnych badań parametrów trajektorii iskier długich uzyskanych zarówno w wyniku modelowania, jak i pomiarów laboratoryjnych.

Aby zrealizować przedstawiony cel, zostały zrealizowane następujące zadania, określające zakres pracy:

1. *Opracowanie modelu symulacyjnego w oparciu o założenia metody fraktalnej, dostosowanego do badania iskry długiej.*
2. *Wykonanie badań symulacyjnych iskry długiej dla różnych parametrów opisujących model symulacyjny.*
3. *Wyznaczenie parametrów opisujących trajektorię iskry długiej uzyskanej na podstawie symulacji.*
4. *Opracowanie metody wyznaczania trajektorii iskry długiej na podstawie pomiarów laboratoryjnych.*
5. *Wykonanie pomiarów trajektorii iskry długiej w układach laboratoryjnych kula-kula oraz kula-płyta dla udarów piorunowych i łączeniowych obu biegunowości.*
6. *Wykonanie analizy trajektorii zarejestrowanych wyładowań, z wykorzystaniem takich wielkości jak średni wymiar fraktalny, wymiar fraktalny populacji wyładowań, krętość kanału wyładowania, potencjalny obszar rozwoju wyładowania oraz długość segmentów na jakie podzielono kanał wyładowania.*

Przedstawione w niniejszej rozprawie badania były częściowo finansowane ze środków dotacji statutowej Instytutu Energetyki – Instytut Badawczy, praca nr. EWN/91/STAT/19. Niektóre wyniki badań, na których oparto niniejszą rozprawę, zostały zaprezentowane w trzech artykułach opublikowanych w latach 2021-2022 w recenzowanych czasopismach [10-12]:

1. M. Molas; M. Szewczyk, „Experimental Evaluation of 3D Tortuosity of Long Laboratory Spark Trajectory for Sphere-Sphere and Sphere-Plane Discharges under Lightning and Switching Impulse Voltages,” *Energies* 2021, 14, 7409. Wydawca: MDPI, DOI: <https://doi.org/10.3390/en14217409>;
2. M. Molas, M. Szewczyk, „Przegląd aktualnych kierunków badań w zakresie zastosowań modelu fraktalnego w symulacjach wyładowań elektrycznych,” *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 98 NR 10/2022, pp. 275-279. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2022.10.62>;
3. M. Molas, M. Szewczyk, "Pomiary trajektorii iskry długiej w przestrzeni trójwymiarowej," *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 98 NR 10/2022, pp. 181-184. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2022.10.39>.

Autor niniejszej rozprawy zaprezentował jej częściowe wyniki w ramach XV. Ogólnopolskiego Sympozjum „Inżynieria Wysokich Napięć” w Poznaniu-Będlewie (w dn. 18-20 maja 2022), gdzie referat ten został wyróżniony Dyplomem za zajęcie I miejsca w ramach sesji młodych

doktorantów. Kolejny artykuł, opracowany na podstawie częściowych badań zaprezentowanych w niniejszej rozprawie, został zgłoszony do czasopisma, w którym jest aktualnie recenzowany.

Przy wykonywaniu badań opisanych w niniejszej rozprawie, autor wykorzystał również swoje doświadczenie w zakresie zaawansowanych technik probierczo-pomiarowych i budowy układów wysokonapięciowych, nabyte w ramach wieloletniej pracy w laboratorium wysokonapięciowym Instytutu Energetyki – Instytut Badawczy w Warszawie.

3. Przegląd zawartości rozprawy

Niniejsza rozprawa została podzielona na cztery części.

Część I zawiera opis problematyki rozprawy, prezentujący odniesienie badań symulacyjnych oraz pomiarowych trajektorii wyładowań iskrowych w kontekście metod koordynacji izolacji napowietrznych układów izolacyjnych. W tej części przedstawiono również tezę oraz cel pracy, a także wymieniono najważniejsze zadania definiujące zakres pracy.

Część II została poświęcona badaniom symulacyjnym iskry długiej wykonywanym przy wykorzystaniu modelu fraktalnego. Na początku przedstawiono założenia modelowania fraktalnego, opisując sposób tworzenia modelu oraz wielkości z nim związane. Następnie zaprezentowano opisywane w literaturze możliwości zastosowania modelu fraktalnego do symulacji różnego rodzaju wyładowań (powierzchniowych, drzewiastych, piorunowych oraz iskrowych). W kolejnych krokach przedstawiono wykonane przez autora badania symulacyjne, mające na celu wyznaczanie trajektorii wyładowania iskry długiej. Na podstawie wykonanych symulacji zauważono możliwość modyfikacji modelu fraktalnego wykorzystywanego w literaturze przedmiotu, pozwalającą na wyznaczanie trajektorii wyładowania dla isker będących następstwem różnego rodzaju napięć udarowych. Ostatni rozdział tej części rozprawy poświęcony został symulacjom wyładowań przy wykorzystaniu modelu fraktalnego zaproponowanego przez autora. W rozdziale tym omówiono metody symulacji wyładowań iskrowych w przestrzeni trójwymiarowej. Omówiono również sposób opisu iskry długiej przy użyciu parametrów, które są obecnie stosowane do ilościowego opisu trajektorii wyładowania, a także zaprezentowano analizę wyników symulacji, których interpretacja wymaga wykonania nowych pomiarów laboratoryjnych.

Część III dotyczy pomiarów laboratoryjnych trajektorii iskry długiej. Na wstępie przedstawiono przegląd wyników aktualnych badań z zakresu pomiarów trajektorii wyładowań iskrowych, jakie są obecnie dostępne w literaturze. Następnie zaprezentowano opis zbudowanego przez autora układu pomiarowego składającego się z układu służącego wytwarzaniu napięć udarowych, będących źródłem wyładowań iskrowych oraz układu umożliwiającego rejestrację trajektorii wyładowań. W kolejnym rozdziale zaprezentowano opracowaną przez autora metodę wyznaczania trajektorii wyładowania, opartą na triangulacji wielokąta tworzonego przez granice kanału wyładowania. W ostatnim rozdziale zaprezentowano analizę wyników pomiarów wielkości opisujących trajektorię iskry długiej. Na koniec wnioski płynące z analizy

wyników pomiarów zostały zestawione z wnioskami, jakie sformułowano w Części II na podstawie wykonanych badań symulacyjnych.

Część IV stanowi podsumowanie rozprawy, gdzie przedstawiono główne wnioski sformułowane na podstawie przeprowadzonych badań, a także zaprezentowano możliwości dalszych prac bazujących na wynikach uzyskanych w ramach badań związanych z opracowaniem niniejszej rozprawy.

Część II

Modelowanie fraktalne

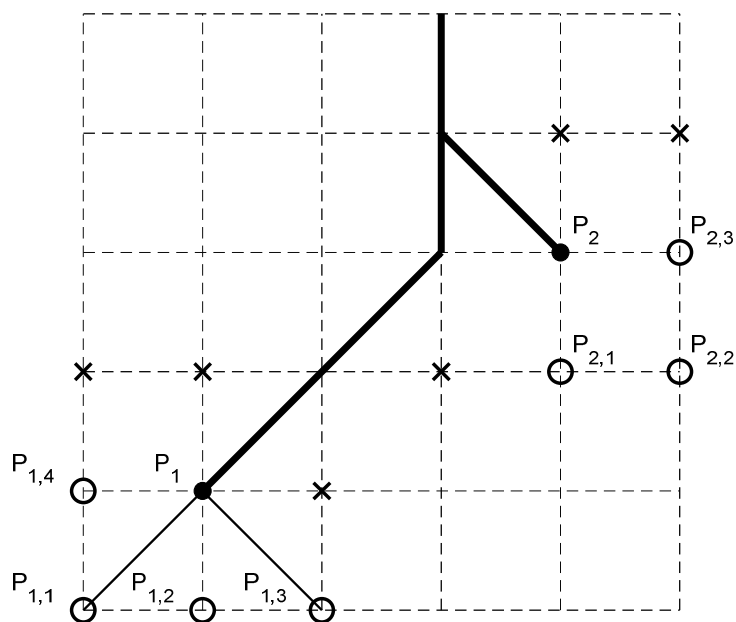
i badania symulacyjne iskry długiej

4. Przegląd zastosowań modelowania fraktalnego

4.1. Założenia modelu fraktalnego

Model fraktalny umożliwia badania symulacyjne wyładowań elektrycznych przy jednoczesnym uwzględnieniu zarówno zjawisk deterministycznych, jak i czynników losowych. Założenia modelu fraktalnego zostały opublikowane w 1984 roku [13], kiedy po raz pierwszy przedstawiono wyniki symulacji wyładowań powierzchniowych, uzyskane dzięki wykorzystaniu tzw. modelu DBM (ang. *Dielectric Breakdown Model*) i od tego czasu model metoda ta znalazła zastosowanie w szeregu prac, przekładowo [14-17].

Zgodnie z zaproponowaną metodą bazującą na modelu fraktalnym przyjmuje się, że kanał wyładowania składa się z wzajemnie połączonych ze sobą prostoliniowych segmentów. Na Rys. 4.1 przedstawiono ilustrację mechanizmu rozwoju wyładowania zgodnie z zasadami metody fraktalnej. Punkty P_1 i P_2 oznaczają węzły należące do kanału wyładowania, wokół których występują obszary przestrzeni, gdzie wartość pola elektrycznego jest na tyle duża, by mogło dojść do dalszego rozwoju wyładowania.



$$p(P_i \rightarrow P_{i,j}) = \begin{cases} \frac{(E_{P_i P_{i,j}})^\eta}{\sum_{j=1}^{M_i} (E_{P_i P_{i,j}})^\eta}, & \text{jeżeli } E_{P_i P_{i,j}} \geq E_{cr}, \\ 0, & \text{jeżeli } E_{P_i P_{i,j}} < E_{cr} \end{cases} \quad (4.1)$$

gdzie: $E_{P_i P_{i,j}}$ jest natężeniem pola elektrycznego pomiędzy punktem P_i należącym do kanału wyładowania, a punktami $P_{i,j}$ znajdującymi się w jego najbliższym otoczeniu i wyznaczającymi potencjalny kierunek rozwoju wyładowania. Całkowita liczba potencjalnych kierunków wyładowania $P_{i,j}$ dla danego węzła P_i opisana jest liczbą M_i . E_{cr} określa krytyczną wartość natężenia pola elektrycznego warunkującego rozwój wyładowania. Współczynnik η nazywany jest wskaźnikiem prawdopodobieństwa rozwoju wyładowania (ang. *developing probability index*). Funkcja $p(P_i \rightarrow P_{i,j})$ może przybierać różne formy, w zależności od rodzaju badanego wyładowania lub w zależności od przyjętego sposobu wykonywania obliczeń [18-19].

Najistotniejszym elementem powyższego równania jest współczynnik potęgowy η , który określa związek między lokalną wartością natężenia pola elektrycznego $E_{P_i P_{i,j}}$ oraz prawdopodobieństwem rozwoju wyładowania $p(P_i \rightarrow P_{i,j})$. Zwiększanie wartości współczynnika η powoduje zmniejszenie wpływu zjawisk losowych, przez co sposób rozwoju wyładowania jest w większym stopniu uzależniony od rozkładu pola elektrycznego. Dodatkowym efektem zwiększania współczynnika η jest ograniczenie liczby oraz rozmiaru gałęzi, powstających w otoczeniu głównego kanału wyładowania oraz zmniejszenie krętości trajektorii, wzdłuż której następuje jego rozwój.

Natężenie pola elektrycznego $E_{P_i P_{i,j}}$ znajdujące się w liczniku równania (4.1) odpowiada wartości natężenia pola, jaka występuje pomiędzy punktem P_i (●) (zob. Rys. 4.1) należącym do kanału wyładowania, a jednym z punktów $P_{i,j}$ (○) określających potencjalne kierunki rozwoju wyładowania. Przyjmuje się, że dany punkt $P_{i,j}$ może być uznany jako punkt określający potencjalny kierunek rozwoju wyładowania, wtedy gdy spełniony jest warunek $E_{P_i P_{i,j}} \geq E_{cr}$, gdzie E_{cr} jest minimalnym, krytycznym natężeniem pola elektrycznego niezbędnym do inicjacji wyładowania, a $E_{P_i P_{i,j}}$ wyznaczone jest na podstawie zależności:

$$E_{P_i P_{i,j}} = \left| \frac{V_i - V_{i,j}}{D_{i,j}} \right|, \quad (4.2)$$

w której V_i i V_{ij} są wartościami potencjału elektrycznego w odpowiednio w punktach P_i i P_{ij} a D_{ij} jest odległością między tymi punktami.

Operacja dzielenia przez sumę znajdującą się w mianowniku równania (4.1) służy normalizacji funkcji $p(P_i \rightarrow P_{i,j})$ poprzez odniesie wartości natężenia pola w rozpatrywanym punkcie P_{ij} do sumy natężeń pól elektrycznych $\sum_{j=1}^{M_i} (E_{P_i P_{i,j}})^n$ we wszystkich punktach określających potencjalny kierunek rozwoju wyładowania.

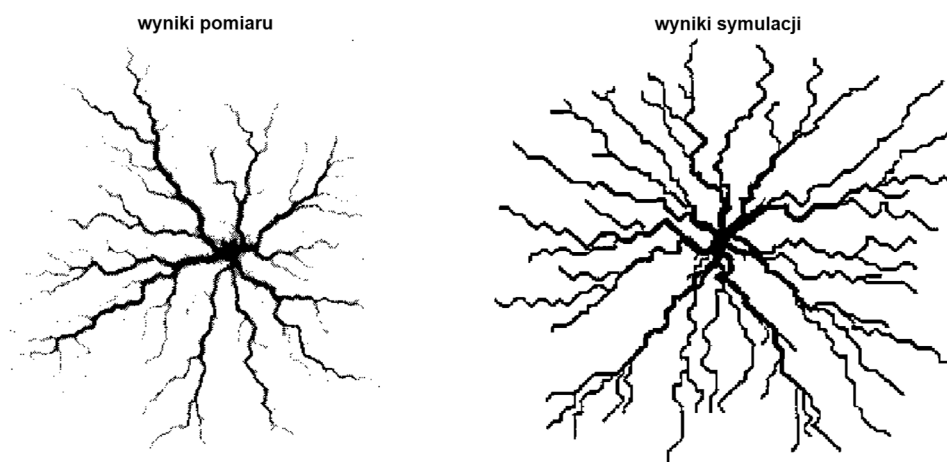
Zgodnie z założeniami metody fraktalnej obliczenia wykonywane są w sposób iteracyjny. Na przykładzie sytuacji przedstawionej na Rys. 4.1 proces wygląda następująco. W pierwszym kroku wyznaczany jest rozkład potencjału w przestrzeni otaczającej kanał wyładowania (w trakcie wykonywania obliczeń przyjmuje się, że poszczególne segmenty kanału wyładowania posiadają stały potencjał elektryczny). Następnie na podstawie zależności (4.2) obliczane są wartości natężenia pola elektrycznego dla wszystkich punktów znajdujących się w najbliższym otoczeniu punktów węzłowych P_1 oraz P_2 . Obliczone wartości pola $E_{P_i P_{ij}}$ porównywane są z przyjętą wartością krytyczną E_{cr} , a punkty, dla których spełniona jest zależność $E_{P_i P_{ij}} \geq E_{cr}$, stają się potencjalnymi kierunkami rozwoju wyładowania (w rozpatrywanym przypadku dla punktów P_1 i P_2 istnieją, odpowiednio, 4 i 3 możliwe kierunki rozwoju wyładowania). Kolejnym krokiem jest obliczenie wartości funkcji $p(P_i \rightarrow P_{i,j})$ dla wszystkich potencjalnych kierunków P_{1j} i P_{2j} . Następnie, w sposób losowy wybierana jest pewna liczba r z zakresu od 0 do 1. Wartości funkcji $p(P_i \rightarrow P_{i,j})$ w punktach P_{ij} porównywane są z liczbą r i jeżeli spełniony zostaje warunek $p(P_i \rightarrow P_{i,j}) > r$ to dany punkt P_{ij} zamienia się w nowy punkt węzłowy, a odcinek łączący punkty P_i i P_{ij} staje się kolejnym segmentem kanału wyładowania. W rozpatrywanym przypadku dla węzła P_2 , funkcja $p(P_i \rightarrow P_{i,j})$ w żadnym z potencjalnych kierunków rozwoju wyładowania nie przyjmuje wartości większej od r , dlatego rozwój kanału wyładowania zostaje zatrzymany. W przypadku punktu P_1 dla dwóch kierunków $P_{1,1}$ oraz $P_{1,3}$ spełniony jest warunek $p(P_i \rightarrow P_{i,j}) > r$, co oznacza rozgałęzienie kanału wyładowania i jednoczesny jego rozwój w dwóch nowych kierunkach. Po przyłączeniu nowych segmentów następuje ponowne obliczenie rozkładu potencjału wokół kanału, a powyższa procedura jest powtarzana dla nowych punktów węzłowych.

4.2. Zastosowanie modelowania fraktalnego do symulacji wyładowań elektrycznych

4.2.1. Wyładowania powierzchniowe

Poza wyżej opisanymi składnikami funkcji prawdopodobieństwa rozwoju wyładowania $p(P_i \rightarrow P_{i,j})$, istnieją jeszcze inne czynniki fizyczne, mające wpływ na wynik symulacji. W zależności od badanego zjawiska, często uwzględniane są również takie czynniki jak spadek napięcia wzdłuż kanału wyładowania [20-21], rozptył prądu w gałęziach lub rozkład ładunku przestrzennego [18], wielkość siatki i długość skoku lidera [22]. Dobór parametrów modelu jest zatem uzależniony od tego, jakie wyładowanie jest przedmiotem badań, przy czym obecnie wyróżnia się cztery podstawowe rodzaje wyładowań, do których opisu stosuje się model fraktalny: wyładowania powierzchniowe, wyładowania drzewiaste, wyładowania piorunowe oraz wyładowania iskrowe.

W przypadku wyładowań powierzchniowych, początkowo była stosowana najprostsza odmiana modelu fraktalnego czyli tzw. *model DBM* [13] oraz jego bardziej rozbudowana wersja [14] uwzględniająca dodatkowo krytyczne natężenie pola elektrycznego E_{cr} , jako warunek propagacji wyładowania. W obu pracach, [13] i [14], przedmiotem badań były Figury Lichtenberga, uzyskane w warunkach laboratoryjnych. Badane wyładowania zostały wytworzone na powierzchni szklanej płytki o grubości 2 mm, umieszczonej w atmosferze gazu SF₆. Źródłem wyładowań było napięcie impulsowe o wartości od 21 do 30 kV, doprowadzone do prostopadłej elektrody prętowej umieszczonej centralnie nad badaną powierzchnią. Uzyskane w ten sposób wyładowania nie przekraczały długości kilku milimetrów i posiadały silnie rozgałęzioną strukturę. Mimo zastosowania uproszczonej wersji modelu, w obu przypadkach uzyskano bardzo dobrą zgodność pomiędzy wynikami badań symulacyjnych oraz pomiarowych Rys. 4.1



Rys. 4.2 Porównanie wyników pomiarów oraz symulacji wyładowań powierzchniowych [13-14]

Wyniki badań symulacyjnych i pomiarowych porównywano wykorzystując w tym celu wymiar fraktalny [23] wyznaczony metodą pudełkową, który dla analizowanego układu wynosił 1,75. Szerszy zakres badań, w kontekście poziomu złożoności modelu, przedstawiono w pracy [24], gdzie badano zjawisko przeskoku na powierzchni okrągłej próbki wykonanej z polietylenu, otoczonej uziemionym pierścieniem. Istotną zmianą, jaka została wprowadzona w pracy [24] w stosunku do modeli opisanych w [13, 14], było uwzględnienie spadku napięcia wzdłuż kanału wyładowania, który obliczono na podstawie wzoru:

$$V_{L'} = V_L - s \cdot E_{ch}, \quad (4.3)$$

gdzie: gdzie $V_{L'}$ i V_L są potencjałem, odpowiednio, poprzedniego oraz następnego węzła, s jest odległością pomiędzy węzłami, a E_{ch} jest gradientem napięcia. Wykonane obliczenia pokazały, że model fraktalny może być zastosowany nie tylko do określania trajektorii wyładowania, ale również daje możliwość badania wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych. Różnica między 50-procentowym napięciem przeskoku wyznaczonym na podstawie symulacji oraz badań laboratoryjnych, nie przekraczała 0,4%.

Istotną kwestią związaną z badaniami wyładowań powierzchniowych jest liczba wymiarów przestrzeni brana pod uwagę w trakcie symulacji. Najczęściej obliczenia wykonywane są dwóch wymiarach, przyjmując założenie, że składowa pola elektrycznego prostopadła do badanej powierzchni ma pomijalny wpływ na rozwój wyładowania. Przyjęcie takiego założenia znacznie upraszcza obliczenia i tym samym redukuje czas niezbędny na wykonanie symulacji. Jednakże w kontekście badań trajektorii wyładowań powierzchniowych, istnieją przesłanki sugerujące, że uwzględnienie trzeciego wymiaru przestrzennego pozwala na dokładniejsze odwzorowanie kształtu kanału wyładowania [14].

4.2.2. Wyładowania drzewiaste

Zagadnienie liczby wymiarów jest o wiele bardziej istotne w przypadku badań wyładowań drzewiastych, prowadzonych na potrzeby analizy procesów starzeniowych, zachodzących najczęściej wewnątrz polimerowych materiałów izolacyjnych [15, 25-29]. W tego typu środowisku, kierunek rozwoju wyładowania jest dużo mniej równomierny niż w przypadku wyładowań powierzchniowych, a sposób formowania kanału wyładowania jest bardziej skomplikowany. Wynika to głównie z właściwości środowiska, jakim jest izolacja stała, która w odróżnieniu od izolacji gazowej, cechuje się zwykle mniejszą jednorodnością. Problem ten był przedmiotem dyskusji opisanej w [15], gdzie wykazano, że metody stochastyczne, dzięki iteracyjnemu podejściu do wykonywania obliczeń, umożliwiają np. losowe wprowadzenie do siatki

obliczeniowej obszarów o zmiennej przenikalności elektrycznej, odwzorowując tym samym niejednorodną strukturę materiału izolacyjnego. Inną zaletą podejścia iteracyjnego jest również możliwość wyznaczenia czasu potrzebnego do całkowitej degradacji materiału izolacyjnego (tzw. czasu do przebicia) [28]. W tym przypadku konieczne jest jednak wprowadzenie do modelu fraktalnego elementów modeli deterministycznych, takich jak np. model DAM (ang. *Discharge-Avalanche Model*) [30]. Dzięki takiemu podejściu, podczas poszczególnych iteracji zmianom ulega nie tylko geometryczna struktura kanału wyładowania, ale również takie czynniki jak współczynniki jonizacji, czas rozwoju segmentów kanału wyładowania czy też średni wzrost energii elektronów tworzących lawinę.

Podobnie jak w przypadku omówionych powyżej wyładowań powierzchniowych, wyniki symulacji wyładowań drzewiastych są analizowane głównie przy wykorzystaniu wymiaru fraktalnego wyznaczanego metodą pudełkową. Wykonywanie badań w przestrzeni trójwymiarowej pozwala na przeprowadzenie rozszerzonej analizy wyników, umożliwiając obliczenie wymiaru fraktalnego zarówno obiektu przestrzennego, jakim jest wyładowanie, jak i obiektu dwuwymiarowego uzyskanego poprzez rzutowanie obrazu wyładowania na dowolnie wybraną płaszczyznę odniesienia [25]. Inna metoda analizy opiera się na wprowadzeniu pojęcia tzw. sub-fraktala, którym jest wyodrębniony fragment całej struktury wyładowania [26]. Kryteria oraz sposób wydzielenia sub-fraktali są uzależnione od parametrów oraz cech, które są najbardziej istotne w danym badaniu (np. główny kanał wyładowania podczas analizy zjawiska całkowitego przebicia izolacji). Mnogość sposobów wykonywania obliczeń oraz analizy ich wyników sprawiły, że modelowanie fraktalne wyładowań drzewiastych znajduje zastosowanie do oceny ryzyka uszkodzeń rzeczywistych elementów infrastruktury elektroenergetycznej, takich jak przykładowo kable wysokich napięć [29].

4.2.3. Wyładowania piorunowe

Zagadnienie oceny ryzyka awarii systemów przesyłu energii, powstałych wskutek przeskoków na elementach izolacyjnych jest związane z analizą oddziaływania wyładowań atmosferycznych na elementy infrastruktury przesyłowej. Z tego względu, to właśnie wyładowaniom piorunowym poświęconych jest najwięcej badań wykorzystujących modelowanie fraktalne. Prowadzone badania skupiają się przede wszystkim na takich obiektach jak linie napowietrzne [21-33], stacje elektroenergetyczne [22, 36-38] czy też turbiny wiatrowe [39-40]. Należy jednak zaznaczyć, że modelowanie fraktalne wyładowań piorunowych nie ogranicza się jedynie do obiektów ściśle związanych z systemami przesyłu energii. Model ten jest na tyle uniwersalny,

że wykorzystany jest też w ochronie odgromowej budynków mieszkalnych [41] lub masztów antenowych [18], a nawet w badaniach podstawowych, umożliwiając badanie właściwości takich zjawisk, jak wyładowania między-chmurowe [42] lub wyładowania zachodzące w górnych warstwach atmosfery (ang. *blue jets*) [43].

Tak szeroki zakres zastosowań w kontekście tylko jednego rodzaju zjawiska, jakim jest wyładowanie piorunowe, doprowadził do powstania szeregu modyfikacji podstawowej wersji modelu przedstawionej w [14, 16] i omówionej w Rozdziale 4.1 niniejszej rozprawy. Niezależnie od badanego zjawiska, elementem stałym jest iteracyjna idea wykonywania obliczeń, opierająca się na wyznaczaniu kierunku rozwoju wyładowania w oparciu o wartość funkcji $p(P_i \rightarrow P_{i,j})$. Zmianom natomiast ulegają wartości oraz sposób określania parametrów modelu.

Wartość współczynnika potęgowego η jest najczęściej określana w oparciu o wyniki pomiarów [16, 44], przyjmując założenie, że wymiar fraktalny wyładowania będącego wynikiem symulacji, powinien być jak najbardziej zbliżony do wymiaru fraktalnego rzeczywistych wyładowań atmosferycznych [22, 31-32, 34, 37, 45-46]. Parametr η może być również wyznaczony w oparciu o wizualną ocenę poziomu rozgałęzienia kanału oraz krętości kanału wyładowania [36]. Istnieje również podejście zakładające, że wartość wykładnika η nie jest stała. Przyjmuje się wtedy zastosowanie innych wartości dla głównego kanału wyładowania oraz innych dla dołączonych do głównego kanału wyładowania rozgałęzień [47].

Niemniej zróżnicowany jest również sposób określania krytycznego natężenia pola elektrycznego E_{cr} , gdzie wyróżnia się dwie główne metody. Najczęściej zakładana jest stała wartość wynosząca 0,5 kV/cm lub 1,0 kV/cm, odpowiednio dla biegunowości dodatniej [31, 36, 38-39, 44-45] oraz ujemnej [31, 38, 44-45]. Druga metoda zakłada, że krytyczne natężenie pola uzależnione jest od wysokości na jakiej znajduje czoło lidera [18, 22, 32, 34, 46, 48-49], a jego wartość można obliczyć na podstawie zależności:

$$E_{cr}(h) = E_{cr0} \cdot \exp(-h/u), \quad (4.4)$$

gdzie: E_{cr0} to krytyczna wartość natężenia pola na poziomie gruntu, h to wysokość na poziomie morza, a u to współczynnik zależny od biegunowości, który najczęściej przyjmuje wartości 5, 7,5 lub 10 [28, 32, 34, 46].

Podobnie jak miało to miejsce w przypadku wyładowań powierzchniowych, podczas modelowania kanału wyładowania piorunowego zakłada się, że kanał wyładowania może być albo idealnym przewodnikiem, czego efektem jest stały potencjał elektryczny na całej długości

kanalu, lub też dopuszcza się występowanie pewnego spadku napięcia, który uzależniony jest od długości kanału wyładowania i może być obliczony na podstawie wzoru (4.3). Przyjmuje się, że dla wyładowań piorunowych spadek ten wynosi maksymalnie 10 kV/m [47]. Jednakże w odróżnieniu od innych rodzajów wyładowań, przy badaniu zjawisk piorunowych istotną rolę odgrywa prąd wyładowania i to na jego podstawie często dokonuje się klasyfikacji wyładowań pod kątem ochrony odgromowej. Z tego też względu wyznaczenie potencjału kanału wyładowania jest niekiedy określane na podstawie rozkładu ładunku elektrycznego, wynikającego z rozprzysięgu prądu pioruna. Wartości prądów wyładowania wyznacza się najczęściej na podstawie tych samych kryteriów, co przy analizie skuteczności środków ochrony odgromowej wg modelu EGM (ang. *Electro-Geometric Model*) [50] oraz geometrii kanału wyładowania.

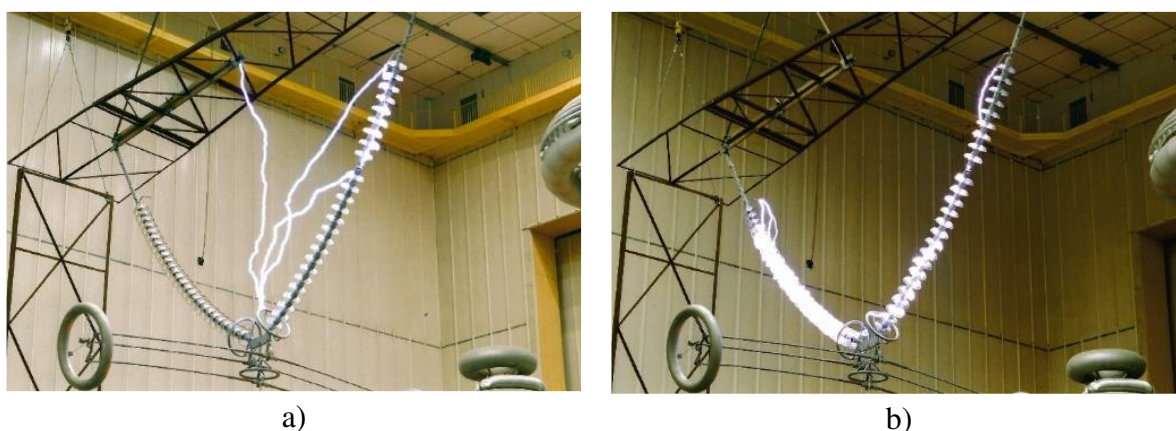
Przedstawione powyżej prace stanowią przesłankę, wskazującą na możliwość wykorzystania modelu fraktalnego w celu uzyskania znacznie bogatszych informacji dotyczących skuteczności metod ochrony odgromowej, niż ma to miejsce w przypadku najczęściej stosowanych modeli deterministycznych, jak np. LPM [18]. Dzięki modelowaniu fraktalnemu, poza wyznaczaniem standardowych współczynników określających skuteczność ekranowania chronionych obiektów [18, 34], można również oszacować prawdopodobieństwo tego, z jaką dokładnością zostały one określone.

4.2.4. Iskra długa

Możliwość uzyskania danych opisujących prawdopodobieństwo wystąpienia wyładowań elektrycznych ma bardzo duże znaczenie w kontekście badań wyładowań iskrowych. Jedną z podstawowych technik badawczych stosowanych w laboratoriach podczas badań wytrzymałości elektrycznej powietrznych układów izolacyjnych, jest określenie 50-procentowego napięcia przeskoku [51]. Parametr ten, oraz jego pochodne, takie jak np. napięcie wytrzymywane (10-procentowe napięcie przeskoku), jest podstawą oceny wyników badań danego obiektu i ma tym samym kluczowe znaczenie nie tylko w technice probierczej ale, również jako czynnik decydujący o bezpieczeństwie użytkowania elementów systemu elektroenergetycznego. Wyniki badań przedstawione w [52] pokazują, że model fraktalny daje możliwość wyznaczenia napięcia przeskoku. Na podstawie badań wykonanych w układzie ostrze-płyta o długości przerwy izolacyjnej wynoszącej 0,75 m, poddanemu oddziaływaniu uderów piorunowych o biegunowości dodatniej, w pracy [52] wyznaczono trzy wartości 50-procentowego napięcia przeskoku. Dwie z tych wartości wyznaczono symulacyjnie i wynosiły one 395,2 kV oraz 395,7 kV, odpowiednio, dla układu dwuwymiarowych (2D) i trójwymiarowych (3D). Trzecią wartość, wynoszącą

395,9 kV, określono na podstawie pomiarów stosując standardowe techniki pomiarowe opisane w normie IEC 60060-1 [51]. Wysoka zbieżność wyników badań symulacyjnych oraz pomiarowych jednoznacznie wskazuje na możliwość wykorzystania modelu fraktalnego do badania zjawisk iskrowych.

Doświadczenia autora niniejszej rozprawy wynikające z badań laboratoryjnych przeprowadzanych na przestrzeni lat pokazują jednak, że sama wartość napięcia przeskoku nie jest wystarczająca do prawidłowej oceny wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego. Poza napięciem przeskoku bardzo ważny jest sposób oraz kierunek rozwoju wyładowania, a ten w dużym stopniu zależy zarówno od biegunowości, jak i od rodzaju przepięcia (Fot. 4.1).



Fot. 4.1 Wyładowania zarejestrowane w trakcie badań laboratoryjnych łańcuchów izolatorowych 400 kV:
a) udar łączeniowy o biegunowości dodatniej, b) udar łączeniowy o biegunowości ujemnej

Wyznaczenie trajektorii wyładowania umożliwia bowiem ocenę skuteczności zastosowanych metod koordynacji izolacji. Jak pokazano na Fot. 4.1 a, istnieje ryzyko, że sposób zaprojektowania układu izolacyjnego, pomimo zapewnienia wymaganej wytrzymałości elektrycznej, nie zapewnia ochrony przed wystąpieniem niedopuszczalnych wyładowań do konstrukcji wsporczej linii, co w efekcie może grozić nawet zerwaniem łańcucha izolatorowego. Problem nieprzewidywalności kierunku rozwoju wyładowań iskrowych, zwłaszcza tych będących następstwem udarów łączeniowych, nie jest nowy i był już przedmiotem badań [53-58]. Wydaje się zatem, że model fraktalny jest idealnym narzędziem do badania tego zjawiska. Wpierw konieczne jest jednak sprawdzenie możliwości symulowania iskier długich z uwzględnieniem ich biegunowości oraz rodzaju wyładowania, a także ocena tego, czy zaproponowany model może być stosowany do badania przerw iskrowych o długości odpowiadającej tym, jakie występują w rzeczywistych układach napowietrznych EHV i UHV.

4.3. Podsumowanie

Model fraktalny jest narzędziem pozwalającym na badanie zjawisk związanych z wyładowaniami elektrycznymi. W szczególności, był on wykorzystywany do analizy propagacji wyładowań powierzchniowych, oceny procesów starzeniowych izolacji stałej a także analizy skuteczności środków ochrony odgromowej. Na podstawie wyników badań opublikowanych w literaturze można stwierdzić, że model fraktalny pozwala na:

1. Wyznaczenie wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego;
2. Wyznaczenie trajektorii rozwoju wyładowania;
3. Określenie prawdopodobieństwa wystąpienia wyładowania;
4. Wyznaczenie rozkładu przestrzennego punktów należących do złożonych układów izolacyjnych, narażonych na bezpośrednie wyładowanie elektryczne.

Dodatkowo, dzięki wynikom badań opisanym w pracy [52] pokazano, że model fraktalny może również znaleźć zastosowanie w symulacjach wyładowań iskrowych. Zdolność przewidywania trajektorii iskry długiej może w znacznym stopniu wzbogacić metody obliczeniowe, jakie są obecnie stosowane w koordynacji izolacji napowietrznych wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Dane uzyskane dzięki symulacjom pozwalają nie tylko na ocenę poziomu wytrzymałości elektrycznej, ale również mogą zwiększyć możliwości w zakresie oceny ryzyka występowania niepożądanych wyładowań w złożonych układach izolacyjnych.

W dalszych krokach zostaną przedstawione wyniki badań symulacyjnych, których celem jest sprawdzenie możliwości zastosowania modelu fraktalnego do analizy wyładowań iskrowych, jakie mogą mieć miejsce w układach izolacyjnych napowietrznych linii EHV i UHV.

5. Opis trajektorii iskry długiej przy użyciu modelu fraktalnego

5.1. Cel opracowania modelu fraktalnego iskry długiej

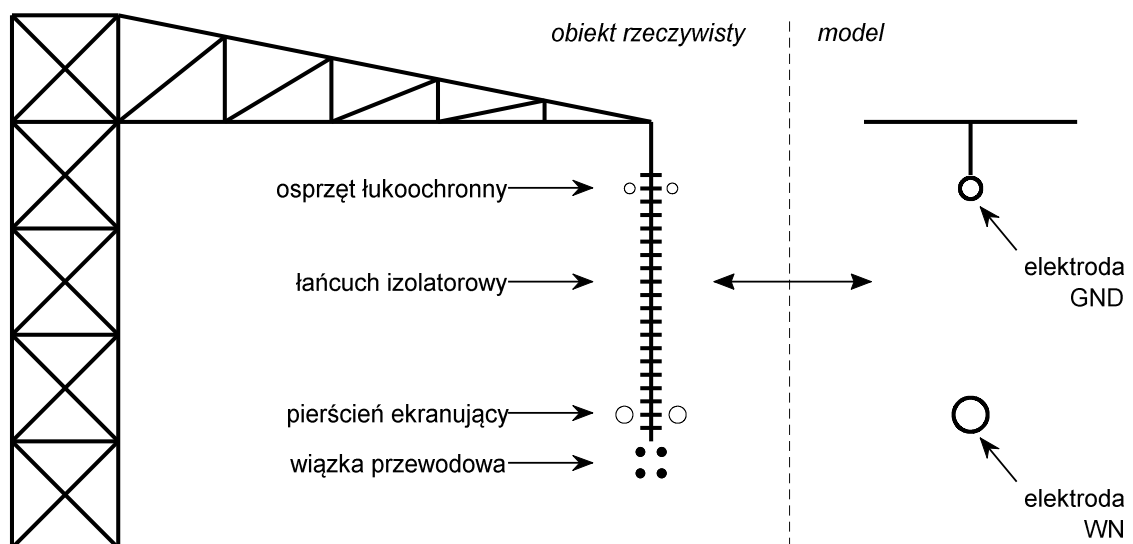
Celem badań symulacyjnych przedstawionych w niniejszym rozdziale jest sprawdzenie możliwości wykorzystania modelu fraktalnego do wyznaczania trajektorii wyładowań iskrowych, jakie mogą mieć miejsce w układach izolacyjnych napowietrznych linii EHV i UHV. Przesłanką sugerującą taką możliwość są wyniki badań przedstawione w literaturze, przykładowo w pracy [52]. Przywołana publikacja poświęca jednak uwagę wyłącznie wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych o długościach drogi przeskoku odpowiadającej tym, jakie można spotkać w sieciach średnich napięć, pomijając przy tym kwestie związane z trajektorią wyładowania. Dlatego w niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki symulacji wyładowań iskrowych, których celem było sprawdzenie czy model fraktalny pozwala na:

1. wyznaczenie trajektorii wyładowania zachowującej cechy geometryczne charakterystyczne dla iskry długiej,
2. pokazanie, że napięcie przeskoku jest wielkością statystyczną a tym samym wynikiem symulacji przeprowadzonych w tych samych warunkach może być wyładowanie zupełne (łącznie elektrody o różnych potencjałach elektrycznych) oraz wyładowanie niezupełne (rozwijające się częściowo i zatrzymujące swój rozwój na pewnym etapie),
3. pokazanie, że wyładowanie nie zawsze rozwija się w kierunku określonym przez maksymalny gradient potencjału i w przypadku układów wieloelektrodowych zdarza się, że występuje ono miejscach, które według modeli deterministycznych powinny być wolne od ryzyka uderzenia wyładowania.

5.2. Geometria modelu fraktalnego do badania iskry długiej

Badania właściwości geometrycznych kanału wyładowania oraz trajektorii rozwoju iskry długiej są najczęściej wykonywane w układach modelowych [59-62]. Wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje takich układów, które w nazewnictwie związanym z wysokonapięciową techniką probierczo-pomiarową zwykło się określać jako: *płyta-płyta*, *ostrze-płyta*, oraz *ostrze-ostrze* (np. [63]). Podstawową cechą różnicującą te układy, jest stopień równomierności rozkładu pola elektrycznego, decydujący zarówno o wytrzymałości elektrycznej układu, jak również o mechanizmie rozwoju wyładowania [63-64]. Z punktu widzenia badań iskry długiej rozwijającej się w przerwie powietrznej, najmniejsze znaczenie ma układ płyta-płyta, ponieważ tego typu konstrukcje są bardzo rzadko spotykane w rzeczywistości.

Najczęściej spotykanymi są układy cechujące się rozkładem pola elektrycznego charakterystycznym dla układów *ostrzowo-płytowych*. Przykłady wykorzystania takich układów do badań wyładowań iskrowych pokazano między innymi w [65- 69]. Zarówno w badaniach symulacyjnych, jak i modelowych, ostrza są często zastępowane kulami o odpowiednio dobranej średnicy (np. [10]). Takie podejście pozwala uniknąć problemów związanych z prawidłową definicją geometrii ostrza. Odzwierciedleniem powszechności występowania konfiguracji *ostrzowo-płytowych* elektrod są wymagania opisane w normach dotyczących metod koordynacji izolacji napowietrznych układów izolacyjnych [70-71], gdzie wyróżnia się dwa typy układów: *konstrukcja-ostrze* oraz *konstrukcja-przewód*. Przykładem takiego układu jest napowietrzna linia elektroenergetyczna, gdzie konstrukcja słupa, wiązka przewodowa oraz elementy łukochronne łańcucha izolatorowego tworzą złożony układ izolacyjny składający się z wielu elektrod i tworzący kilka potencjalnych przerw iskrowych (Rys. 5.1).

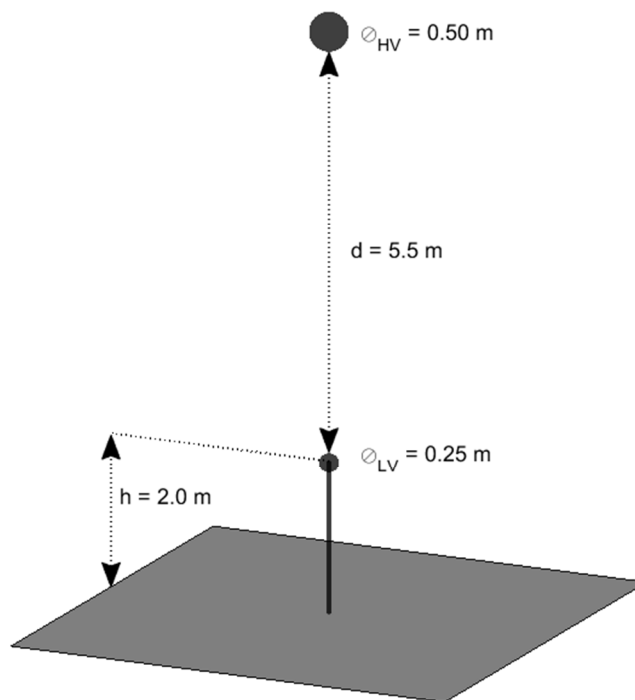


Rys. 5.1 Model linii napowietrznej

Na potrzeby badań trajektorii rozwoju iskry długiej można taki układ zamodelować jako układ *płytowo-ostrzowy* składający się z jednego ostrza znajdującego się na wysokim potencjale oraz drugiego ostrza umieszczonego na pewnej wysokości nad połączoną z nim uziemioną płytą odwzorującą konstrukcję słupa (Rys. 5.1). Jest to układ ostrzowy o nierównomiernym rozkładzie pola elektrycznego, w którym uwzględnia się również oddziaływanie uziemionego obiektu o rozmiarach porównywalnych z długością przerwy iskrowej. Ostrze znajdujące się na wysokim potencjale jest odwzorowane przy wykorzystaniu kuli o średnicy większej, niż ma to miejsce w przypadku uziemionej elektrody. Wynika to z typowych cech konstrukcyjnych łańcuchów izolatorowych, gdzie rozmiar ekranów przeciwlutowych umieszczonych w otoczeniu

wiązki przewodowej, jest większy niż w przypadku elementów łukoochronnych znajdujących się w pobliżu miejsca połączenia łańcucha z konstrukcją słupa. Długość odstępów izolacyjnych w liniach EHV i UHV ustala się głównie w oparciu o wytrzymałość na oddziaływanie napięć udarowych łączeniowych (ang. *Basic Switching Impulse Insulation Level, BSL*). Zgodnie z wartościami przedstawionymi w [70-71], zalecane odstępy izolacyjne dla układu *ostrze-konstrukcja* w liniach o napięciu od 800 kV do 1100 kV, mieszczą się w granicach od 4,1 m do nawet 7,4 m. Przytoczone normy dopuszczają różne wartości BSL w zależności od rodzaju linii i parametrów przyjętych do koordynacji izolacji.

Do wykonania badań symulacyjnych wytypowano zatem układ, w którym elektroda wysokonapięciowa ma kształt kuli o średnicy $\varnothing_{HV} = 0,50$ m. Bezpośrednio pod tą elektrodą, w odległości $d = 5,5$ m znajduje się uzmienniona elektroda kulista o średnicy $\varnothing_{LV} = 0,25$ m umieszczona na wysokości $h = 2$ m nad rozległą uziemioną płaszczyzną (Rys. 5.2).



Rys. 5.2 Układ elektrod wykorzystany w symulacjach

5.3. Parametry modelu

W wykonanych badaniach symulacyjnych iskry długiej przyjęto postać funkcji $p(P_i \rightarrow P_{i,j})$ zgodnie ze wzorem (4.1). Obliczenia zostały wykonane dla wyładowania o biegunowości dodatniej, w związku z tym, zgodnie z wartościami podawanymi w literaturze [31, 36, 38-39, 44-45], wartość krytycznego natężenia pola elektrycznego E_{cr} wynosiła 0,5 kV/cm. W obliczeniach pominięto spadek napięcia w kanale wyładowania, przyjmując, że kanał wyładowania posiada

stały potencjał elektryczny, wynoszący 1,4 MV. Wartość napięcia ustalono na podstawie [70], przyjmując, że w przypadku napięcia udarowego łączeniowego o wartości 1425 kV (minimalne znamionowe napięcie wytrzymywane dla sieci o maksymalnym napięciu roboczym wynoszącym 1100 kV – zgodnie z tabelą 3 normy [70]), zalecana minimalna długość odstępu izolacyjnego powinna wynosić 5,6 m (zgodnie z tabelą A.2 normy [70]). W modelu symulacyjnym przyjęto, że ośrodkiem, w którym rozwija się wyładowanie, jest powietrze o względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r wynoszącej 1,00059 [72]. Założono, że w przestrzeni nie znajdują się wolne ładunki elektryczne, a tym samym wartość potencjału może być wyznaczona na podstawie równania Laplace’a. Badania iskry długiej prowadzone są w warunkach laboratoryjnych, z tego względu przyjęto, że rozmiar przestrzeni, w której wykonywane są obliczenia, odpowiada rozmiarom hali laboratoryjnej, w której na potrzeby niniejszej rozprawy wykonywane były pomiary. Przyjęto zatem, że badany układ elektrod znajduje się wewnątrz sześcianu o wymiarach 40x40x33 m (stanowiących rozmiar hali wysokich napięć Instytutu Energetyki), którego wszystkie ściany są wykonane z materiału przewodzącego o potencjale elektrycznym równym potencjałowi ziemi $V_0 = 0$ V. Dodatkowo, ze względu na symetrię układu elektrod obliczenia zostały wykonane w układzie dwuwymiarowym. Jak wykazano w [52], w przypadku symulacji iskry długiej w symetrycznym układzie modelowym redukcja układu przestrzennego do dwóch wymiarów nie wpływa na otrzymywane wyniki. Przyjęte założenia pozwoliły przekształcić układ pokazany na Rys. 5.2 do postaci dwuwymiarowego modelu, w którym rozkład potencjału V w przestrzeni, gdzie rozwija się wyładowanie, opisany jest równaniem Laplace’a [73]: $\nabla V = 0$, z warunkami brzegowymi Dirichleta $V_{HV} = 1,4$ MV na powierzchni elektrody wysokonapięciowej oraz $V_0 = 0$ V na powierzchni elektrody uziemionej oraz na wszystkich krawędziach rozpatrywanego obszaru. Analogiczny sposób opisu przestrzeni w której rozwija się wyładowanie przedstawiono w [21, 44-46, 52]

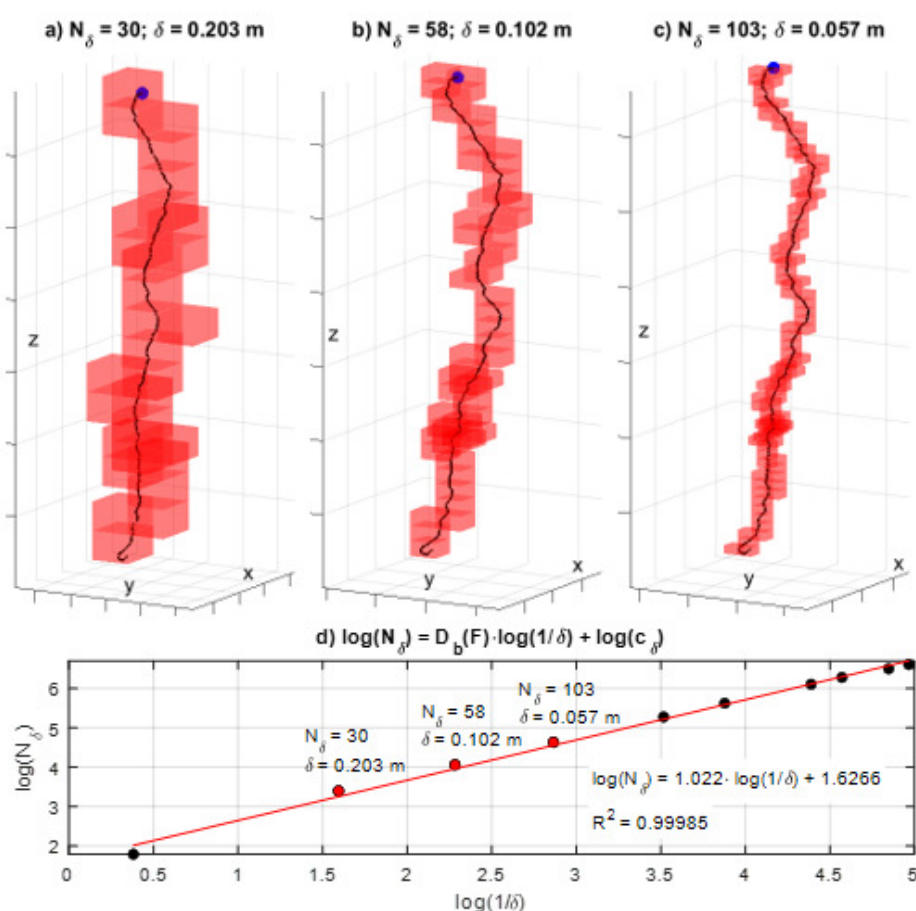
Niezależnie od rodzaju badanego wyładowania, wartość współczynnika η jest dobierana w sposób eksperymentalny, tak aby wymiar fraktalny wyładowania otrzymanego na drodze symulacji odpowiadał wymiarowi fraktalnemu rzeczywistych wyładowań. W przypadku iskry długiej, w literaturze podawanych jest kilka wartości wymiarów fraktalnych, zwierających się w granicach od 1,1 do 1,8 [62, 74]. Na potrzeby obliczeń w niniejszej rozprawie przyjęto wartość pośrednią wynoszącą 1,5. Po wykonaniu symulacji dla wartości współczynnika η wynoszących 0,1, 1,0, 5,0 i 10 przyjęto, że dla wymiaru fraktalnego równego 1,5 wartość współczynnika η wynosi $\eta = 5$.

5.4. Wymiar fraktalny

Do obliczenia wymiaru fraktalnego wykorzystano metodę pudełkową (ang. *Box Counting Method*) [62, 75-76]. Metoda ta stosowana jest do różnych struktur geometrycznych, również tych nie będących fraktalami (nieposiadających cech fraktalnych, a w szczególności samopodobieństwa) i pozwala na określenie wymiaru fraktalnego obiektów zarówno 2D, jak i 3D. Zgodnie z tą metodą wymiar fraktalny definiowany jest na podstawie zależności [77]:

$$D_b(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N_\delta}{\log(1/\delta)}, \quad (5.1)$$

gdzie N_δ jest najmniejszą liczbą sześcianów o krawędzi δ , jaka jest potrzebna do całkowitego pokrycia rozpatrywanego obiektu. Rys. 5.3 przedstawia sposób pokrycia kanału wyładowania (w tym przypadku jest to jedno z rzeczywistych wyładowań zarejestrowanych w trakcie pomiarów laboratoryjnych wykonanych przez autora niniejszej rozprawy) przez pudełka o różnych wymiarach δ . Ilustruje on graficznie zależność pomiędzy liczbą pudełek N_δ potrzebnych do całkowitego pokrycia kanału wyładowania, a ich rozmiarem δ (w wyniku zmniejszania wymiaru pudełek δ wzrasta ich liczba N_δ).



Rys. 5.3 Sposób wyznaczania wymiaru fraktalnego iskry długiej

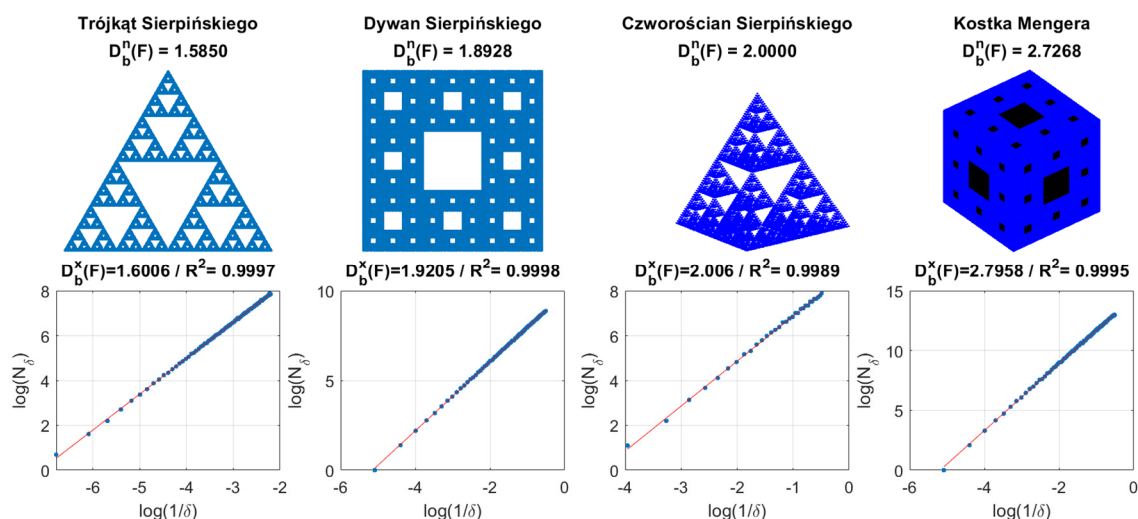
W praktyce, wyznaczenie wymiaru fraktalnego zgodnie ze wzorem (5.1) jest niemożliwe, gdyż pojęcie granicy można w sposób ścisły stosować w przypadku obiektów abstrakcyjnych. Dlatego wzór (5.1) przekształca się do postaci umożliwiającej obliczenie wymiaru fraktalnego rzeczywistego obiektu. Zależność (5.1) sugeruje zależność typu $N_\delta = c_\delta \cdot \delta^{(-D_b(F))}$ [78], którą można zapisać jako:

$$\log N_\delta = D_b(F) \cdot \log(1/\delta) + \log(c_\delta), \quad (5.2)$$

gdzie $\log(c_\delta)$ jest wyrazem wolnym równania. Wyznaczenie wymiaru fraktalnego na podstawie równania (5.2) sprowadza się zatem do wyznaczenia funkcji opisującej związek pomiędzy rozmiarem pudełek δ , a ich minimalną liczbą N_δ , niezbędną do pokrycia całego obiektu. W ujęciu praktycznym wymiar fraktalny jest zatem definiowany jako współczynnik kierunkowy prostej regresji na wykresie zależności logarytmów liczby pudełek N_δ zawierających fragment obiektu, od ich wielkości δ [78].

Rys. 5.3 d) przedstawia zależność logarymiczną pomiędzy wielkościami N_δ i δ wykorzystywanymi do wyznaczania wymiaru fraktalnego. Wybrane punkty obliczeniowe oznaczono kolorem czarnym, natomiast kolorem czerwonym zaznaczono wartości odpowiadające rozmiarom pudełek pokazanym na Rys. 5.3 a-c. Współczynnik kierunkowy prostej pokazanej na Rys. 5.3 d) jest, zgodnie ze wzorem (5.2), wymiarem fraktalnym charakterystycznym dla rozpatrywanego wyładowania. Metoda wyznaczania wymiaru fraktalnego jest taka sama dla obiektów dwu i trójwymiarowych. Jedyna różnica polega na tym, że w przypadku obiektów trójwymiarowych, do ich pokrycia zamiast kwadratów wykorzystywane są sześciiany.

Kanał wyładowania, będący efektem symulacji wykorzystujących modelowanie fraktalne, nie jest obiektem o strukturze ciągłej, lecz dyskretnej, cechującej się ograniczoną rozdzielczością. W związku z tym przyjęta metoda wyznaczania wymiaru fraktalnego posiada ograniczoną dokładność, zatem cechuje się błędem. Błąd określenia wymiaru fraktalnego został oszacowany na podstawie pomiaru obiektów o znanym wymiarze fraktalnym. W tym celu wykorzystano cztery fraktale: Trójkąt Sierpińskiego i Dywan Sierpińskiego reprezentujące obiekty dwuwymiarowe oraz Czworoscian Sierpińskiego i Kostkę Mengera reprezentujące obiekty trójwymiarowe. Wykorzystane fraktale, podobnie jak kanał wyładowania, nie są funkcją ciągłą, lecz zbiorem punktów o ograniczonej rozdzielczości. Na Rys. 5.4 pokazano wygenerowane fraktale wraz z wykresami funkcji regresji liniowej. We wszystkich przypadkach otrzymano bardzo dobre dopasowanie funkcji aproksymującej, co obrazuje współczynnik determinacji R^2 , którego wartość w żadnym przypadku nie była niższa niż 0,999.



Rys. 5.4 Fraktale i ich wymiar fraktalny [79]

W Tab. 5.1 zestawiono wyniki wykonanych obliczeń wraz z wartościami błędów obliczeniowych. Przyjęto, że błąd obliczeń wymiaru fraktalnego równy jest względnej różnicy pomiędzy obliczonym, a teoretycznym wymiarem fraktalnym, wyrażonej jako procent wartości rzeczywistej. Na podstawie wykonanych obliczeń można zauważyć, że błąd pomiaru rośnie wraz ze wzrostem samego wymiaru fraktalnego, co dotyczy zarówno obiektów dwu, jak i trójwymiarowych. Na potrzeby niniejszej pracy przyjęto, że błąd pomiaru wymiaru fraktalnego wynosi 1,4% dla obiektów dwuwymiarowych oraz 2,5% dla obiektów trójwymiarowych.

Tab. 5.1 Wyniki obliczeń błędu metody

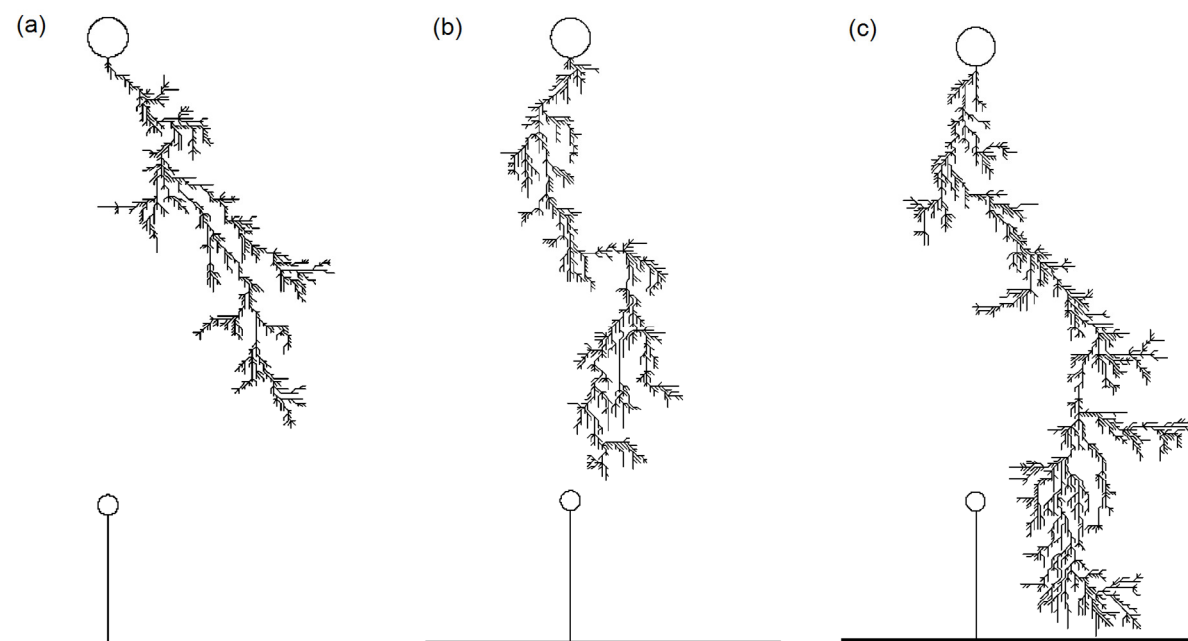
Fraktal	Teoretyczny wymiar fraktalny $D_b^n(F)$	Obliczony wymiar fraktalny $D_b^x(F)$	Błąd
Trójkąt Sierpińskiego	1,5850	1,6006	1,0 %
Dywan Sierpińskiego	1,8928	1,9205	1,4 %
Czworościan Sierpińskiego	2,0000	2,0060	0,3 %
Kostka Menger	2,7268	2,7958	2,5 %

5.5. Ocena jakościowa wyników symulacji

Na Rys. 5.5 przedstawiono trzy możliwe scenariusze rozwoju wyładowania, jakie uzyskano w trakcie symulacji. W pierwszym przypadku wyładowanie nie rozwija się całkowicie, co oznacza, że w ostatniej iteracji w żadnym z punktów P_{ij} , określających potencjalny kierunek wyładowania, nie został spełniony warunek dalszej propagacji kanału wyładowania. W drugim przypadku dochodzi do wyładowania pomiędzy elektrodami kulistymi. Z punktu widzenia modeli deterministycznych oba te przypadki stanowią najbardziej prawdopodobne scenariusze, gdyż wyładowanie rozwija się w kierunku wyznaczonym przez maksymalny gradient potencjału

elektrycznego. W ostatnim przypadku celem wyładowania jest punkt znajdujący się na uziemionej płaszczyźnie tuż obok elementu podtrzymującego uziemioną elektrodę kulistą. Jest to przypadek znacząco mniej prawdopodobny od dwóch pierwszych przypadków i z punktu widzenia eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych odpowiada sytuacji awaryjnej, w której nie dochodzi do wyładowania w miejscu do tego przygotowanym (np. wyładowanie do konstrukcji wsporczej zamiast między elementami łukoochronnymi łańcucha izolatorowego). Jak wynika z literatury [53-58], a także z badań laboratoryjnych wykonywanych przez autora rozprawy zarówno na obiektach rzeczywistych, takich jak łańcuchy izolatorowe (Fot. 4.1), jak i na układach modelowych (Fot. 5.1), tego typu sytuacje, choć rzadkie, są jednak spotykane. Model fraktalny, w przeciwieństwie do modeli deterministycznych, daje zatem możliwość przewidywania tego typu zdarzeń oraz określania prawdopodobieństwa ich występowania.

We wszystkich zaprezentowanych przypadkach warunki początkowe symulacji były takie same, jednakże pomimo tego, wyładowanie za każdym razem rozwinęło się w inny sposób. Różnice widoczne są nie tylko w kierunku rozwoju ale także w krętości kanału wyładowania (pojęcie krętości przyjęto tu do opisu kanału wyładowania nie definiując go w sposób ilościowy, co zostanie zrobione w Rozdziale 6.4.3) oraz w sposobie i intensywności rozgałęziania.

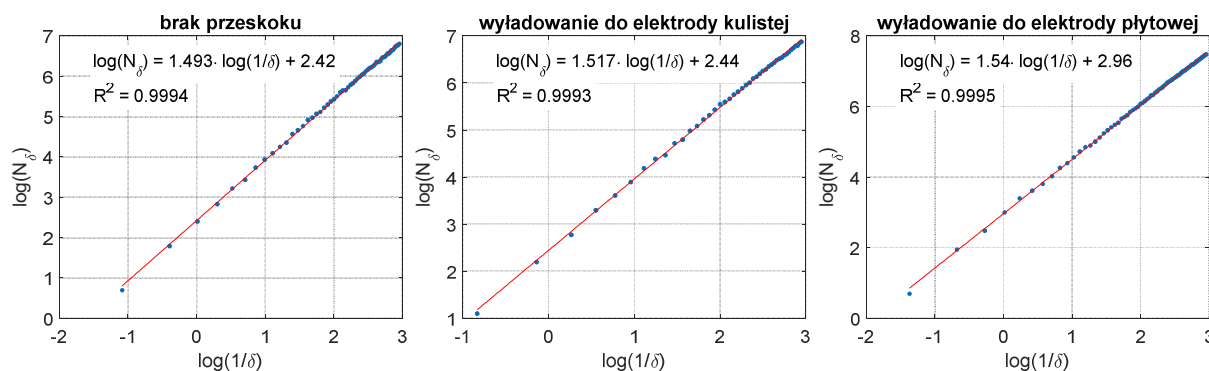


Rys. 5.5 Wyniki symulacji wyładowań iskrowych



Fot. 5.1 Wyładowanie będące następstwem uderzenia łączeniowego biegunowości ujemnej

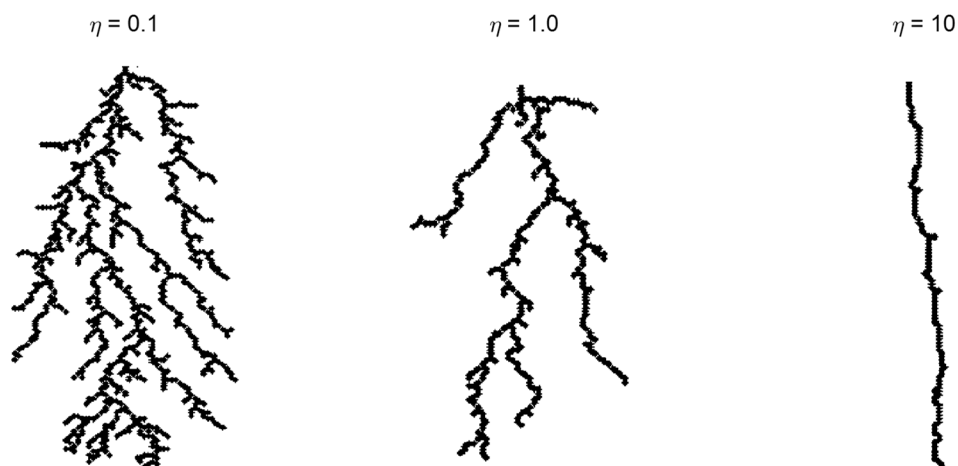
Wzory powstałe w wyniku propagacji kanału wyładowania, pokazane na Rys. 5.5, są złożonymi strukturami geometrycznymi tworzonymi przez główny kanał wyładowania oraz przez dołączone do niego gałęzie. Wymiar fraktalny tych wyładowań wynosi w przybliżeniu 1,5 (Rys. 5.6), a zatem mieści się w zakresie wielkości typowym dla wyładowań iskrowych [62, 74]. Jednakże porównując wyniki symulacji z obrazami przedstawiającymi iskry długie zarejestrowane w warunkach laboratoryjnych (Fot. 5.1) można zauważyć, że liczba oraz rozmiar gałęzi w przypadku wyników symulacji jest znacznie większa niż ma to miejsce w rzeczywistości.



Rys. 5.6 Wymiar fraktalny symulowanych wyładowań

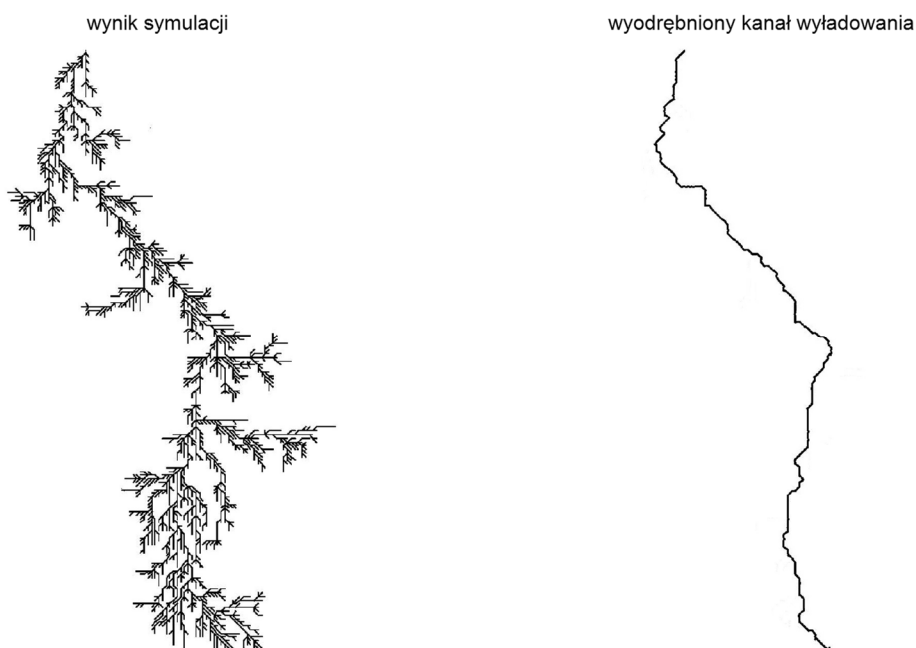
Jedną z metod stosowanych w celu zmniejszenia rozmiaru oraz liczby gałęzi wyładowania jest zwiększenie wartości wykładnika potęgowego η [25]. Jednak jak pokazano na Rys. 5.7 wzrost wartości η wpływa nie tylko na stopień rozgałęzienia wyładowania ale też w znacznym stopniu redukuje krętość głównego kanału. Jest to spowodowane ograniczeniem wpływu efektów stochastycznych, w wyniku czego rozwój kanału wyładowania jest w większym stopniu uzależniony od rozkładu pola elektrycznego. Efekt ten jest niepożądany, gdyż jak wykazano w [54], nagłe zmiany kierunku rozwoju iskry długiej są zjawiskiem często spotykanym, zwłaszcza w

układach wieloelektrodowych. Tym samym ograniczanie zdolności modelu w tym zakresie znacznie zmniejsza jego możliwości, przykładowo w zastosowaniu do oceny ryzyka wyładowania do konstrukcji wsporczych linii UHV lub w celu wyznaczenia stref bezpiecznych w stacjach HVDC.



Rys. 5.7 Wpływ współczynnika η na liczbę stopień rozgałęzienia kanału wyładowania, na podstawie [31]

Jednym z rozwiązań pozwalającym na eliminację rozgałęzień, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganej krętości, może być wyodrębnienie głównego kanału wyładowania, będącego *subfraktalem* [26] wchodzącym w skład struktury otrzymanej w trakcie symulacji (Rys. 5.8). W efekcie możliwe jest uzyskanie obiektu o trajektorii zbliżonej do tej, którą posiada iskra długa, jednak nie rozwiązuje to problemu wpływu zbyt silnych rozgałęzień na rozkład pola elektrycznego, a tym samym na rozwój wyładowania.



Rys. 5.8 Wyodrębnianie kanału wyładowania

5.6. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych symulacji zrealizowano następujące cele:

1. Wykazano, że model fraktalny może być wykorzystany do wyznaczania kierunku rozwoju iskier długich o długości odpowiadający długościom wyładowań spotykanym w układach izolacyjnych napowietrznych linii EHV i UHV;
2. Wykazano, że model fraktalny pozwala na symulację typowych zjawisk, jakie są obserwowane podczas wyładowań iskrowych (np. statystyczny charakter napięcia przeskoğu, rozwój wyładowania po trajektorii omijającej kierunek wyznaczony przez maksymalny gradient potencjału elektrycznego);
3. Opracowano metodę oceny dokładności wyznaczania wymiaru fraktalnego dla obiektów dwuwymiarowych i trójwymiarowych, zdefiniowanych jako zbiór dyskretnych punktów określających współrzędne przestrzenne.

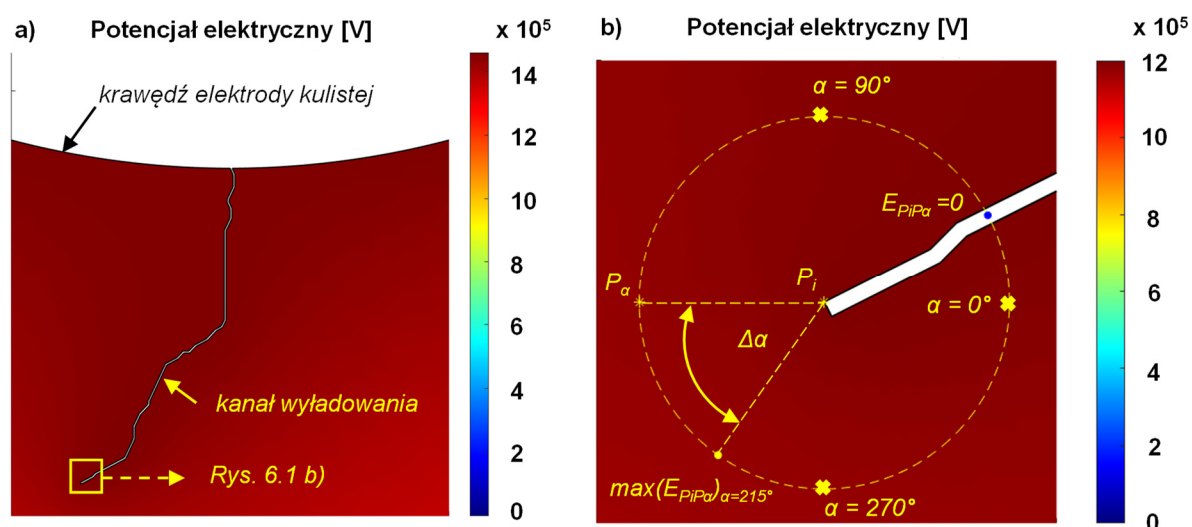
Jednym z wniosków sformułowanych na podstawie przedstawionej analizy wyników wykonanych symulacji jest jednak konieczność *dostosowania* modelu fraktalnego do celów symulacji wyładowań iskrowych. W dotychczasowych zastosowaniach tego modelu, krętość i kształt głównego kanału wyładowania były ściśle związane z intensywnością rozwoju rozgałęzień. W przypadku iskry długiej, będącej wyładowaniem, w którym na podstawie obserwacji można stwierdzić relatywnie niską intensywność rozwoju gałęzi i dominujący charakter głównego kanału wyładowania, istnienie takie związku znacznie ogranicza zdolności modelu w zakresie symulacji kanałów wyładowania o różnej geometrii przy zachowaniu niskiego poziomu rozgałęziania. Jest to szczególnie niekorzystne w odniesieniu do symulacji wyładowań będących następstwem różnych typów uderzeń (uderzeniowy i uderzeniowy), w przypadku których obserwuje się znaczne różnice w krętości kanału wyładowania.

6. Badania symulacyjne trajektorii iskry długiej

6.1. Opis opracowanego modelu iskry długiej

Rozwiązaniem pozwalającym na eliminację wpływu gałęzi na etapie obliczeń, przy jednoczesnym zachowaniu możliwości dowolnej zmiany współczynnika η , co pozwala modelować iskry o różnej krętości kanału wyładowania, jest modyfikacja modelu, zakładająca, że w trakcie danej iteracji kanał wyładowania może rozwinąć się tylko w jednym kierunku.

Na Rys. 6.1 przedstawiono rozkład potencjału elektrycznego w otoczeniu fragmentu kanału wyładowania, rozwijającego się w układzie pokazanym na Rys. 5.2. Punkt P_i , znajdujący się na końcu kanału wyładowania, jest jedynym punktem węzłowym, dla którego wykonywane są obliczenia. W przeciwieństwie do standardowego modelu, w którym liczba punktów P_{ij} określających potencjalne kierunki wyładowania była zawsze stała i wynosiła 8 dla układu 2D oraz 26 dla układu 3D, w rozpatrywanym przypadku liczba tych punktów (tutaj oznaczonych symbolem P_α) może być wybrana dowolnie. Same punkty P_α są natomiast rozmieszczone na obwodzie okręgu lub powierzchni sfery, w środku której znajduje się rozpatrywany punkt węzłowy P_i .



Rys. 6.1 Rozkład potencjału w otoczeniu kanału wyładowania

Zmiana rozmieszczenia oraz liczby punktów określających potencjalne kierunki wyładowania pociąga za sobą wprowadzenie zmian w sposobie definicji funkcji prawdopodobieństwa $p(P_i \rightarrow P_{i,j})$, która przyjmuje następującą postać:

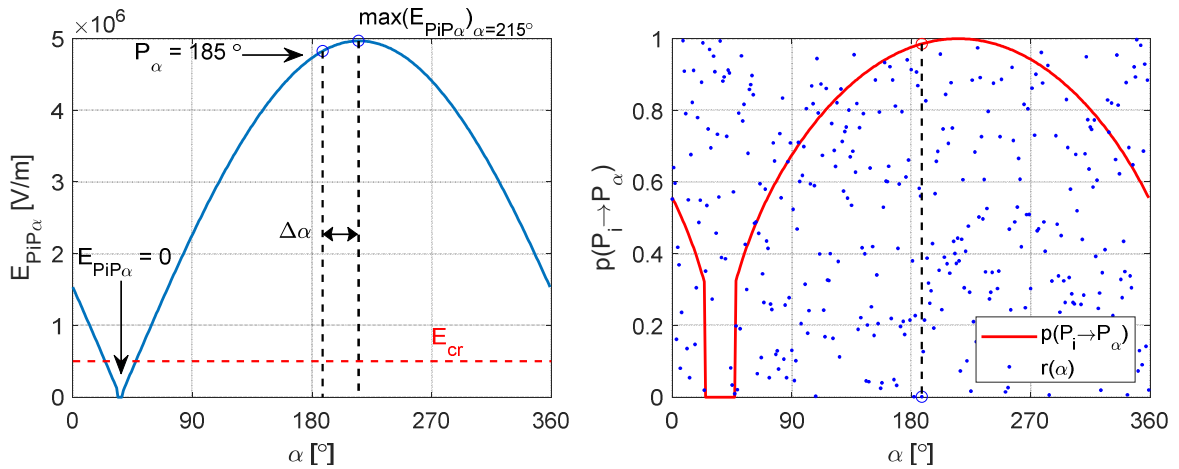
$$p(P_i \rightarrow P_\alpha) = \begin{cases} \frac{(E_{P_i P_\alpha})^\eta}{\max(E_{P_i P_\alpha})^\eta}, & \text{jeżeli } E_{P_i P_\alpha} \geq E_{cr}, \\ 0, & \text{jeżeli } E_{P_i P_\alpha} < E_{cr} \end{cases} \quad (6.1)$$

gdzie $E_{P_i P_\alpha}$ jest natężeniem pola elektrycznego pomiędzy punktem węzłowym P_i , a jednym z punktów P_α . Wartość $E_{P_i P_\alpha}$ jest wyznaczana na podstawie wzoru:

$$E_{P_i P_\alpha} = \left| \frac{V_i - V_\alpha}{R} \right|, \quad (6.2)$$

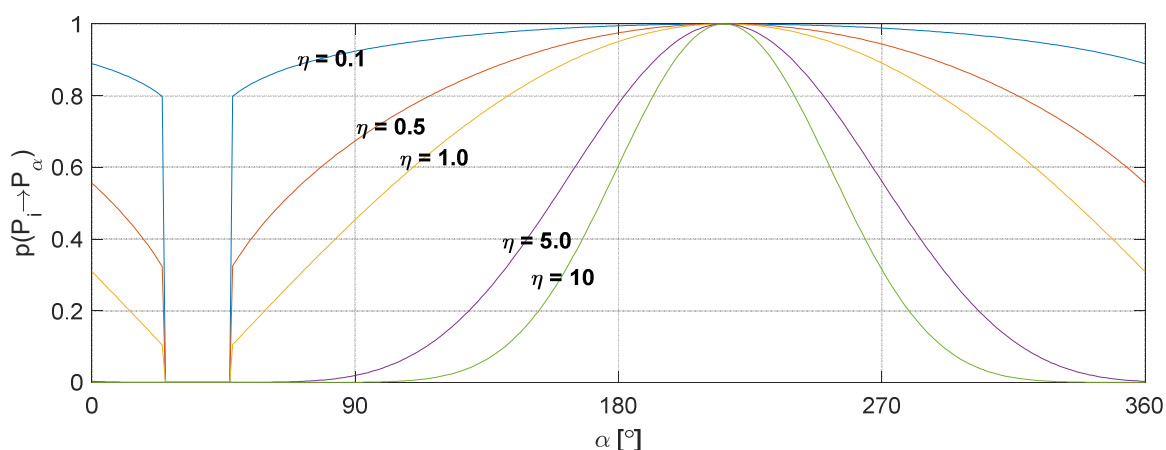
w którym V_i i V_α są wartościami potencjału elektrycznego, odpowiednio, w punktach P_i i P_α , a R jest odległością pomiędzy tymi punktami, będącą jednocześnie promieniem okręgu w przypadku modeli 2D, lub sfery w przypadku modeli 3D, na których rozmieszczono punkty P_α .

Na Rys. 6.2 pokazano rozkład natężenia pola elektrycznego oraz wartość funkcji $p(P_i \rightarrow P_\alpha)$ dla wszystkich punktów P_α . Do normalizacji funkcji $p(P_i \rightarrow P_\alpha)$ wykorzystano maksymalną wartość pola elektrycznego $\max(E_{P_i P_\alpha})$. Punkty oznaczone niebieskimi kropkami odpowiadają wartościom liczb losowych $r(\alpha)$. Przyjmuje się, że wyładowanie rozwija się w kierunku tego punktu P_α , dla którego różnica pomiędzy liczbą losową $r(\alpha)$, a funkcją $p(P_i \rightarrow P_\alpha)$ jest największa. Zgodnie z zależnością (6.1), funkcja $p(P_i \rightarrow P_\alpha)$ osiąga wartość równą 0 dla kątów z przedziału od 25° do 43° , dla których $E_{P_i P_\alpha} < E_{cr}$. W obliczeniach przyjęto, że spadek potencjału wewnątrz kanału wyładowania jest pomijalny, dlatego na wykresie $E_{P_i P_\alpha}$ widoczny jest obszar, w którym $E_{P_i P_\alpha} = 0$, to jest obszar odpowiadający punktom P_α położonym wewnątrz kanału wyładowania. Różnica $p(P_i \rightarrow P_\alpha) - r(\alpha)$ jest największa dla $\alpha = 185^\circ$, co oznacza, że wyładowanie nie rozwija się w kierunku wyznaczonym przez maksymalną wartość natężenia pola elektrycznego przypadającą dla $\alpha = 215^\circ$.



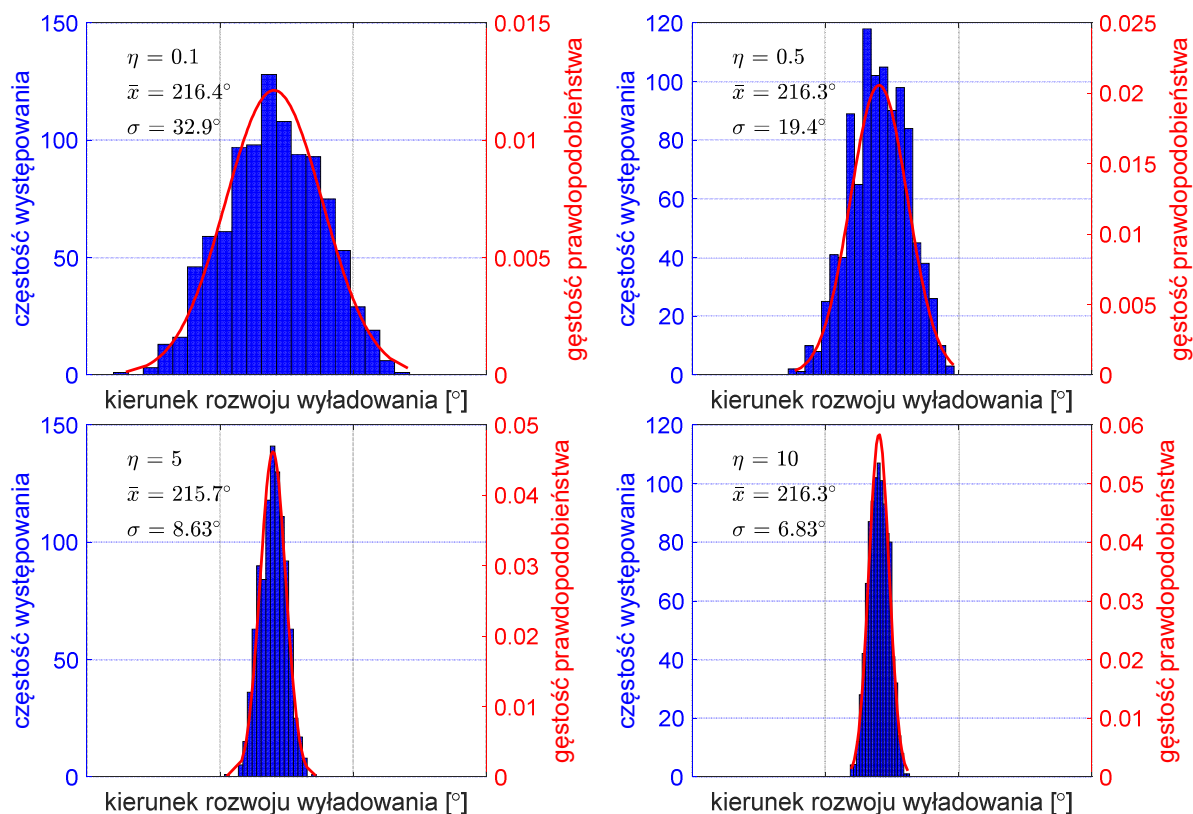
Rys. 6.2 Natężenie pola elektrycznego oraz wartość funkcji $p(P_i \rightarrow P_\alpha)$

Odchylenie kątowe $\Delta\alpha$ może służyć jako miara potencjalnej krętości kanału wyładowania dla danej iteracji oraz dla danego rozkładu pola elektrycznego. Wartość tego odchylenia zależy w największym stopniu od współczynnika η . Wykres funkcji $p(P_i \rightarrow P_\alpha)$, pokazany na Rys. 6.2, został sporządzony dla $\eta = 0,5$. Na Rys. 6.3 pokazano przebiegi funkcji $p(P_i \rightarrow P_\alpha)$ dla kilku wybranych wartości współczynnika η . Wykonane obliczenia pokazują, że wraz ze wzrostem η zmniejsza się pole pod wykresem $p(P_i \rightarrow P_\alpha)$, a efektem tego jest zmniejszanie się zakresu odchylenia $\Delta\alpha$



Rys. 6.3 Zależność funkcji $p(P_i \rightarrow P_\alpha)$ od współczynnika η

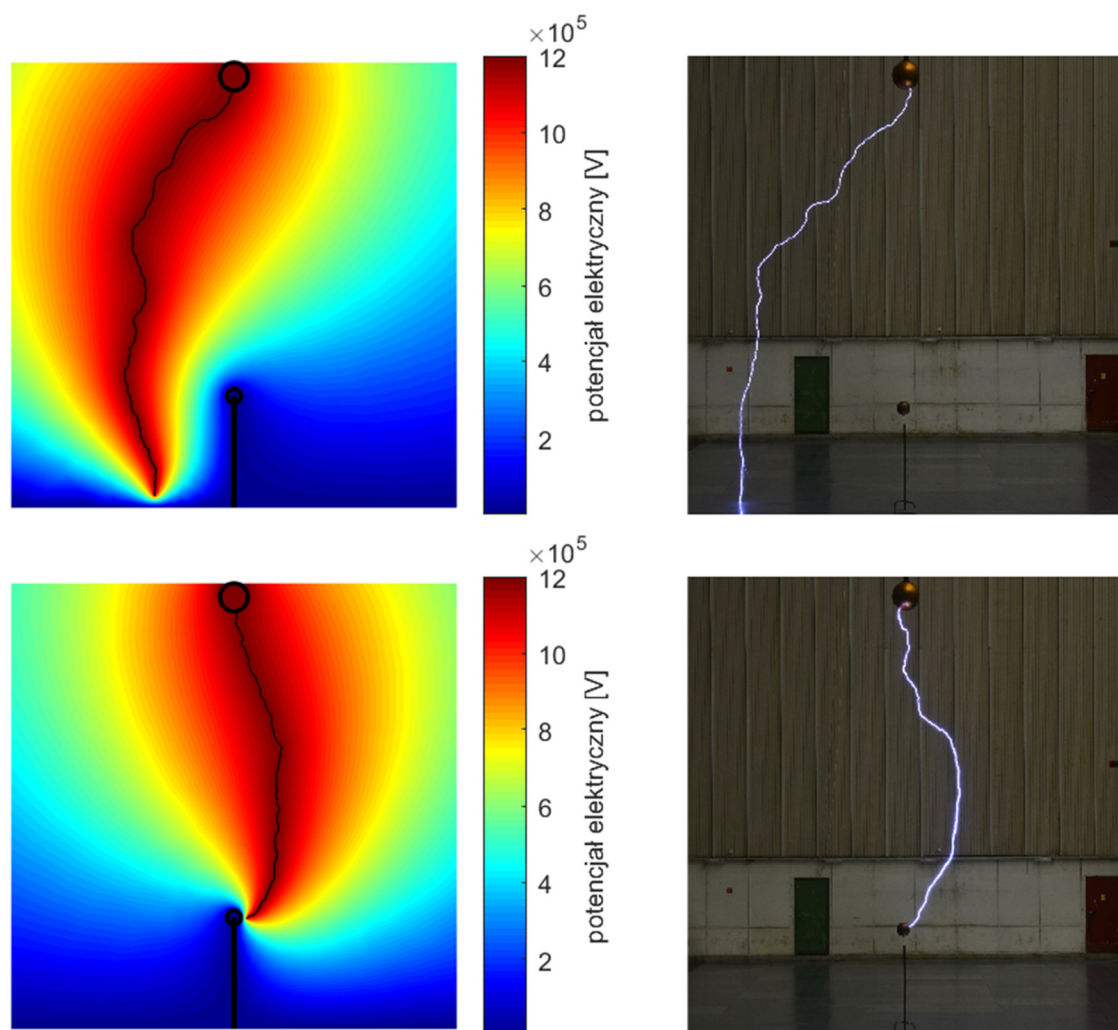
Dla oceny wpływu wartości współczynnika η na uzyskiwaną w modelu krętość kanału wyładowania wykonano obliczenia, polegające na tysiącokrotnym wyznaczeniu kierunku rozwoju wyładowania dla rozkładu pola elektrycznego pokazanego na Rys. 6.2. W każdej z tysięcy iteracji losowano osobny zestaw liczb $r(\alpha)$ i porównywano go z wartościami funkcji $p(P_i \rightarrow P_\alpha)$. Wyniki zaprezentowane na Rys. 6.4 pokazują, że niezależnie od wartości η , wyładowanie najczęściej rozwija się w kierunku wyznaczonym przez maksymalny gradient potencjału elektrycznego; wyznaczona wartość średnia $\bar{x}$ odpowiada punktowi $\max(E_{PiP\alpha})$ - Rys. 6.2. Zauważalny jest jednak istotny wpływ współczynnika η na odchylenie kątowe $\Delta\alpha$, wyrażone tutaj poprzez wartość odchylenia standardowego σ . W związku z powyższym można uznać, że proponowana modyfikacja modelu, polegająca na eliminacji możliwości rozwoju gałęzi, zachowuje podstawową zasadę modelowania fraktalnego, zgodnie z którą losowość rozwoju kanału wyładowania jest uzależniona od współczynnika η . W rozpatrywanym przypadku zwiększony wpływ efektów stochastycznych nie uwidacznia się jednak w postaci intensywniejszego rozwoju gałęzi, lecz jego efektem jest rozszerzenie zakresu potencjalnych kierunków rozwoju kanału wyładowania.



Rys. 6.4 Rozkłady częstości występowania kierunku rozwoju wyładowania dla czterech wybranych wartości współczynnika η

6.2. Symulacje trajektorii iskry długiej w przestrzeni dwuwymiarowej

Na Rys. 6.5 przedstawiono porównanie wyników symulacji, uzyskanych przy wykorzystaniu zmodyfikowanego modelu fraktalnego, ze zdjęciami iskier długich wykonanymi w układzie laboratoryjnym odwzorowującym model pokazany na Rys. 5.2. W obu rozpatrywanych przypadkach (wyładowanie do elektrody kulistej oraz płytowej) można zauważyć, że kształty kanałów wyładowania uzyskanych na drodze symulacji wykazują duże podobieństwo z rzeczywistymi iskrami. Na tym etapie pojęcie podobieństwa oznacza jakościową ocenę wizualną, nie bazującą na analizie parametrów ilościowych. Parametry ilościowe do oceny podobieństwa wyładowań zostaną wprowadzone w dalszej części rozprawy (patrz Rozdział 4.4).



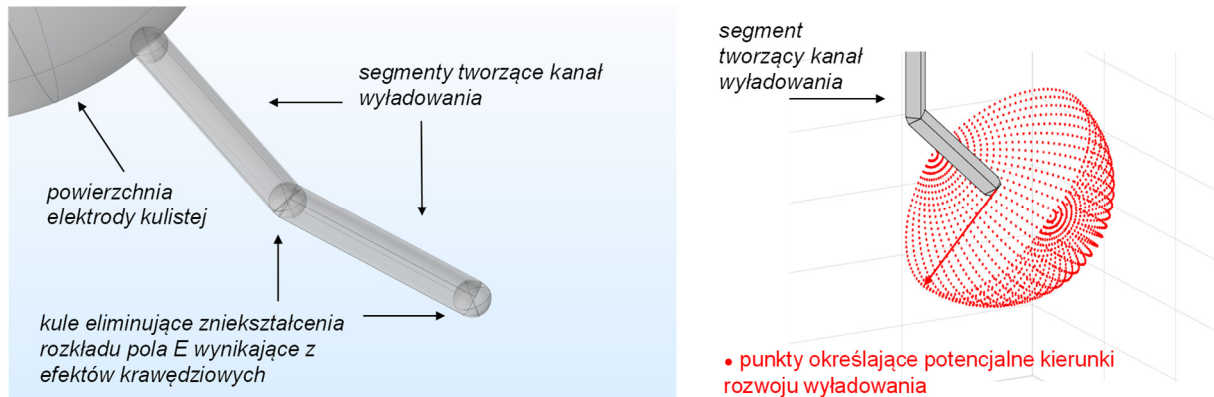
Rys. 6.5 Porównanie wyników symulacji ze zdjęciami rzeczywistych wyładowań

6.3. Symulacje trajektorii iskry długiej w przestrzeni trójwymiarowej

6.3.1. Modelowanie iskry długiej w przestrzeni trójwymiarowej

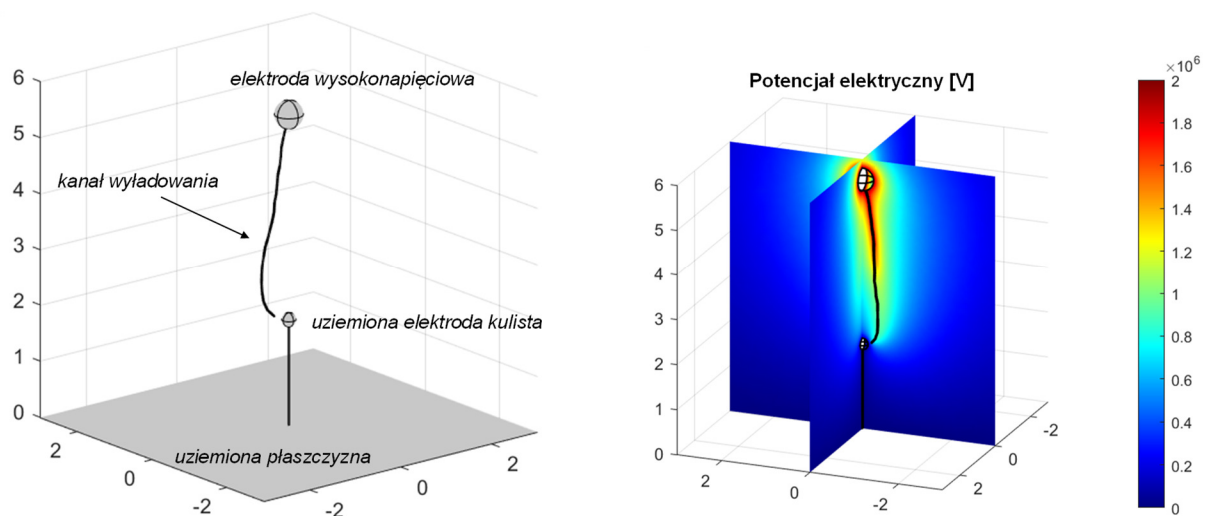
Symulacje, których wyniki przedstawiono na Rys. 6.5 zostały wykonane w układzie dwuwymiarowym. Iskra długa jest jednak obiektem przestrzennym, tym samym model symulacyjny powinien dawać możliwość badania trajektorii również w przestrzeni trójwymiarowej. Najczęściej stosowanym sposobem uzyskania przestrzennego kanału wyładowania jest podejście bezpośrednie, polegające na stworzeniu trójwymiarowego modelu obliczeniowego. Pod względem metody określania kierunku rozwoju wyładowania, obliczenia w układzie trójwymiarowym nie różnią się od zaprezentowanych powyżej warunków dwuwymiarowych. Główna różnica dotyczy sposobu tworzenia geometrii kanału iskry długiej oraz rozmieszczenia punktów wyznaczających potencjalne kierunki wyładowania (Rys. 6.6). W celu uniknięcia błędów obliczeniowych przyjęto, że segmenty tworzące kanał mają postać cylindrów zakończonych kulami, zapewniającymi ciągłość powierzchni w miejscach łączenia segmentów. Punkty określające potencjalne

kierunki rozwoju wyładowania są natomiast rozmieszczone na powierzchni sfery przy założeniu jednostopniowej rozdzielczości kątowej.



Rys. 6.6 Sposób budowania geometrii modelu podczas symulacji w układzie trójwymiarowym

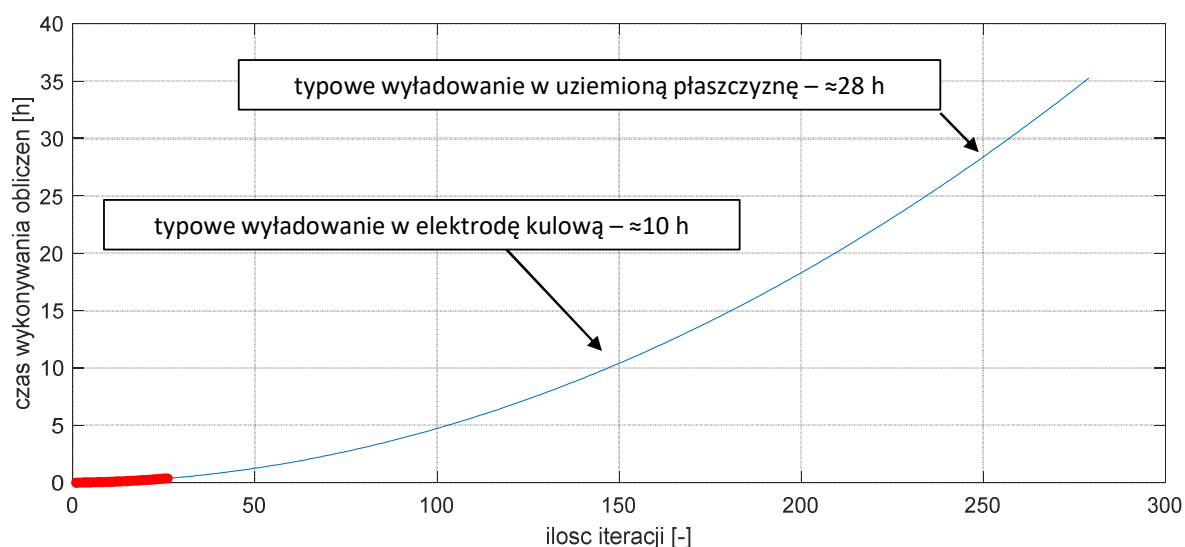
Na Rys. 6.7 przedstawiono wyniki symulacji pojedynczej iskry długiej o długości przerwy iskrowej wynoszącej 3,3 m. Do wykonania obliczeń wykorzystano dwa współpracujące ze sobą środowiska obliczeniowe: COMSOL Multiphysics, wykorzystywany do wyznaczenia rozkładu potencjału elektrycznego oraz MATLAB stosowany do określenia kierunku rozwoju wyładowania.



Rys. 6.7 Wyniki symulacji iskry długiej wykonane w przestrzeni trójwymiarowej

Uzyskane wyniki uzasadniły możliwość zastosowania zmodyfikowanego modelu fraktalnego do obliczeń w przestrzeni trójwymiarowej. Podobnie jak w układzie dwuwymiarowym, eliminacja tworzenia gałęzi nie miała wpływu na kształt kanału wyładowania, który również i w tym przypadku wykazuje duże podobieństwo do rzeczywistych wyładowań (które na tym etapie, podobnie jak poprzednio, rozpatrujemy bez wprowadzania miary ilościowej).

Istotną wadą związaną z wykonywaniem obliczeń w oparciu o modele przestrzenne jest czas potrzebny na wykonanie symulacji rozkładu potencjału elektrycznego. Na Rys. 6.8 pokazano czas symulacji jednego wyładowania w modelu trójwymiarowym, wykonanych na dostępnym komputerze obliczeniowym. Jak wskazuje literatura [35] oraz przeprowadzone przez autora badania, czynnikiem o decydującym wpływie na czas symulacji jest konieczność wielokrotnego wyznaczania rozkładu potencjału. W zależności od geometrii układu oraz od przyjętych parametrów, wyznaczanie trajektorii pojedynczego wyładowania wiąże się z koniecznością wykonania od kilkudziesięciu do nawet kilku tysięcy iteracji. Na podstawie wykonanych przez autora obliczeń oszacowano, że przy wykorzystaniu typowego komputera obliczeniowego (procesor: Intel® Core i7-4600 2.10GHz-2.69GHz, pamięć RAM: 8 GB), czas potrzebny do symulacji wyładowania trafiającego w uziemioną elektrodę kulistą wynosi w przybliżeniu 10 godzin. W przypadku wyładowań o większej długości, rozwijających się w kierunku elektrody płytowej, zatem wymagających wykonania większej liczby iteracji, czas symulacji wzrasta do około 28 godzin. Dla porównania, podobne obliczenia w układzie dwuwymiarowym zajmują odpowiednio około 1h 40min i 2h 50min.



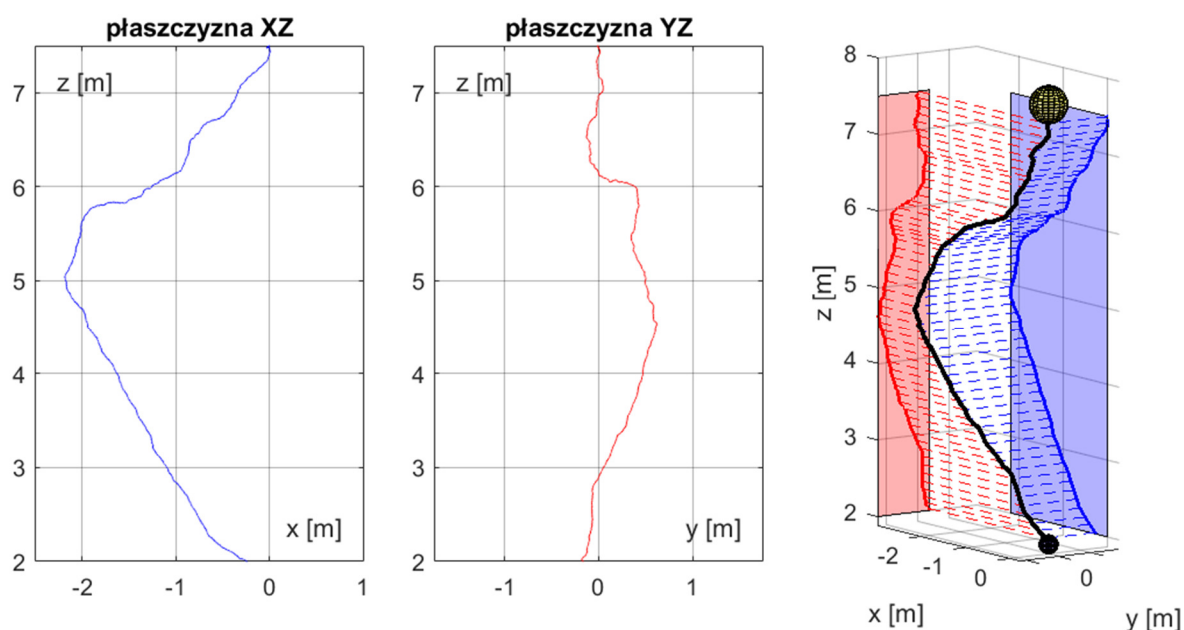
Rys. 6.8 Szacowany czas trwania symulacji wyładowania w układzie trójwymiarowym

Ocena wytrzymałości elektrycznej powietrznych układów izolacyjnych wykonywana jest zwykle na podstawie analizy zachowania badanego układu na oddziaływanie serii wyładowań. W przypadku badań laboratoryjnych stosowane procedury zakładają użycie minimum 15 uderów każdej biegunowości, gdy celem badania jest sprawdzenie znamionowanej wartości napięcia wytrzymywanego (procedura B w [51]) lub minimum 20 uderów każdej biegunowości, gdy w trakcie badań wyznaczane jest napięcie przeskoiku oraz sprawdzany jest kierunek rozwoju

wyładowania (procedura C w [51]). Przyjmując zatem, że w przypadku badań symulacyjnych należy przeanalizować podobną liczbę wyładowań, długi czas potrzebny na symulację tylko jednego wyładowania w praktyce eliminuje możliwość wykorzystania modelu trójwymiarowego do celów praktycznych.

6.3.2. Rekonstrukcja przestrzenna kanału wyładowania

Metodą pozwalającą na symulacje wyładowań przestrzennych bez konieczności wykonywania obliczeń wykorzystujących modele trójwymiarowe, jest metoda bazująca na układach laboratoryjnych przedstawionych w [59-60]. Metoda ta polega na rekonstrukcji kanału wyładowania na podstawie dwóch dwuwymiarowych obrazów, będących rzutami kanału wyładowania na wybrane płaszczyzny odniesienia (Rys. 6.9). Przy założeniu, że płaszczyzny rzutowania są do siebie wzajemnie prostopadłe można przyjąć, że wykorzystywane punkty, tworzące obie trajektorie dwuwymiarowe, posiadają wspólne współrzędne osi rzędnych (Z). Natomiast współrzędne odcięte odpowiadają współrzędnym X oraz Y przestrzennego kanału wyładowania.

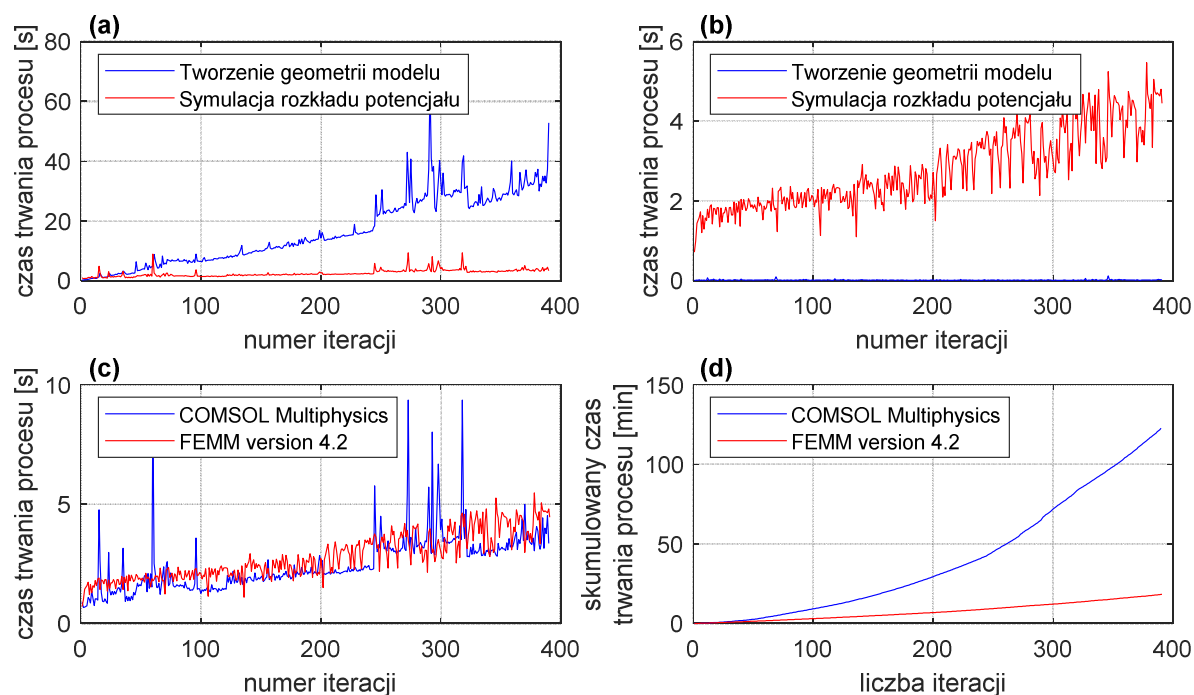


Rys. 6.9 Sposób rekonstrukcji kanału wyładowania

Metoda ta wymaga wykonania dwóch symulacji w celu uzyskania jednego wyładowania przestrzennego. Jednakże jak wykazały wykonane przez autora badania, czas potrzebny na symulację dwóch wyładowań dwuwymiarowych jest znacznie krótszy, niż ma to miejsce w przypadku pojedynczej symulacji przestrzennej (porównanie Rys. 6.8 oraz Rys. 6.10).

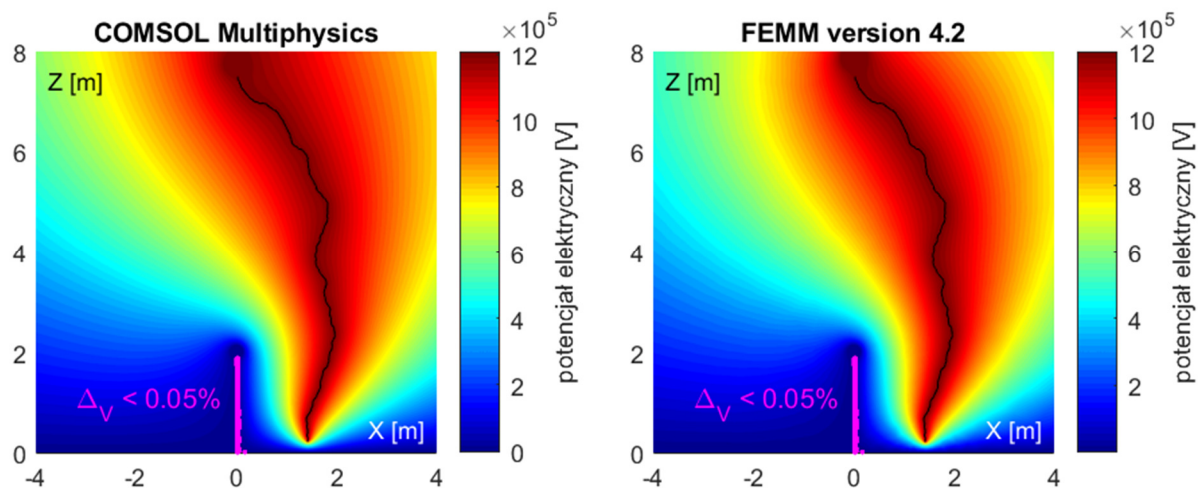
Wraz z rozwojem kanału wyładowania struktura geometryczna modelu staje się coraz bardziej skomplikowana. W efekcie czas potrzebny na wykonanie symulacji w kolejnych iteracjach

ulega wydłużeniu (Rys. 6.10). Jak pokazano na Rys. 6.10a, sposób tworzenia geometrii kanału wyładowania ma istotny wpływ na wydajność modelu. W przypadku uproszczonej geometrii (Rys. 6.10b) czas potrzebny na jej zamodelowanie jest praktycznie pomijalny w całym procesie obliczeniowym. Tym samym upraszczając strukturę geometryczną modelu poprzez przyjęcie założenia, że kanał wyładowania jest zbiorem punktów połączonych ze sobą liniami o nieskończenie małej grubości, możliwe jest kilkukrotne skrócenie czasu potrzebnego na symulację wyładowania (Rys. 6.10).



Rys. 6.10 Porównanie czasu trwania symulacji wykonywanych w środowisku COMSOL Multiphysics i FEMM version 4.2

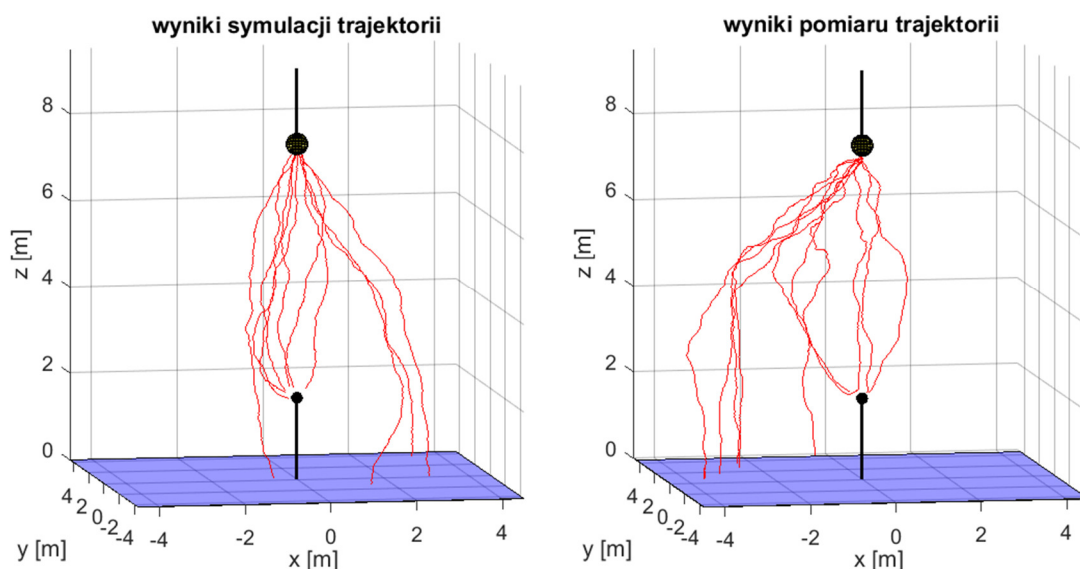
Dodatkową zaletą prowadzenia obliczeń w układzie dwuwymiarowym oraz zastosowania omówionych uproszczeń geometrycznych, jest możliwość zastosowania oprogramowania wykorzystującego znacznie mniejszą ilość zasobów obliczeniowych, co dodatkowo zwiększa wydajność modelu symulacyjnego. Na Rys. 6.11 przedstawiono wyniki obliczeń rozkładu potencjału elektrycznego uzyskane dla tego samego wyładowania przy wykorzystaniu dwóch programów symulacyjnych: COMSOL Multiphysics oraz Finite Element Method Magnetics (FEMM) [80-81].



Rys. 6.11 Porównanie wyników obliczeń rozkładu potencjału elektrycznego wykonanych w środowisku COMSOL Multiphysics i FEMM version 4.2

Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, że wprowadzenie uproszczeń geometrycznych nie wpłynęło znacząco na rozkład potencjału elektrycznego w badanym obszarze, natomiast znacznie przyspieszyło obliczenia, ponad sześciokrotnie skracając ich czas (Rys. 6.10d). Kolorem fioletowym oznaczono miejsca, w których względna różnica wartości potencjału elektrycznego przekracza 0,05%.

Na Rys. 6.12 pokazano porównanie wyników symulacji 10. wyładowań z wynikami pomiarów trajektorii 10. iskier długich uzyskanych w warunkach laboratoryjnych. Zaproponowana metoda symulacji wyładowań przestrzennych pozwala uzyskać populację iskier o zbliżonym rozkładzie kierunków wyładowania oraz kształcie trajektorii poszczególnych wyładowań. Widoczne jest również to, że część wyładowań trafia w uziemioną kulę, a część w podłogę.



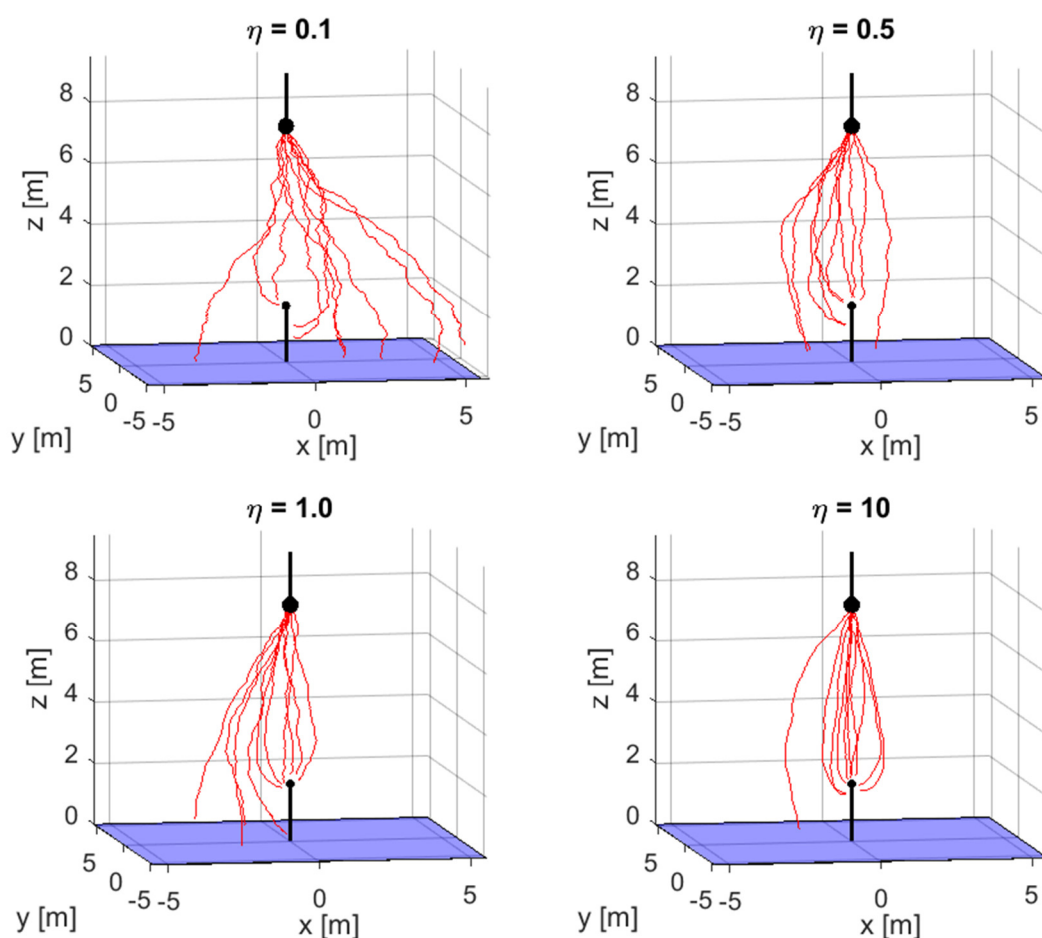
Rys. 6.12 Porównanie trajektorii wyładowań iskrowych uzyskanych w wyniku symulacji oraz pomiarów

6.4. Analiza symulacyjna parametrów opisujących trajektorię iskry długiej

6.4.1. Średni wymiar fraktalny

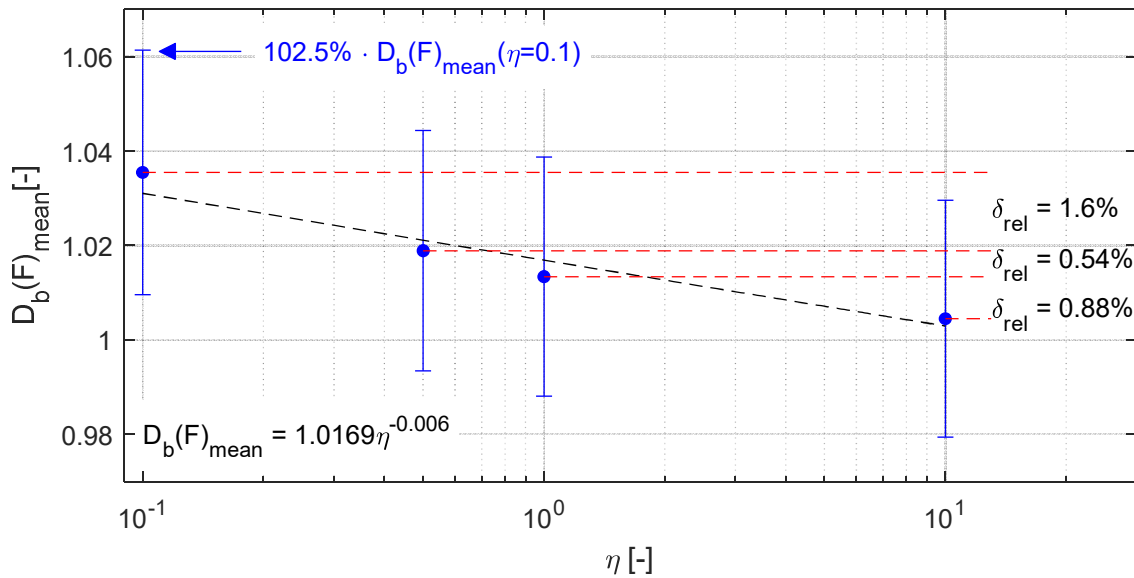
Na Rys. 6.13 przedstawiono wyniki symulacji uzyskane dla czterech różnych wartości współczynnika η . Dokonując oceny jakościowej, można zauważyć, że otrzymane populacje isker wyraźnie różnią się kształtem kanałów wyładowania. Jest to ważna obserwacja, pomimo że na tym etapie poczyniona w sposób wyłącznie jakościowy. W dalszym toku rozprawy okaże się bowiem, że stosowane do tej pory wskaźniki nie pozwalają na ilościowe rozróżnienie tak znacząco różniących się jakościowo przypadków.

Zgodnie z oczekiwaniami (patrz Rys. 6.4), wraz ze wzrostem wartości współczynnika η zmniejsza się prawdopodobieństwo gwałtownej zmiany kierunku rozwoju wyładowania, przez co struktura kanału staje się bardziej regularna. Oznacza to, że dla dużych η kanał wyładowania jest „gładki”, a dla małych η – „poszarpany”. Warto przy tym zauważyć, że zmniejszenie η prowadzi do zwiększenia prawdopodobieństwa wyładowania w płaszczyznę znajdującą poniżej uziemionej elektrody kulistej.



Rys. 6.13 Trajektorie wyładowań otrzymane dla czterech wybranych wartości współczynnika η

W standardowym modelu fraktalnym, uwzględniającym możliwość rozwoju gałęzi, wzrost współczynnika η prowadzi do zmniejszenia wymiaru fraktalnego wyładowania. Na Rys. 6.14 przedstawiono wyniki pomiaru wymiaru fraktalnego dla populacji iskier pokazanych na Rys. 6.13. Przyjęto, że wymiar fraktalny $D_b(F)_{mean}$ opisujący daną grupę wyładowań obliczany jest jako średnia wymiarów fraktalnych poszczególnych iskier wchodzących w skład danej grupy [62, 74]. Otrzymane wyniki pokazują oczekiwaną korelację pomiędzy współczynnikiem η a średnim wymiarem fraktalnym $D_b(F)_{mean}$. Istotnym jest spostrzeżenie, że pomimo zachowania właściwej tendencji ($\eta \uparrow \rightarrow D_b(F)_{mean} \downarrow$), różnice pomiędzy poszczególnymi wartościami $D_b(F)_{mean}$ są mniejsze, niż przyjęty błąd pomiaru, wynoszący 2,5%. Oznacza to, że stosowana dotychczas metoda doboru współczynnika η bazująca jedynie na ocenie średniego wymiaru fraktalnego, może być obciążona dużym błędem obliczeniowym. Okazuje się bowiem, że w przypadku wyładowań takich jak iskra długa, czyli nie posiadających silnie rozgałęzionego kanału wyładowania, nie istnieje wystarczająco silny związek pomiędzy kształtem kanału wyładowania, a średnim wymiarem fraktalnym. Stwierdzenie to stanowi pierwszą przesłankę dla potrzeby wykonania badań laboratoryjnych, które zostaną przedstawione w dalszej części rozprawy.

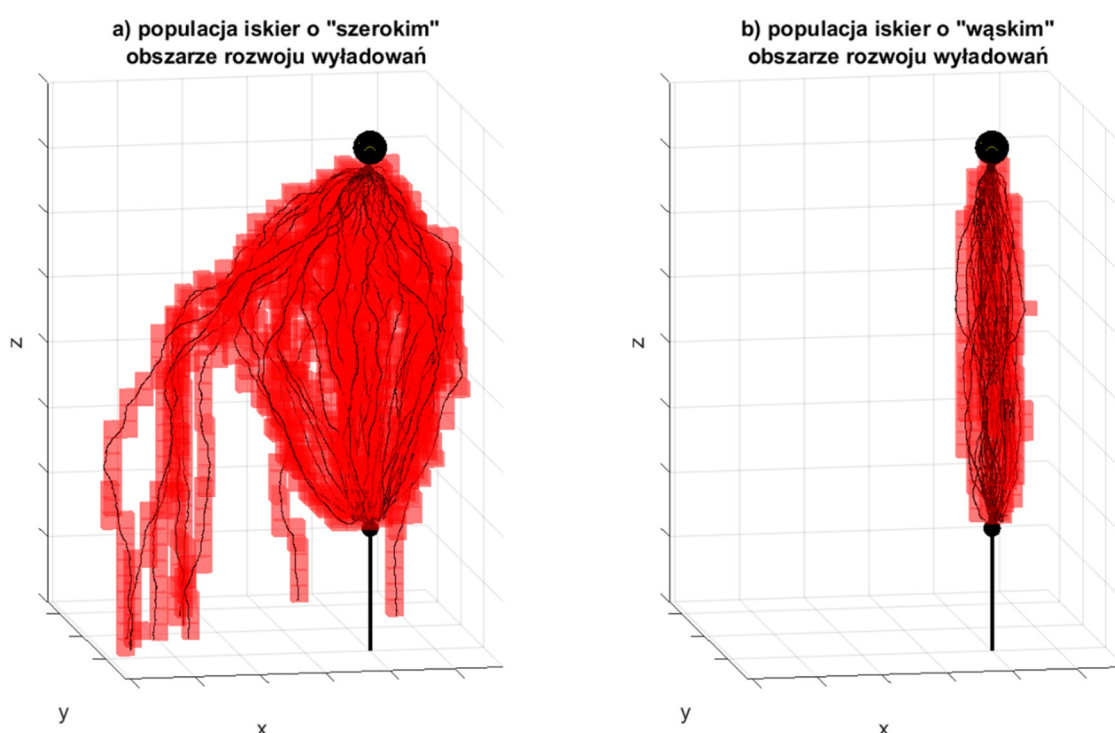


Rys. 6.14 Zależność między współczynnikiem η a średnim wymiarem fraktalnym $D_b(F)_{mean}$

6.4.2. Wymiar fraktalny populacji wyładowań

Rozwiązaniem, które mogłoby umożliwić wykorzystanie wymiaru fraktalnego jako wskaźnika opisującego geometrię symulowanych wyładowań jest zmiana sposobu jego obliczania.

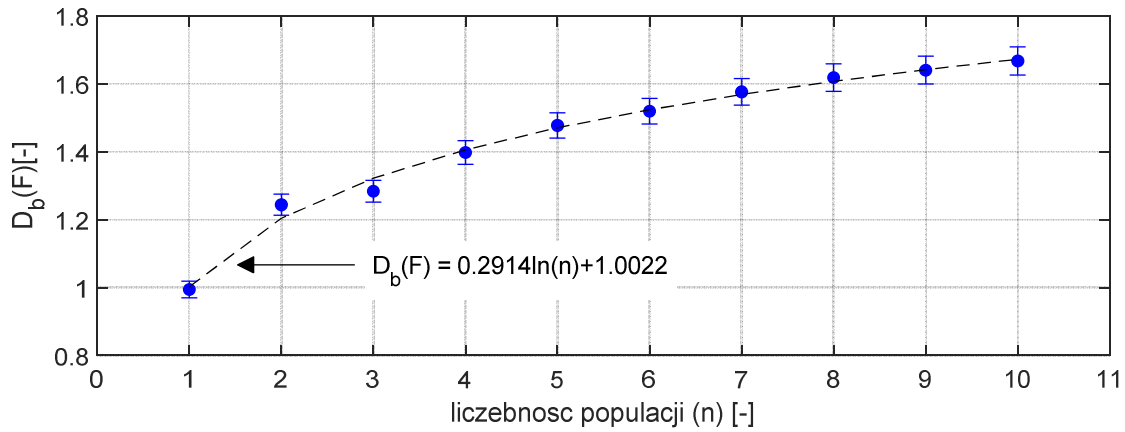
Przyjmując założenie, że wszystkie wyładowania otrzymane dla jednej wartości współczynnika η tworzą razem pewien osobny obiekt przestrzenny, możliwe jest wyznaczanie wymiaru fraktalnego tego obiektu. Na Rys. 6.15 zilustrowano sposób wyznaczania wymiaru fraktalnego dla dwóch populacji iskieł, charakteryzujących się różnym rozmiarem obszaru, w którym rozwijają się wyładowania. Obliczenie wymiaru fraktalnego całej populacji wyładowań wykonywane jest tak samo jak dla pojedynczej iskry. Różnica polega na tym, że wyznaczana jest tylko jedna wartość wymiaru fraktalnego dla całej populacji iskieł odpowiadającej danemu współczynnikowi η . Przedstawione podejście nie wymaga obliczania średniej arytmetycznej, co zmniejsza wpływ błędów statystycznych wynikających z rozrzutu wyników dla pojedynczych iskieł.



Rys. 6.15 Ilustracja sposobu wyznaczania wymiaru fraktalnego populacji wyładowań dla dwóch populacji iskieł, charakteryzujących się różnym rozmiarem obszaru, w którym rozwijają się wyładowania

Wykonane obliczenia pokazują, że wyznaczone w ten sposób wymiary fraktalne dla η równego 0,1 i 10 wykazują większą względną różnicę (4,5%) niż miało to miejsce w przypadku wartości średniej (względna różnica wynosząca niecałe 3%). Warto zaznaczyć, że w kontekście skuteczności klasyfikacji rodzaju wyładowania, wymiar fraktalny obliczany w zaprezentowany wyżej sposób okazuje się być tylko nieznacznie skuteczniejszym wskaźnikiem od wymiaru fraktalnego obliczanego jak wartość średnia wymiarów fraktalnych wszystkich iskieł tworzących badaną populację. Należy też zauważyć, że otrzymywane wyniki w dużym stopniu zależą od liczby wyładowań tworzących daną populację. Na Rys. 6.16 pokazano zależność pomiędzy

wymiarem fraktalnym $D_b(F)$ i liczebnością populacji n , dla której wymiar ten został określony. Charakter zmian wymiaru fraktalnego można w przybliżeniu aproksymować funkcją logarytmiczną, która dla η wynoszącego 0,5 przyjmuje w tym wypadku postać $D_b(F) = 0,2914 \cdot \ln(n) + 1,0022$ ($R^2 = 0,9917$). Oznacza to, że wpływ kolejnych iskier dodawanych do populacji maleje wraz ze wzrostem liczebności populacji i dzieje się tak dlatego, że każde kolejne wyładowanie w coraz mniejszym stopniu zmienia kształt całej struktury. Stwierdzenie to stanowi drugą (obok pierwszej przesłanki stwierdzającej, nie istnieje wystarczająco silny związek pomiędzy kształtem kanału wyładowania, a średnim wymiarem fraktalnym) przesłankę, uzasadniającą konieczność wykonania pomiarów laboratoryjnych, w celu potwierdzenia słuszności poczynionych obserwacji.



Rys. 6.16 Ilustracja wpływu liczebności populacji na wymiar fraktalny $D_b(F)$

6.4.3. Krętość

Parametrem, który pozwala opisać kształt kanału wyładowania jest krętość. Kąty opisujące krętość były dotychczas wykorzystywane do analizy danych pomiarowych. Na Rys. 6.17 przedstawiono model obliczeniowy stosowany do wyznaczania kątów krętości. W przyjętym modelu założono, że kanał wyładowania może być podzielony na szereg prostoliniowych, następujących kolejno po sobie segmentów $s_1, s_2, \dots, s_N$, gdzie N jest całkowitą liczbą segmentów. Każdy z segmentów można potraktować jako wektor znajdujący się w przestrzeni trójwymiarowej o współrzędnych X, Y, Z . Początek oraz koniec każdego z wektorów wyznaczają punkty $P_1, P_2, \dots, P_M$, gdzie $M = N+1$. Krętość trajektorii wyładowania określa się na podstawie trzech kątów.

Kąt α będący kątem pomiędzy kolejnymi segmentami wyznaczany jest na podstawie wzoru:

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{s_i \cdot s_{i+1}}{|s_i||s_{i+1}|}\right), \quad (6.3)$$

Przyjmuje się, że jego wartości zawierają się w przedziale od 0° do 180° .

Kąt θ określający nachylenie segmentu względem osi wyładowania wyznaczany jest na podstawie wzoru:

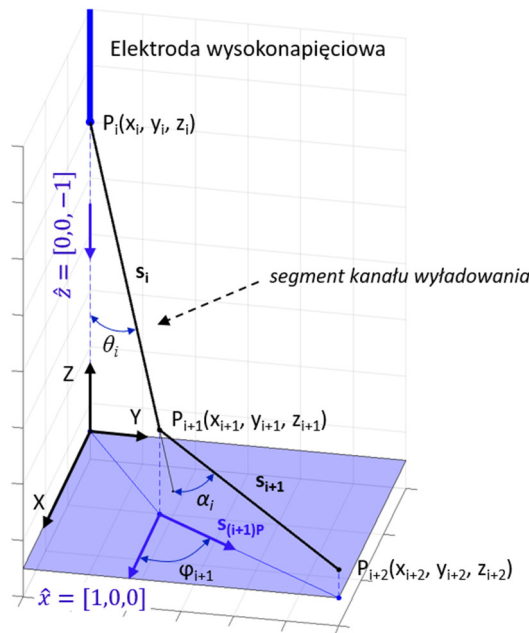
$$\theta_i = \arccos\left(\frac{s_i \cdot \hat{z}}{|s_i| |\hat{z}|}\right), \quad (6.4)$$

Przyjęto, że wartość kąta θ zawiera się w granicach od 0° do 90° gdy składowa z wektora s_i jest mniejsza od zera, oraz wartości od 90° do 180° gdy składowa z wektora s_i jest większa od zera.

Kąt φ pomiędzy rzutem segmentu kanału wyładowania na płaszczyznę odniesienia (tutaj XY), a wektorem kierunkowym jednej z osi płaszczyzny odniesienia (tutaj X) wyznaczany jest na podstawie wzoru:

$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{s_{iP} \cdot \hat{x}}{|s_{iP}| |\hat{x}|}\right), \quad (6.5)$$

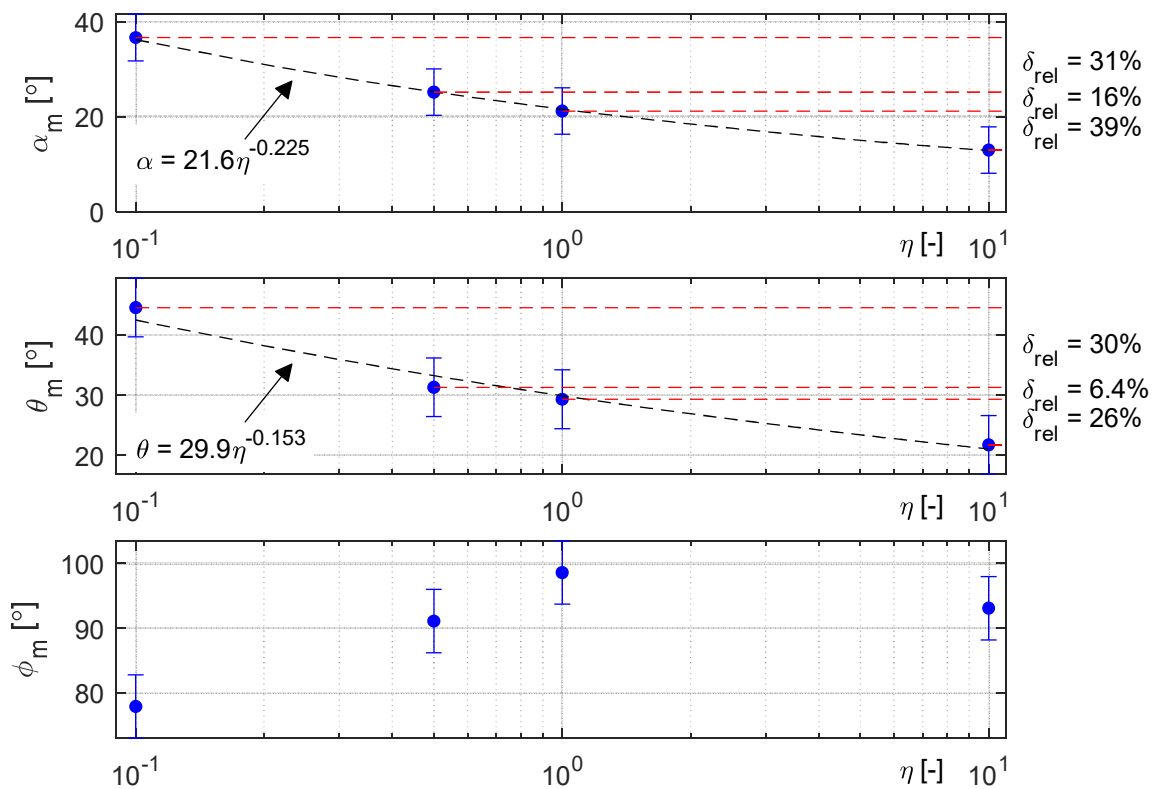
Przyjęto, że wartość kąta φ zawiera się w granicach od 0° do 180° gdy składowa y wektora s_i jest mniejsza od składowej y wektora s_{i+1} , oraz wartości od -180° do 0° gdy składowa y wektora s_i jest większa od składowej y wektora s_{i+1} .



Rys. 6.17 Model obliczeniowy stosowany podczas wyznaczania kątów krętości

Na Rys. 6.18 pokazano wyniki obliczeń kątów krętości dla 4 populacji isker przedstawionych na Rys. 6.13. Niebieskimi kropkami (●) oznaczono średnią wartość danego kąta dla określonego współczynnika η . Natomiast słupki błędów odpowiadają niepewności pomiaru krętości, wynoszącej $4,9^\circ$ [10]. W przypadku kątów α_m i θ_m można zauważyć, że krętość maleje wraz ze wzrostem η . Podobnie jak dla wymiaru fraktalnego zależność między krętością a współczynnikiem η opisuje funkcja wykładnicza. Różnica polega jednak na tym, że względna zmiana

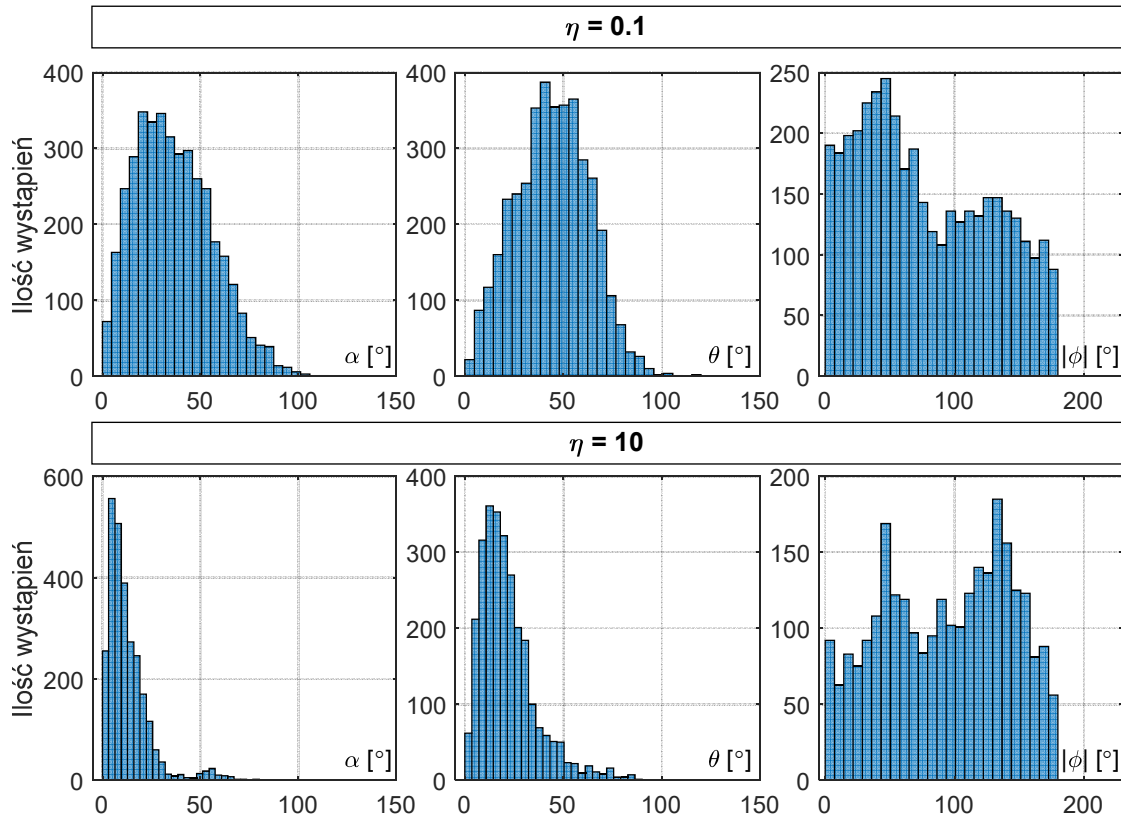
wymiaru fraktalnego pomiędzy poszczególnymi punktami obliczeniowymi nie przekraczała 2%, gdzie w odniesieniu do krętości różnice te są znacznie większe. Oznacza to, że w przypadku modelu pomijającego możliwość rozwoju gałęzi krętość pozwala na dokładniejsze opisanie związku między współczynnikiem η a kształtem kanału wyładowania (krętość cechuje się większą wrażliwością na zmianę geometrii kanału wyładowania niż wymiar fraktalny), co sugeruje, że w przypadku iskry długiej krętość jest parametrem dającym możliwość skuteczniejszej klasyfikacji rodzaju wyładowania. Obserwacja ta stanowi kolejną przesłankę sugerującą potrzebę wykonania pomiarów laboratoryjnych, które mogłyby potwierdzić słuszność wniosków sformułowanych na podstawie wykonanych symulacji. Należy jednak zauważyć, że zaobserwowane zjawisko dotyczy tylko kątów α_m i θ_m . W przypadku kąta ϕ_m , zależność $\phi_m = f(\eta)$ nie jest funkcją monotoniczną, a wartość ϕ_m nie jest jednoznacznie powiązana z geometrią kanału wyładowania.



Rys. 6.18 Wyniki obliczeń kątów krętości dla czterech populacji iskieł przedstawionych na Rys. 6.13

Kąty opisujące krętość są wyznaczone na jako średnia arytmetyczna dla wszystkich kolejno następujących po sobie segmentów tworzących iskry danej populacji wyładowań. Na Rys. 6.19 pokazano rozkład częstości występowania poszczególnych kątów dla dwóch skrajnych przypadków wartości η wynoszących 0,1 i 10. Wyniki uzyskane dla całych populacji wyładowań potwierdzają wnioski sformułowane powyżej na podstawie analizy wykonanej dla

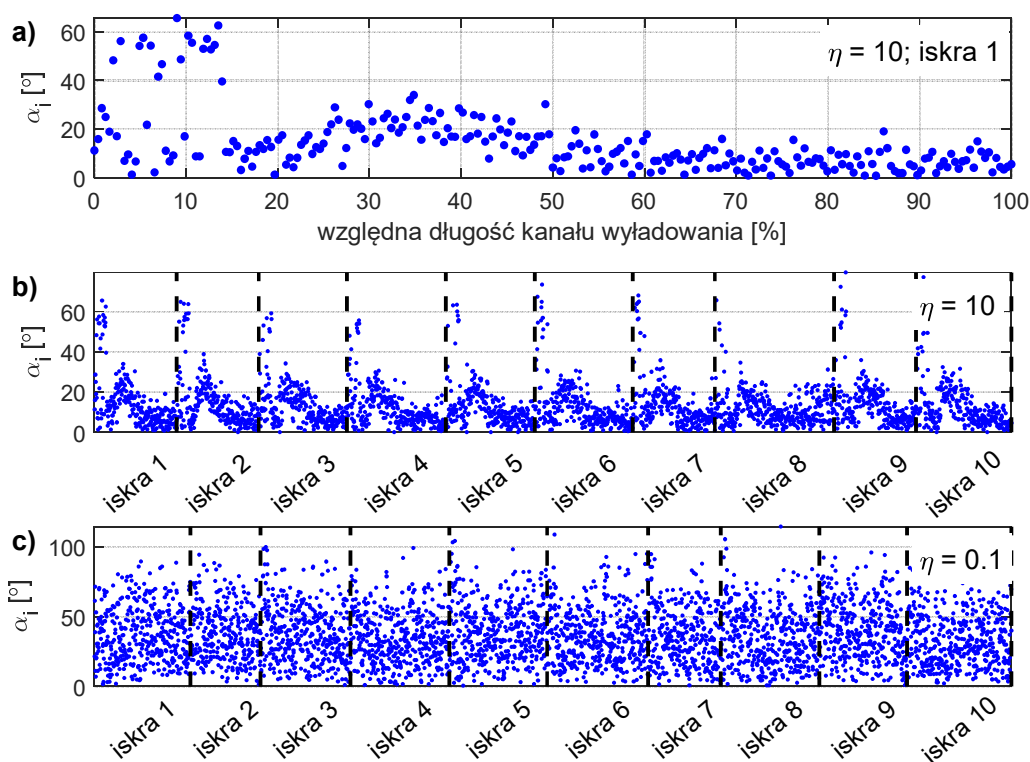
pojedynczego segmentu (Rys. 6.4) wskazujące, że wzrost η zmniejsza prawdopodobieństwo nagłej zmiany kierunku wyładowania. Zgodność pomiędzy założeniami, jakie zostały przedstawione w Rozdziale 4.1, a wynikami przedstawionymi na Rys. 6.18, stanowią zatem uzasadnienie do stwierdzenia, że zaproponowane modyfikacje modelu fraktalnego nie wprowadzają zmian mogących skutkować nieprawidłowym działaniem tego modelu w zastosowaniu do badań iskry długiej.



Rys. 6.19 Rozkład częstości występowania poszczególnych kątów dla dwóch skrajnych przypadków wartości η wynoszących 0,1 i 10

To w jaki sposób wartość współczynnika η wpływa na kształt trajektorii można również zauważyć analizując wykresy przedstawiające rozkład kątów krętości wzdłuż kanału wyładowania. Na Rys. 6.20 (a) pokazano przykładowo jak zmienia się wartość kąta α_i w zależności od pozycji segmentów w kanale wyładowania dla jednej z isker ($\eta = 10$). Przyjęto, że punkt 0% odpowiada początkowi kanału wyładowania znajdującemu się na elektrodzie wysokonapięciowej. Wyniki obliczeń pokazują, że w przypadku isker o względnie dużej krętości ($\eta = 0,1$ - Rys. 6.20 (c)) nie istnieje związek między krętością a odległością od początku kanału wyładowania. Dla każdej iskry niezależnie od pozycji segmentów kąty α_i rozkładały się równomiernie w całym paśmie zmienności. Sytuacja wygląda jednak inaczej w przypadku wyładowań charakteryzujących się mniejszą krętością. Analizując wyniki pokazane na Rys. 6.20 (b) można

zauważyć, tendencję polegającą na zwiększonej krętości na początku kanału wyładowania. Zjawisko to było już przedmiotem badań opisanych w literaturze [82] i może to oznaczać, że na początkowym etapie rozwoju iskry długiej prawdopodobieństwo nagłej zmiany kierunku wyładowania jest niezależne od wypadkowej krętości całej trajektorii (zakres potencjalnych kierunków rozwoju wyładowania na początkowym etapie jest taki sam dla iskieł o *małej* i *dużej* krętości). Sprawdzenie, czy podobne zjawisko występuje w przypadku rzeczywistych wyładowań, stanowi czwartą przesłankę wypływającą z badań symulacyjnych, uzasadniającą potrzebę wykonania pomiarów laboratoryjnych.



Rys. 6.20 Rozkład kątów krętości wzdłuż kanału wyładowania: a) rozkład kąta α dla pierwszej z populacji wyładowań uzyskanych dla współczynnika $\eta = 10$, b) rozkład kąta α dla 10 iskieł z populacji wyładowań uzyskanych dla współczynnika $\eta = 10$, c) rozkład kąta α dla 10 iskieł z populacji wyładowań uzyskanych dla współczynnika $\eta = 0,1$

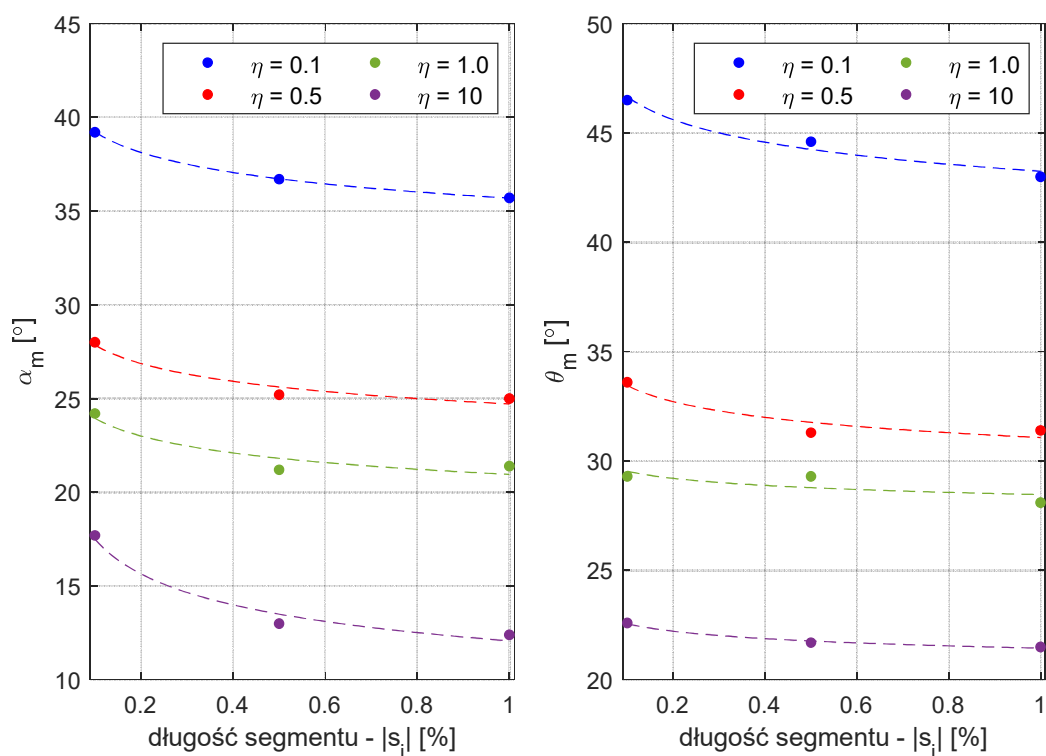
6.4.4. Długość segmentu

Badania pomiarowe dotyczące analizy krętości iskry długiej pokazują, że wartości obliczanych kątów w dużym stopniu zależą od długości segmentów z jakich składa się kanał wyładowania [59, 61]. W idealnym przypadku długość ta powinna być tak dobrana, aby odzwierciedlała naturalne zmiany kierunku kanału wyładowania. Niestety obecnie nie istnieją metody pozwalające na dokładne wyznaczenie tak zdefiniowanej długości segmentu [61]. W przypadku badań symulacyjnych wykorzystujących model fraktalny, długość segmentów jest również bardzo istotnym parametrem. Wpływa ona nie tylko na wyniki symulacji, ale także determinuje sposób

określania innych parametrów modelu, takich jak krytyczne natężenia pola E_{cr} oraz współczynnik η [52], co pokazuje, że wykonanie analizy długości segmentów, może w istotny sposób wzbogacić zdolności modeli fraktalnych.

W większości dostępnych prac z zakresu modelowania fraktalnego długość segmentu obliczeniowego dobierana jest w sposób arbitralny przy wykorzystaniu różnych kryteriów. Najczęściej kryteria te opierają się na danych pomiarowych (przykładem mogą być symulacje wyładowań piorunowych, gdzie wykorzystywane są wyniki pomiarów określające długość skoku lidera [17, 32]) lub wynikają ze zdolności obliczeniowych wykorzystywanych narzędzi [52] (długość segmentu w dużym stopniu wpływa na czas wykonywania obliczeń – im krótszy segment tym potrzeba więcej czasu oraz zasobów obliczeniowych do symulacji wyładowania).

Niezależnie od przyjętego podejścia długość segmentów obliczeniowych jakie stosowano dotychczas w badaniach symulacyjnych zawierała się granicach od 0,05% do 5% długości przerwy iskrowej [17, 32, 37, 39, 52] (jako długość przerwy iskrowej przyjęto odległość między dwoma punktami układu charakteryzującymi się największą różnicą potencjału elektrycznego). W badaniach pomiarowych związanych z analizą krętości przyjmowano natomiast, że długość segmentów zawiera się w zakresie od 0,25% do 0,84% długości przerwy iskrowej [59-61]. Na Rys. 6.21 pokazano wpływ długości segmentu na wartości kątów α_m i θ_m .



Rys. 6.21 Wpływ długości segmentu na wartości kątów α_m i θ_m

Obliczenia wykonano dla trzech stałych długości segmentów wynoszących 0,1%, 0,5% oraz 1%. Uzyskane wyniki pokazały, że zwiększanie długości segmentu prowadzi do spadku wartości kątów α_m i θ_m . W prawie wszystkich przeanalizowanych przypadkach zależność tą można aproksymować funkcją potęgową otrzymując dobre ($R^2 > 0,8$) lub bardzo dobre ($R^2 > 0,9$) dopasowanie danych. Widoczne jest jednak też występowanie pewnych punktów, dla których opisana zależność nie występuje (Rys. 6.21 - wykres $\theta_m = f(|s_i|)$ dla $\eta = 1,0$ gdzie $R^2 = 0,532$).

W wykonanej analizie przyjęto, tak jak w większości obecnie dostępnych badań, że długość segmentu w trakcie symulacji całego wyładowania jest stała (dotyczy to też wszystkich wyładowań w danej populacji). Rozwój kanału wyładowania jest jednak determinowany przez szereg czynników losowych. W takich warunkach można się zatem spodziewać, że kanał wyładowania nie będzie rozwijał się w równych ściśle określonych skokach. Założenie to było wykorzystywane w badaniach wyładowań piorunowych, gdzie przyjmowano, że długość segmentów obliczeniowych jest zmienna i zawiera się najczęściej w granicach o 10 m do 100 m [17, 32]. Wartości te zostały określone na podstawie pomiarów rzeczywistych wyładowań piorunowych. W przypadku iskry długiej prace dotyczące pomiarów parametrów trajektorii wyładowania a także te związane modelowaniem fraktalnym, nie określają zarówno zakresu zmian długości segmentów, jak i metod umożliwiających ich pomiar.

Analizując wyniki przeprowadzanych obliczeń można zauważyć, że ocena wpływu długości segmentu nie jest do końca jednoznaczna. Zaobserwowane zależności, choć są stosunkowo wyraźne, nie są jednak jednoznaczne (z jednej strony zmiany długości segmentu wpływają na wartości kątów opisujących krętość, ale zmiany te są jednocześnie bardzo subtelne, gdyż zmiany poszczególnych kątów wynoszą zaledwie kilka stopni). Dodatkowo nie rozwiązaniem pozostaje problem zmienności długości segmentu, zwłaszcza w powiązaniu z wynikami jakościowej oceny trajektorii wyładowania. W związku z tym autor stawia tezę, że uzasadnionym jest wykonanie pomiarów laboratoryjnych oraz opracowanie metod analizy ich wyników, umożliwiających podział kanału wyładowania na segmenty, których długość w możliwie najlepszy sposób odzwierciedla naturalną zmienność geometrii kanału wyładowania.

6.5. Podsumowanie

Przeprowadzone symulacje wykazały, że zaproponowana modyfikacja modelu fraktalnego, polegająca na redukcji możliwości tworzenia gałęzi, pozwala na symulację wyładowań iskrowych o długości rzędu kilku metrów. Wykazano, że w przypadku układów symetrycznych istnieje możliwość wykonania symulacji w układzie dwuwymiarowym i konwersji uzyskanych

wyników do układu trójwymiarowego. Przedstawiona metoda symulacji wyładowań trójwymiarowych umożliwiła skrócenie czasu potrzebnego na wykonanie obliczeń oraz w znacznym stopniu zmniejszyła moc obliczeniową konieczną do wykonania takich badań. Dzięki temu zwiększono możliwości wykorzystania modelowania fraktalnego, do celów przemysłowych takich jak chociażby ocena wytrzymałości elektrycznej istniejących lub nowoprojektowanych napowietrznych układów izolacyjnych.

Wyniki symulacji wykonanych dla kilku wybranych wartości parametrów modelu, zostały wstępnie porównane z wynikami pomiarów laboratoryjnych. Ocena jakościowa polegająca na porównaniu kształtu oraz kierunku rozwoju wyładowań wykazała dużą zgodność otrzymanych wyników z wynikami wynikającymi z obserwacji rzeczywistych wyładowań iskrowych. Analiza parametryczna wykazała natomiast, że wymiar fraktalny iskry długiej, tworzonej wyłącznie przez główny kanał wyładowania, tylko w niewielkim stopniu zależy od kształtu kanału wyładowania i jest praktycznie stały w granicach przyjętego błędu pomiaru. Oznacza to, że stosowana dotychczas metoda doboru parametrów modelu fraktalnego opierająca się niemal wyłącznie na wymiarze fraktalnym, może nie mieć zastosowania w przypadku symulacji iskry długiej. Pewnym rozwiązaniem jest zmiana sposobu liczenia wymiaru fraktalnego, polegająca na potraktowaniu całej populacji iskieł jako jednego obiektu przestrzennego. Wyniki obliczeń wykazały, że takie podejście pozwala uzyskać większą wrażliwość wymiaru fraktalnego na zmianę kierunku rozwoju kanału wyładowania. Zauważono jednak, że tak zdefiniowany wymiar fraktalny jest w dużym stopniu uzależniony od liczebności populacji iskieł. Rodzi to pytanie jaki wpływ ma ilość wyładowań na wymiar fraktalny oraz w jaki sposób ilość tych wyładowań związana z kształtem trajektorii iskieł.

Wykonane badania wykazały, że dużo większe możliwości w kontekście klasyfikacji wyładowań pod kątem kształtu trajektorii daje parametr jakim jest krętość. Obserwacja ta pozwala sądzić, że wyładowania iskrowe będące następstwem różnych rodzajów przepięć o różnych biegunowościach będą się cechowały innymi wartościami kątów opisujących krętość.

Przeprowadzone badania zostały wykonane w oparciu o założenie, że kanał wyładowania a dokładnie jego trajektoria, zdefiniowany jest jako zbiór kolejno połączonych ze sobą punktów. Podstawową jednostką tak zdefiniowanego kanału wyładowania jest segment, będący odcinkiem łączącym dwa kolejne punkty. Aktualnie zarówno w badaniach pomiarowych i jak i symulacyjnych nie określono wyraźnych kryteriów doboru jego długości. Może to stanowić pewien problem, gdyż jak wykazano, długość segmentu ma wpływ na kształt kanału wyładowania

i parametry wykorzystane do opisu trajektorii. Dodatkowo brak spójnych kryteriów dotyczących doboru długości segmentów może utrudniać porównywanie wyników symulacji wykonywanych przez różne zespoły badawcze. Sprawę komplikuje także fakt, że nie ma również zgody co do tego, czy długość segmentu powinna być stała czy też może zmienia się ona w zależności od pozycji segmentu w kanale wyładowania i jeżeli się zmienia to w jakim zakresie oraz w jaki sposób.

Zaobserwowane zjawiska wymagają zatem sprawdzenia polegającego na pomiarze parametrów opisujących trajektorię wyładowania iskrowego. W tym celu proponuje się przeprowadzenie pomiarów w warunkach laboratoryjnych.

Dzięki wykonanym badaniom symulacyjnym sformułowano następujące wnioski:

1. Zaproponowano modyfikację modelu fraktalnego pozwalającą na symulacje wyładowań iskrowych o różnym stopniu krętości głównego kanału wyładowania;
2. Zaproponowano nową metodę symulacji wyładowań w przestrzeni trójwymiarowej, bazującej na rekonstrukcji przestrzennego kanału wyładowania na podstawie symulacji wykonanych w układzie dwuwymiarowym;
3. Zaproponowano nowy sposób wyznaczania wymiaru fraktalnego, oparty na założeniu, że populacja wyładowań tworzy jeden obiekt przestrzenny;
4. Zaproponowano sposób analizy wyników symulacji wykorzystujący parametry, które nie były dotychczas stosowane w badaniach symulacyjnych (kąty opisujące krętość, wymiar fraktalny populacji wyładowań);
5. Wykonano wstępne badania symulacje przy wykorzystaniu zaproponowanego modelu symulacyjnego oraz zaproponowanej metody symulacji wyładowań w przestrzeni trójwymiarowej;
6. Wykonano analizę wyników symulacji, na podstawie których zaobserwowano możliwość występowania zjawisk nie odnotowywanych dotychczas w literaturze.

Powyższe wyniki stanowią przesłanki uzasadniające potrzebę wykonania pomiarów laboratoryjnych oraz rozwoju metod analizy wyników pomiarów.

Część III

Pomiary laboratoryjne iskry długiej

7. Przegląd badań pomiarowych trajektorii iskry długiej

7.1. Wprowadzenie

Mechanizm rozwoju wyładowania, a tym samym pośrednio również trajektoria iskry długiej, są uzależnione zarówno od rodzaju udaru (piorunowy lub łączeniowy) jak i jego biegunowości [2]. Sugeruje to, że może istnieć związek pomiędzy parametrami modelu fraktalnego, a rodzajem oraz biegunowością iskry długiej. O ile w przypadku biegunowości literatura podaje sposób powiązania modelu poprzez określenie właściwej wartości krytycznego natężenia pola elektrycznego E_{cr} , o tyle w przypadku rodzaju udaru nie określono takich zależności.

Jednakże wykonane symulacje wskazują, że istnieje możliwość określenia związku pomiędzy parametrami modelu, a wielkościami opisującymi trajektorię (parametrami tymi są wymiar fraktalny i krętość). Tym samym wyniki pomiarów laboratoryjnych, wykonanych dla wyładowań o możliwe zróżnicowanych trajektoriach, mogą być pomocne w określeniu np. zakresu zmienności poszczególnych parametrów używanych do opisu kanału wyładowania iskry długiej.

Obecnie prowadzonych jest wiele prac dotyczących badań mechanizmu rozwoju iskry długiej [21, 59-62, 67, 74, 83-86], z których znaczna część skupia się na analizie cech geometrii kanału wyładowania [59-62, 74]. W przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy pomiarach posługiwano się głównie dwoma opisanymi już wielkościami, tj. wymiarem fraktalnym oraz krętością, ponieważ to właśnie te wielkości są typowo wykorzystywane do opisu trajektorii iskry długiej. Dodatkowo, wprowadzono również analizę długości segmentu obliczeniowego, ponieważ wielkość ta jest ściśle powiązana z krętością oraz kształtem trajektorii wyładowania, a analiza tej wielkości zdaniem autora nie znalazła wystarczającego odzwierciedlenia w literaturze.

7.2. Wymiar fraktalny

Wyniki najnowszych badań w zakresie pomiarów wymiaru fraktalnego iskry długiej zostały przedstawione w [62, 74]. W pracy [62] dokonano analizy wyładowań wygenerowanych w układzie ostrze-płyta o długości przerwy iskrowej wynoszącej 500 mm. Jako źródło wyładowań wykorzystano napięcie udarowe o biegunowości dodatniej oraz ujemnej. Autorzy pracy [62] nie podają, czy zastosowano udary piorunowe, czy łączeniowe („Long sparks were generated by applying an impulse voltage”), natomiast bazując na doświadczeniu autora niniejszej rozprawy można przypuszczać, że chodzi o udary łączeniowe, ponieważ dla udarów piorunowych

nie są spodziewane wyładowania iskrowe dla przerwy o długości 0,5 m i wartości szczytowej napięcia udaru mniejszej niż 100 kV. Wartość szczytowa generowanych udarów nie przekraczała 100 kV. W trakcie badań przeanalizowano 18 wyładowań. Wymiar fraktalny został wyznaczony w oparciu o obrazy przedstawiające kanał wyładowania. Do uzyskania tych obrazów wykorzystano trzy zsynchronizowane ze sobą aparaty fotograficzne, co pozwoliło na uzyskanie łącznie 54 zdjęć (po trzy zdjęcia dla każdego wyładowania). Podczas analizy danych pomiarowych wykorzystywano wyłącznie obrazy dwuwymiarowe. Możliwość obserwacji kanału wyładowania pod różnymi kątami pozwoliła na ocenę występowania zależności pomiędzy wymiarem fraktalnym a kierunkiem obserwacji iskry długiej. Przedstawione w pracy [62] wyniki pomiarów w pewnym zakresie potwierdzają obserwacje wynikające z przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy symulacji. Zauważono bowiem, że wymiar fraktalny obliczany jako wartość średnia wymiarów fraktalnych wszystkich iskier wytworzonych w określonych warunkach (ten sam układ elektrod, biegunowość oraz wartość szczytowa napięcia) tylko w nieznacznym stopniu zależy od kształtu kanału wyładowania. Należy jednak zauważyć, że, tak jak zaznaczają sami autorzy, wnioski te są słuszne wyłącznie w odniesieniu do wyładowań o długości około 500 mm, powstałych przy wykorzystaniu napięć nie przekraczających 100 kV. Stanowi to kolejną przesłankę dla potrzeby wykonania dodatkowych pomiarów.

Badania wymiaru fraktalnego znacznie dłuższych wyładowań, o długościach około 6 m do 8 m, przedstawiono w pracy [74]. Do wytworzenia tak długich iskier wykorzystano udary łączeniowe oraz piorunowe obu biegunowości, o wartościach szczytowych od około 2 MV do około 4 MV. Podobnie jak w [62] dokonano pomiaru wymiaru fraktalnego w oparciu o zdjęcia wykonane stacjonarnymi aparatami fotograficznymi. Każde wyładowanie było obserwowane w dwóch prostopadłych do siebie płaszczyznach. Dodatkowo wykonano pomiary wykorzystujące tzw. kamerę szybką, co umożliwiło ocenę tego, w jaki sposób zmienia się wymiar fraktalny w trakcie kolejnych etapów rozwoju wyładowania. Najważniejszym wnioskiem płynącym z wykonanych badań jest stwierdzenie, że wymiar fraktalny jest w istocie zależny zarówno od rodzaju udaru, jak i od jego biegunowości. Należy jednak zauważyć, że podobnie jak w pracy [62], wymiar fraktalny został w pracy [74] wyznaczony na podstawie przetworzonych dwuwymiarowych zdjęć. Jak zauważyli autorzy pracy [74], tego typu podejście może być obciążone istotnymi błędami, gdyż, jak stwierdzono w pracy [74], wymiar fraktalny jest zależny od kierunku obserwacji kanału wyładowania, a tym samym dokładniejsze wartości wymiaru fraktalnego można uzyskać dokonując analizy przestrzennego kanału wyładowania.

Poza kwestiami związanymi z długością, rodzajem wyładowania oraz aspektem kierunku obserwacji i wymiarowości przestrzeni obliczeniowej, innym istotnym zagadnieniem jest również sposób analizy danych pomiarowych, na podstawie której dokonywane są obliczenia wymiaru fraktalnego. W obu omówionych wyżej pracach, [62, 74], wymiar fraktalny wyznaczono w oparciu o założenie, że badana iskra jest obiektem składającym się ze zbioru punktów (pikseli) znajdujących się wewnątrz kanału wyładowania. Takie założenie rodzi szereg problemów związanych przykładowo z techniką wykonywania fotografii lub efektami wynikającymi z rozświetlenia kanału wyładowania, wpływających na jego „pozorną grubość”. Szczególnie istotnym problemem jest brak możliwości bezpośredniego porównania wyników pomiarów z wynikami symulacji, ponieważ wynikiem badań symulacyjnych jest kanał wyładowania w postaci nie pikseli, a nieskończenie cienkich segmentów.

7.3. Krętość kanału wyładowania

Problemy związane ze sposobem określenia kanału wyładowania nie występują w przypadku badań dotyczących analizy krętości. Podobnie jak dla wymiaru fraktalnego, badania krętości wykonywane są w oparciu o zdjęcia wyładowań, jednak ze względu na sposób zdefiniowania kątów opisujących krętość, podczas analizy wyników fotografie są dodatkowo przetwarzane, dzięki czemu wyniki pomiarów oraz symulacji posiadają taką samą postać wektorów danych opisujących współrzędne przestrzenne.

Pomiary krętości trajektorii iskry długiej zostały opisane przykładowo w pracy [61]. Badania zaprezentowane w pracy [61] zostały wykonane w tym samym układzie oraz dla takich samych napięć, jak miało to miejsce w przypadku pomiaru wymiaru fraktalnego opisanego w pracy [62]. Do analizy krętości, w pracy [61] wykorzystano zaledwie 9 wyładowań, co może sugerować, że wyniki mogą być obciążone błędami ze względu na zbyt małą liczebność populacji. Krętość kanału wyładowania została w pracy [61] przeanalizowana na podstawie dwóch kątów zdefiniowanych na płaszczyźnie dwuwymiarowej (kąta pomiędzy kolejnymi segmentami oraz kąta pomiędzy segmentami, a osią wyładowania). W wyniku badań przedstawionych w pracy [61] wykazano, że krętość trajektorii jest w zależna od biegunowości wyładowania. Na potrzeby symulacji iskry długiej wykorzystujących model fraktalny, wykonywanych na potrzeby niniejszej pracy, wyniki badań opisane w [61] są niewystraszające, ponieważ dotyczą one iskieł o zbyt małej długości, a jednocześnie badane w tej pracy populacje iskieł były zbyt mało liczne.

W pracy [61] zwrócono również uwagę, że podobnie jak w przypadku symulacji, krętość kanału jest powiązana z długością segmentów, na które podzielono iskrę. Wykazano, że zarówno zbyt

małe, jak i zbyt duże długości segmentów mogą prowadzić do wzrostu błędów, z jakimi określone są kąty krętości. Zagadnie wpływu długości segmentów zostało również omówione w pracy [59], w której to dokonano analizy krętości wyładowań o długości od około 7 m do około 8 m, wygenerowanych przy wykorzystaniu udarów łączeniowych o biegunowości dodatniej i wartości szczytowej w zakresie od 2,0 MV do 2,5 MV. Zatem badania te dotyczyły tylko jednego rodzaju wyładowań. Do rejestracji trajektorii w [59] wykorzystano dwa aparaty fotograficzne, umożliwiające obserwację kanału wyładowania w dwóch wzajemnie prostopadłych do siebie płaszczyznach, co umożliwiło rekonstrukcję przestrzennego przebiegu trajektorii. Jednym z wniosków postawionych przez autorów badań [59], było stwierdzenie, że zmniejszenie długości segmentów prowadzi do spadku wartości kątów α_i , co sugeruje konieczność stosowania większych długości, niż te wynikające z rozdzielczości wykorzystanych aparatów fotograficznych. Z drugiej strony zwrócono uwagę [59], że zastosowanie zbyt dużych segmentów może prowadzić do utraty części informacji o krętości trajektorii, a tym samym wprowadzić dodatkowe błędy pomiaru.

Wyniki badań krętości iskier powstałych w wyniku oddziaływania udarów łączeniowych o biegunowości dodatniej zostały również przedstawione w pracy [60]. Pokazano tam wyniki analizy krętości wyładowań o długości około 3 m, powstałych w układzie ostrze-płyta i wygenerowanych przy wykorzystaniu udarów łączeniowych o wartości około 1021 kV. Sposób rejestracji wyładowań oraz rekonstrukcji przestrzennego rozkładu wyładowania i jego ewolucji w czasie, został wykonany w oparciu o metodę opisaną w [59]. Jednakże w odróżnieniu od badań przedstawionych w pracy [59], autorzy pracy [60] przeanalizowali krętość kanału wyładowania jednocześnie na płaszczyźnie dwuwymiarowej (tak jak w pracy [61]) oraz w przestrzeni trójwymiarowej (tak jak w pracy [62]). W obu przypadkach długość segmentów obliczeniowych została dobrana arbitralnie, bez podania przyjętych kryteriów.

7.4. Podsumowanie

Na podstawie omówionych wyników badań trajektorii rozwoju iskry długiej, opublikowanych w pracach [59-62,74], nie jest możliwa pełna interpretacja wyników symulacji wykorzystujących modelowanie fraktalne. Chodzi w szczególności o następujące przesłanki, omówione w Rozdziale 6.4: 1) nie istnieje wystarczająco silny związek pomiędzy kształtem kanału wyładowania, a średnim wymiarem fraktalnym, 2) związek pomiędzy wymiarem fraktalnym, a liczebnością populacji maleje wraz ze wzrostem liczebności populacji i dzieje się tak dlatego, że każde kolejne wyładowanie w coraz mniejszym stopniu zmienia kształt całej struktury

tworzonej przez badane wyładowania, 3) krętość cechuje się większą wrażliwością na zmianę geometrii kanału wyładowania niż wymiar fraktalny, 4) wartość kąta φ_m nie jest jednoznacznie uzależniona o geometrii kanału wyładowania, 5) zakres potencjalnych kierunków rozwoju wyładowania na początkowym etapie rozwoju wyładowania jest taki sam dla iskier o małej i dużej krętości. W przypadku wymiaru fraktalnego, problemem jest brak danych w literaturze o wartości tego parametru dla iskier będących obiektami przestrzennymi. Nie mniej istotny jest również sposób obliczania wymiaru fraktalnego, który w cytowanych pracach [62, 74] opiera się wyłącznie na analizie obrazów, pomijając kwestię wyznaczania trajektorii, co, jak powyżej wspomniano, nie daje możliwości bezpośredniego porównania wyników pomiarów z wynikami badań symulacyjnych.

Problem sposobu określenia danych wejściowych nie dotyczy pomiarów krętości, jednakże w przypadku tej wielkości dostępne w literaturze dane pomiarowe również nie są kompletne. Przede wszystkim należy zauważyć, że opublikowane dotychczas badania skupiały się niemal wyłącznie na analizie wyładowań będących następstwem oddziaływania udarów łączeniowych, głównie o biegunowości dodatniej. Brak jest zatem danych opisujących krętość iskier o biegunowości ujemnej, jak również tych wytwarzanych przez udary piorunowe. Znaczący jest również brak jednoznacznych kryteriów doboru długości segmentu, co ma bardzo duży wpływ na otrzymywane wyniki. W każdym z dostępnych badań [59-62], długość segmentów była dobierana w inny sposób, co może utrudniać wzajemne porównywanie wyników pomiędzy różnymi rodzajami wyładowań czy warunkami wykonywania pomiarów. Dodatkowo, przyjmowano założenie stanowiące, że długość segmentu jest stała, co jak pokazują wnioski płynące z opisanych w części II badań autora niniejszej rozprawy, może prowadzić do istotnych błędów w interpretacji danych pomiarowych. Kanał wyładowania na całej swojej długości cechuje się różnym stopniem krętości. Tym samym segment odpowiedni dla fragmentu o wysokiej zmienności może się okazać zbyt krótki dla obszarów kanału charakteryzujących się mniejszą dynamiką zmian kierunku. Z drugiej strony, zwiększenie długości segmentu może doprowadzić do utraty części informacji w przypadku fragmentów kanału, gdzie kierunek wyładowania charakteryzuje się większą zmiennością.

Dodatkowo, niemal każde z dostępnych w literaturze badań pomiarowych, było wykonane przy wykorzystaniu innego układu elektrod oraz innej długości przerwy iskrowej. W związku z tym, analizując wyniki, nie można wykluczyć wpływu jaki miał na nie rozkład pola elektrycznego, uzależnionego od geometrii badanego układu. Brak dostępności wyników kompleksowych

badan opisujących jednocześnie różne rodzaje wyładowań obu biegunowości, uzyskane w układach o różnej geometrii, jak pokazuje literatura jest powszechnym problemem związanym z badaniami iskry długiej [66-69, 83-84, 86].

W świetle powyższych faktów autor niniejszej rozprawy uważa za uzasadnione wykonanie badań polegających na pomiarze parametrów opisujących trajektorię iskry długiej, z uwzględnieniem następujących założeń:

1. Należy dokonać pomiarów dla wyładowań wygenerowanych zarówno przez udary piorunowe, jak i łączeniowe, przy czym oba te rodzaje uderzeń powinny charakteryzować się oboma rodzajami biegunowości;
2. Należy dokonywać rejestracji kanału wyładowania iskier, umożliwiającej rekonstrukcję przestrzennego przebiegu trajektorii wyładowania;
3. Należy wykorzystać różne układy elektrod w celu oceny wpływu geometrii układu probierczego na uzyskiwane wyniki;
4. Należy dokonać rejestracji odpowiednio dużej liczby wyładowań danego rodzaju oraz biegunowości powstałych w tych samych warunkach.

8. Budowa i opis układu pomiarowego

8.1. Wprowadzenie

Badania iskry długiej są wykonywane w laboratoriach wysokich napięć. Prowadzi się je w zamkniętych halach laboratoryjnych, co ze względu na rozmiar samych hal może wpływać na wyniki prowadzonych badań. Istnieje też możliwość wykonywania badań na otwartych poligonach doświadczalnych [87-90], co jednak wiąże się z pewnymi niegodnościami jak np. wpływ warunków atmosferycznych czy też zmienne i niekorzystne warunki oświetleniowe, które są bardzo istotne podczas badań trajektorii iskry długiej, gdzie dużą rolę odgrywają rejestracje fotograficzne. Tym samym mimo swoich ograniczeń badania trajektorii wyładowań najczęściej wykonuje się w laboratoriach zapewniających stałe i kontrolowane warunki prowadzenia pomiarów.

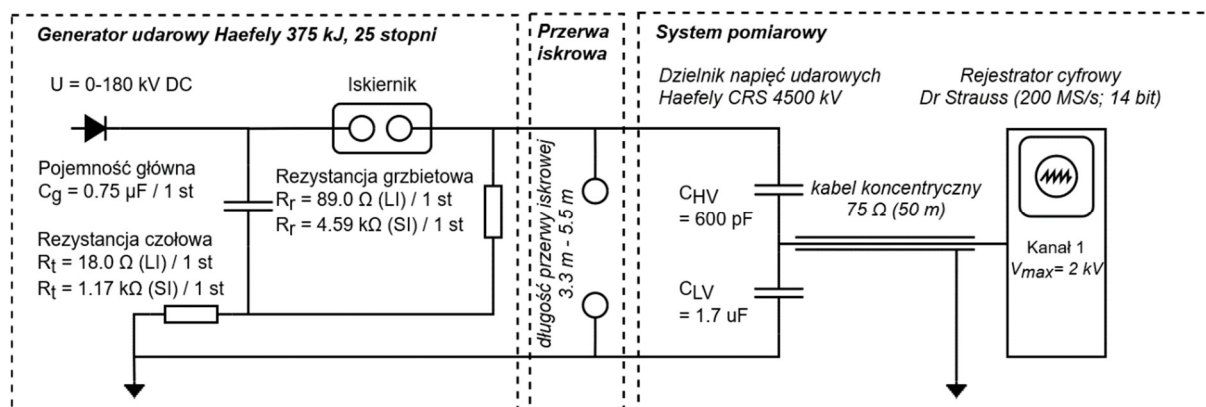
Wyładowania są generowane przy wykorzystaniu napięć udarowych piorunowych i łączeniowych wytwarzanych przez wielostopniowe generatory udarów napięciowych [91]. W zależności od możliwości w trakcie badań generowane są udary o wartościach szczytowych od kilkudziesięciu kilowoltów do kilku megawoltów [92]. Głównymi czynnikami decydującymi o wartościach napięć szczytowych wykorzystywanych podczas badań są zdolności generatorów napięciowych, rozmiar hali, wytrzymałość pomocniczych układów izolacyjnych stosowanych w celu skonstruowania układu pomiarowego oraz możliwości pomiarowe wynikające z i maksymalnych wartości napięć jakie można nimi zmierzyć. W ostatnim przypadku ograniczenie w zwykłe wynika z możliwości wykorzystywanych dzielników napięcia.

Do rejestracji obrazu kanału wyładowania wykorzystuje się odpowiednio przygotowane aparaty fotograficzne lub tak zwane kamery szybkie, umożliwiające rejestrację poszczególnych etapów rozwoju kanału wyładowania. W przypadku badań trajektorii najczęściej stosuje się aparaty fotograficzne, pozwalające na uzyskanie obrazów iskry długiej o długościach od kilku kilkunastu metrów, przy zachowaniu wysokiej rozdzielczości fotografii. Dzięki czemu możliwe jest dokładne zbadanie kształtu kanału wyładowania i analiza parametrów opisujących jego trajektorię.

W niniejszym rozdziale zostanie opisany układ pomiarowy wykorzystany do pomiarów trajektorii iskry długiej. Szczególny nacisk zostanie położony na omówienie czynników wynikających z konstrukcji układu, które mogą mieć wpływ na kształt kanału wyładowania oraz zjawisk wpływających już bezpośrednio na obrazy kanału wyładowania rejestrowane podczas pomiarów.

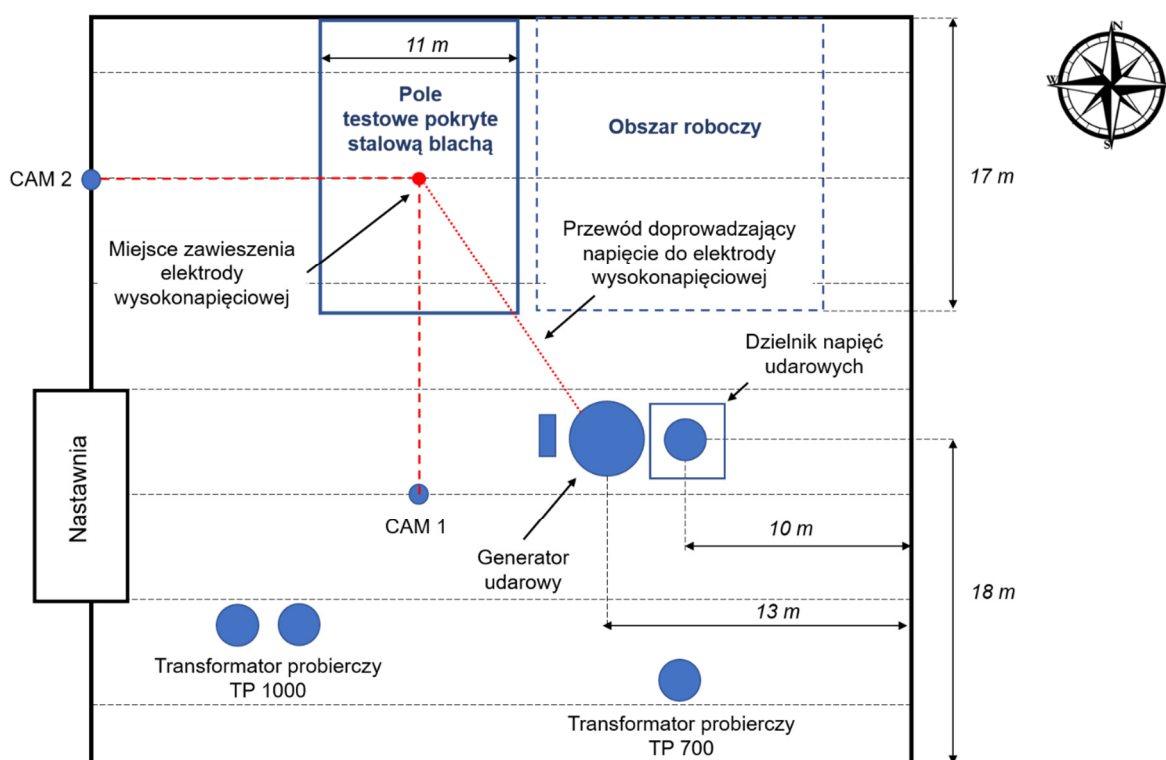
8.2. Układy wytwarzania napięć udarowych

Na Rys. 8.1 przedstawiono schemat układu pomiarowego zbudowanego na potrzeby pomiarów parametrów opisujących trajektorię iskry długiej. Pomiary wykonano w Laboratorium Wysokich Napięć w Instytucie Energetyki. Głównym elementem układu pomiarowego był 25. stopniowy generator napięć udarowych. Każdy ze stopni generatora składał się z dwóch połączonych ze sobą szeregowo kondensatorów o łącznej pojemności $0,75 \mu\text{F}$ i maksymalnym napięciu ładowania wynoszącym 180 kV . Wartość maksymalna udarów wytwarzanych przez tak połączone pojemności wynosi więc 4500 kV , co przy uwzględnieniu sprawności generatora wynoszącej około $93\text{-}95\%$, pozwalało na uzyskanie udarów napięciowych o maksymalnej wartości 4200 kV . Należy jednak zaznaczyć, że przytoczone wartości dotyczą wyłącznie udarów piorunowych. W przypadku udarów łączeniowych, maksymalne możliwe do uzyskania napięcie wynosiło 2800 kV . Wartość ta wynikała z ograniczeń związanych z rozmiarem hali laboratoryjnej oraz z wytrzymałością elektryczną izolacji zewnętrznej dzielnika napięcia CRS, będącego stałą pojemnością czołową układu generatora. Do regulacji kształtu udaru wykorzystywano rezystory stopniowe. Czas trwania czoła udaru uzależniony był od wartości rezystorów tłumiących R_t , których wartość wynosiła 18Ω i 1170Ω na jeden stopień generatora, odpowiednio dla udarów piorunowych i łączeniowych. Grzbiet udaru był kształtowany rezystorami rozładowczymi R_r o wartościach stopniowych 89Ω i 4590Ω . W skład systemu pomiarowego, poza wspomnianym pojemnościowym dzielnikiem napięcia CRS o przekładni wynoszącej 3150 , wchodził również cyfrowy rejestrator napięć udarowych produkcji Dr Strauss [93], wyposażony w 4 kanały pomiarowe o maksymalnym napięciu wejściowym wynoszącym 2 kV , maksymalnym próbkowaniu 200 MS/s oraz rozdzielczości 14 bit . Sygnał pomiarowy pomiędzy dzielnikiem napięcia, a rejestratorem był przesyłany kablem koncentrycznym o impedancji 75Ω i o długości 50 m .



Rys. 8.1 Schemat układu pomiarowego wykorzystanego w trakcie badań

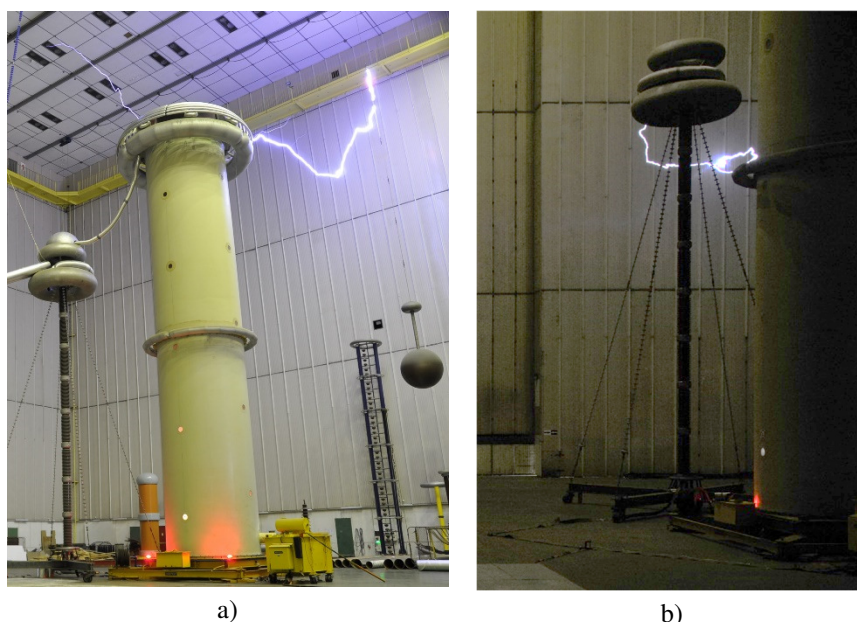
Hala wysokich napięć, w której wykonano badania, ma kształt prostopadłościanu o wysokości 33 m, opartego na podstawie kwadratu o boku 40 m. Przed przystąpieniem do badań należało określić położenie wszystkich elementów układu pomiarowego (ogólny plan laboratorium pokazano na Rys. 8.2). Punktem odniesienia była pozycja generatora napięć, który znajdował się w miejscu zapewniającym maksymalną wytrzymałość elektryczną względem elementów konstrukcyjnych hali oraz pozostałych obiektów stanowiących stałe wyposażenie laboratorium (np. transformatory probiercze). Ponieważ wysokość generatora jest stała, a tym samym nie jest możliwa zmiana odległości pomiędzy jego szczytem a sufitem hali, jest on dodatkowo wyposażony w elektrody ekranujące eliminujące możliwość występowania wyładowań do elementów konstrukcyjnych znajdujących się ponad nim (przykład tego typu wyładowań pokazano na Fot. 8.1a).



Rys. 8.2 Plan laboratorium prezentujący sposób rozmieszczenia elementów układu pomiarowego

Po ustaleniu pozycji generatora należało określić miejsce, w którym powinien znajdować się dzielnik napięcia. Ze względu na konstrukcję generatora, dzielnik napięcia nie mógł znajdować się od strony ściany zachodniej (patrz Rys. 8.2), ponieważ w tym miejscu znajduje się prostownik napięcia, stanowiący część systemu ładowania generatora. Ustawienie dzielnika od strony ściany południowej również było niemożliwe, gdyż w tym obszarze znajdowały się pozostałe elementy wyposażenia laboratorium. Z punktu widzenia wytrzymałości elektrycznej najkorzystniejszą pozycją okazało się miejsce znajdujące się od strony ściany północnej, gdyż

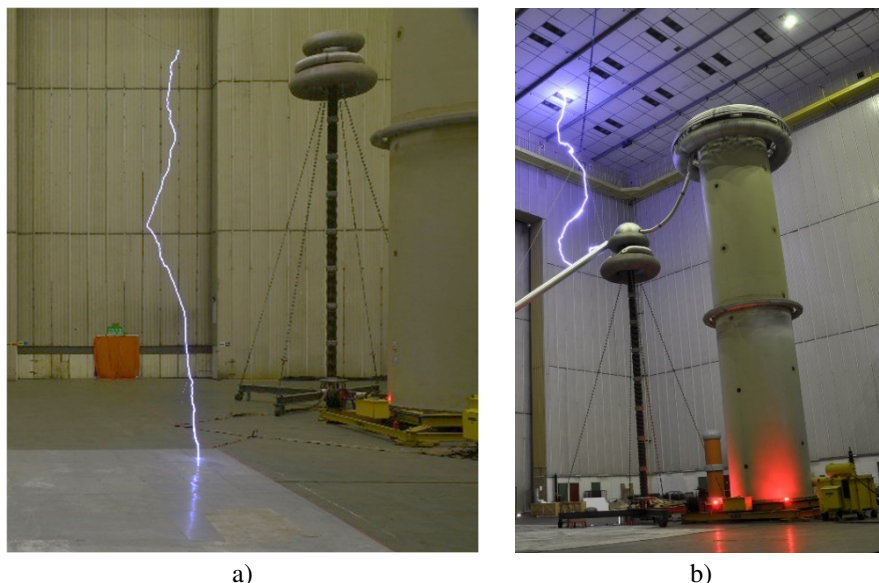
zapewniało ono największą odległość pomiędzy dzielnikiem, a ścianami laboratorium. Jednakże badania wyładowań iskrowych pokazały, że ustawienie dzielnika napięć w obszarze znajdującym się zbyt blisko pola probierczego, w którym znajduje się badana przerwa iskrowa, wiąże się z ryzykiem występowania wyładowań pomiędzy obiektem badanym, a dzielnikiem. Tego typu wyładowania są szczególnie niebezpieczne i mogą prowadzić do uszkodzenia nie tylko dzielnika, ale również pozostałych elementów systemu pomiarowego. W związku z tym ustalono, że dzielnik napięcia zostanie usytuowany od strony ściany wschodniej, na której znajduje się brama laboratorium (patrz Rys. 8.2). Nie jest to pozycja optymalna i w trakcie przygotowań do badań zarejestrowano występowanie także wyładowań pomiędzy dzielnikiem, a bramą laboratorium (Fot. 8.1 b). Jednak nie są to zjawiska zagrażające układowi pomiarowemu i są one na tyle rzadkie, że nie zakłócają w sposób istotny procesu wykonywania badań.



Fot. 8.1 Fotografie prezentujące wyładowania rozwijające się między elementami układu pomiarowego a konstrukcją hali laboratoryjnej: a) wyładowanie z generatora napięć udarowych b) wyładowanie z dzielnika napięć

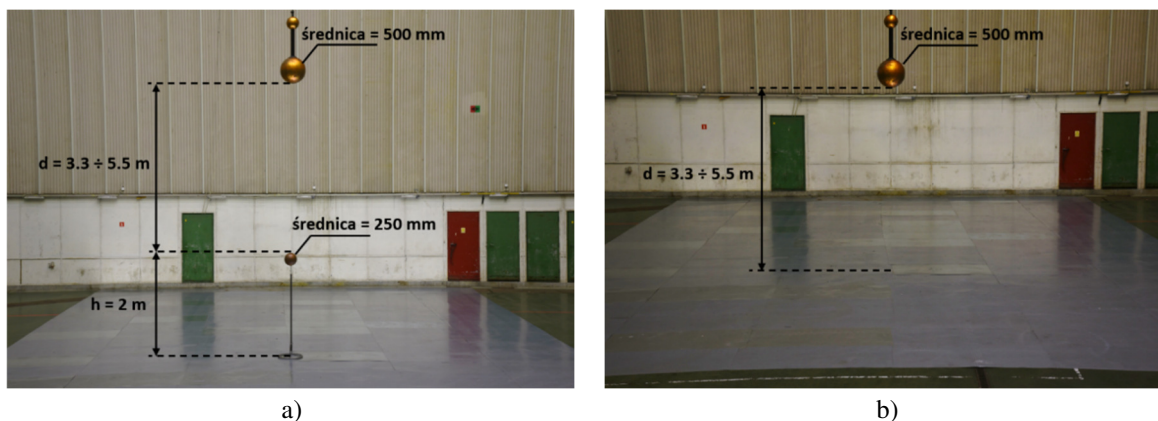
Napięcie wychodzące z generatora było doprowadzane do obszaru probierczego za pośrednictwem przewodu miedzianego o przekroju $2,5 \text{ mm}^2$. Zastosowanie takiego rodzaju przewodu wynikało z jego elastyczności oraz niskiej masy, co w znacznym stopniu ułatwiało regulację kierunku oraz miejsca połączenia przewodu z elektrodami badanego układu. Wadą tego typu rozwiązania było zwiększenie prawdopodobieństwa rozwoju wyładowań pomiędzy przewodem, a innymi elementami układu pomiarowego (Fot. 8.2 a). W celu ograniczenia możliwości występowania tego typu wyładowań, można zastosować specjalne połączenia wysokonapięciowe, wykorzystywane przykładowo do ograniczania intensywności wyładowań koronowych. Niestety, ze względu na znaczną masę oraz sztywność tego rodzaju połączeń, w sposób istotny

utrudniają one prowadzenie badań, nie dając jednocześnie gwarancji eliminacji niepożądanych wyładowań (Fot. 8.2 b).



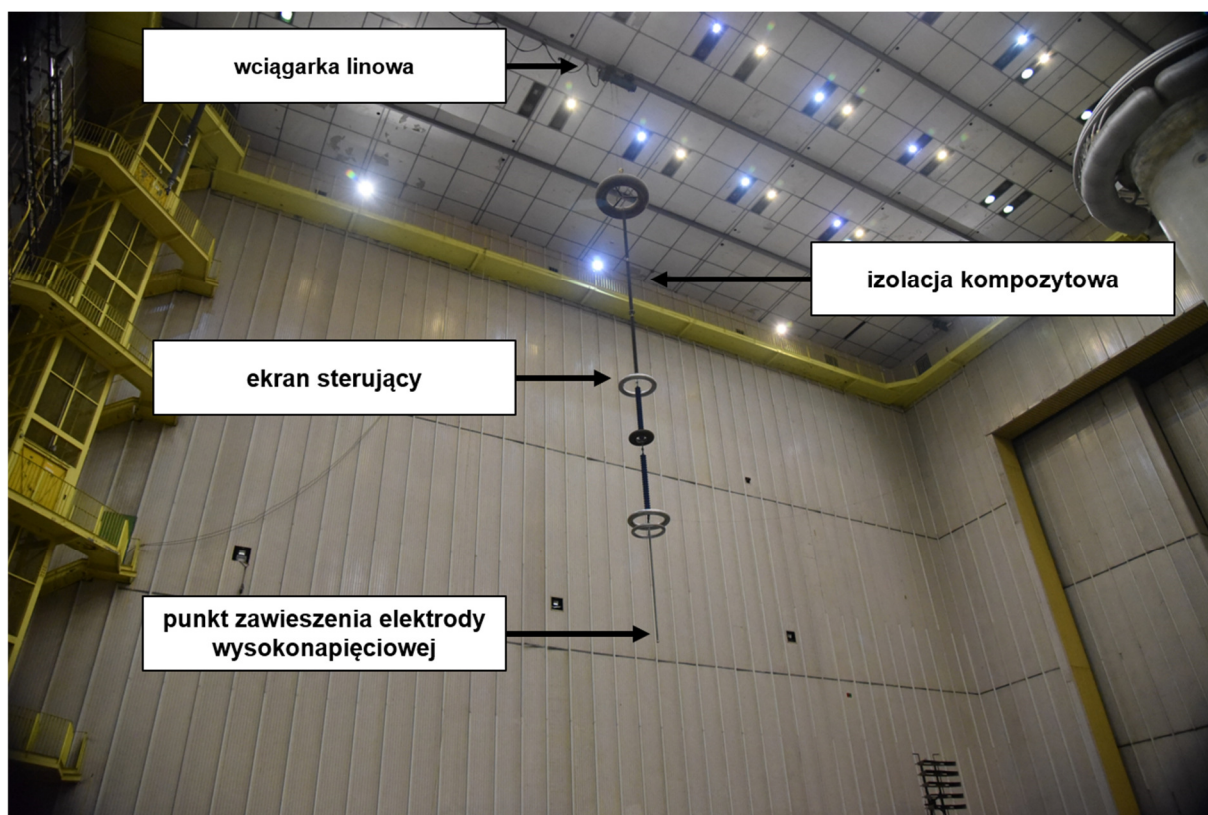
Fot. 8.2 Wyładowanie między przewodami doprowadzającymi napięcie a konstrukcją hali:
a) wyładowanie między przewodem $2,5 \text{ mm}^2$ a podłogą laboratorium,
b) wyładowanie między aluminiową rurą o średnicy 300 mm a sufitem laboratorium

Badania wykonano z wykorzystaniem dwóch rodzajów wysokonapięciowych układów elektrodowych: kula-kula oraz kula-płyta (Fot. 8.3). W obu układach elektrodę wysokonapięciową wykonano z miedzianej kuli o średnicy 500 mm, zawieszanej nad przewodzącą płaszczyzną o wymiarach 17 m na 11 m, wykonaną z arkuszy blachy stalowej. Powstała w ten sposób elektroda płytowa była połączona z systemem uziemień laboratorium za pośrednictwem miedzianej taśmy. W przypadku badań w układzie kula-kula, bezpośrednio pod elektrodą wysokonapięciową był ustawiany metalowy statyw wykonany z rury stalowej o średnicy 30 mm z zainstalowaną na jej szczycie drugą elektrodą kulistą o średnicy 250 mm. Powstała w ten sposób elektroda niskonapięciowa zainstalowana była na stałej wysokości, wynoszącej 2 m.



Fot. 8.3 Układy elektrod wysokonapięciowych wykorzystywanych podczas pomiarów:
a) układ kula-kula, b) układ kula-płyta

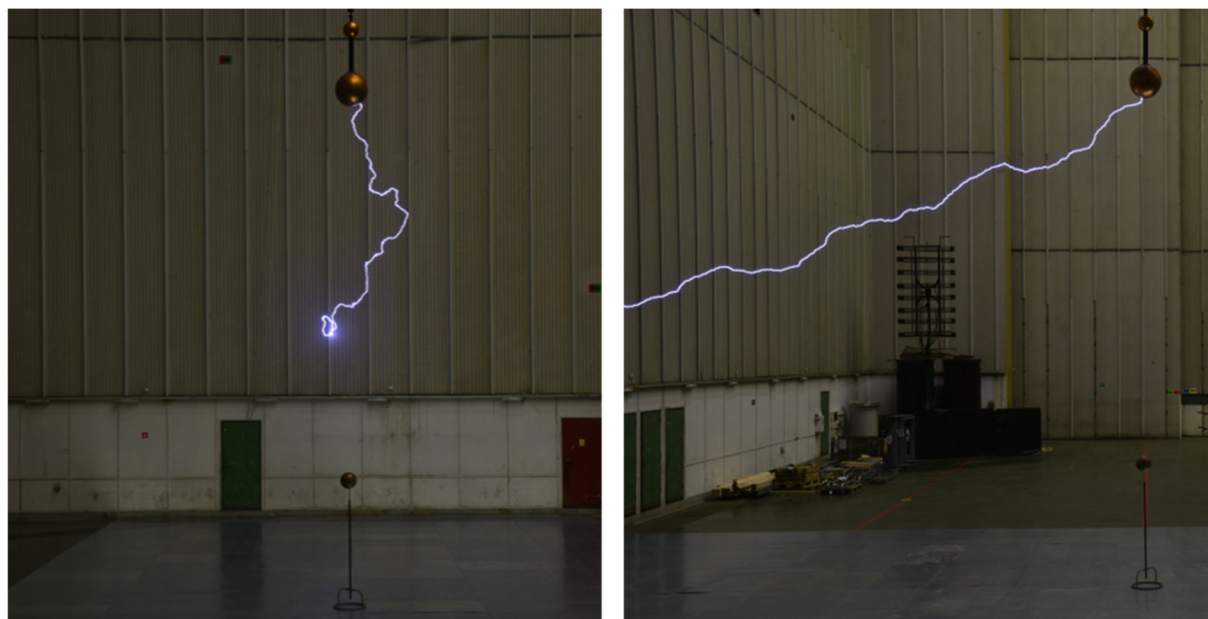
Długość przerwy iskrowej wynosiła 3,3 m oraz 5,5 m, zgodnie z założeniami przyjętymi w trakcie badań symulacyjnych przedstawionych w Części II niniejszej rozprawy. Zmiana odległości pomiędzy elektrodami była wykonywana przy użyciu wciągarki linowej, połączonej z elektrodą wysokonapięciową za pośrednictwem łańcucha izolatorów kompozytowych (Fot. 8.4). Na łańcuchu izolatorów zostały dodatkowo zainstalowane elektrody ekranujące, których zadaniem było zwiększenie wytrzymałości elektrycznej układu. Wstępne badania wykazały, że przy braku elektrod ekranujących rejestrowano występowanie wyładowań wzdłuż łańcucha izolatorów, a problem ten dotyczył przede wszystkim wyładowań łączeniowych o biegunowości ujemnej.



Fot. 8.4 Sposób zawieszenia elektrody wysokonapięciowej

Pole probiercze, w którym znajdowała się przerwa iskrowa, było zlokalizowane przy północnej ścianie laboratorium (patrz Rys. 8.2). Odległość elektrody wysokonapięciowej od najbliższego przewodzącego elementu konstrukcyjnego hali, jakim była wspomniana ściana, wynosiła 11 m. Przyjmuje się, że podczas badań układów izolacyjnych można pominąć wpływ przewodzących elementów wyposażenia laboratoryjnego, jeżeli znajdują się one w odległości nie mniejszej niż 1,5 razy długość badanej przerwy izolacyjnej [94-96], co przy odległości 11 m powinno pozwalać na wykonanie badań przerw iskrowych o maksymalnej długości 7,3 m. Wstępne badania wykazały jednak, że w przypadku uderzeń łączeniowych o biegunowości dodatniej wpływ

najbliższej ściany jest już widoczny dla przerw iskrowych o długości 6 m. W tym przypadku wytrzymałość elektryczna układu izolacyjnego jaki tworzy elektroda wysokonapięciowa i ściana hali jest porównywalny do wytrzymałości badanej przerwy iskrowej - Fot. 8.5.

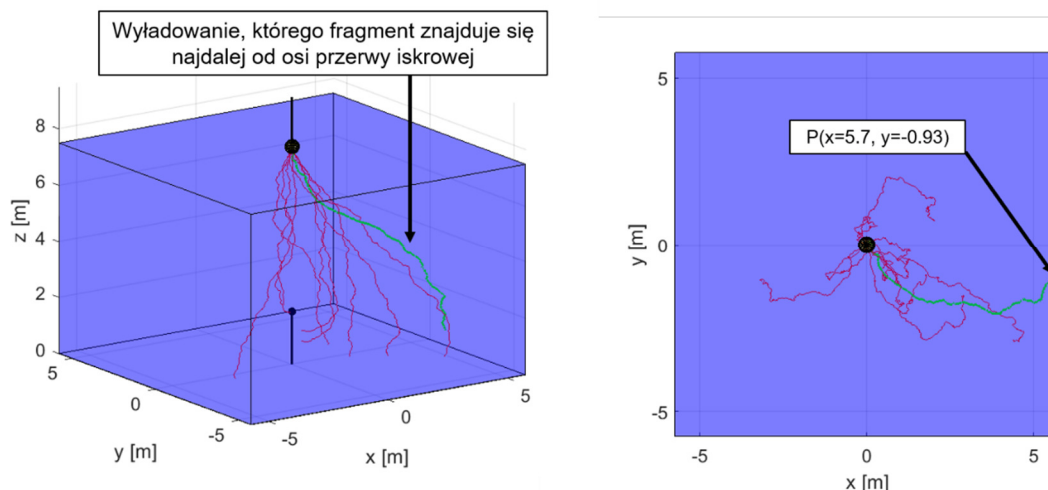


Fot. 8.5 Wyładowanie między elektrodą wysokonapięciową a ścianą laboratorium

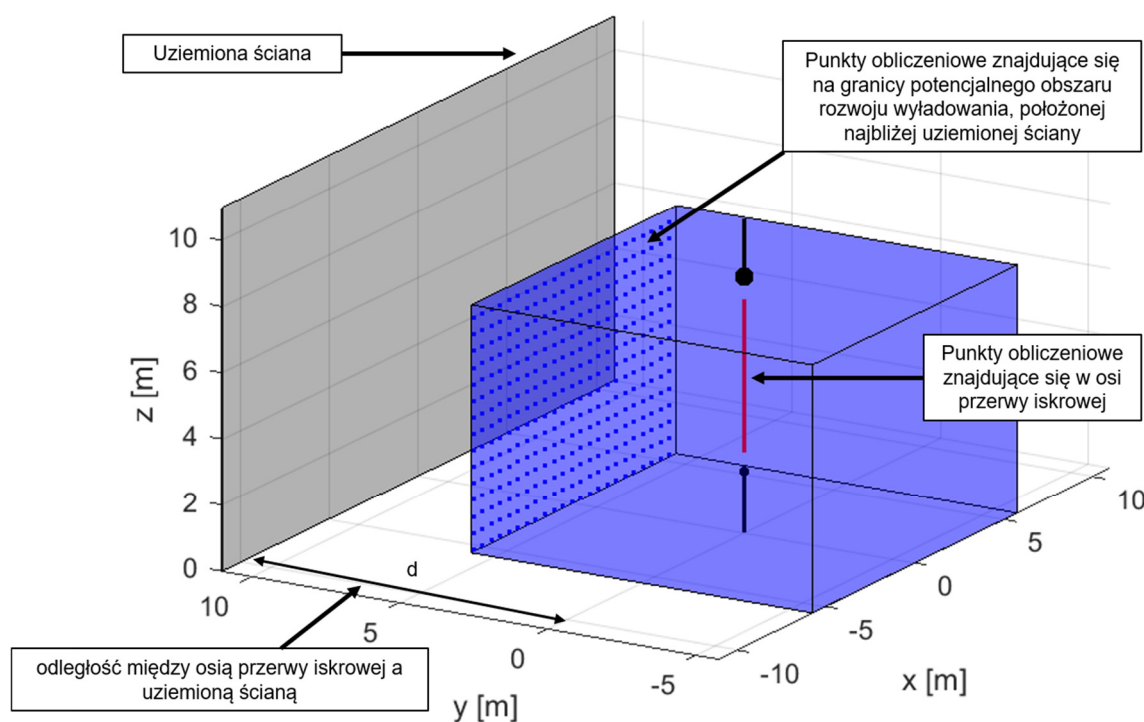
W prezentowanych tu badaniach, pomimo znacznych rozmiarów hali wysokonapięciowej (największy tego typu obiekt w Polsce), ściana hali znajdowała się, z konieczności, względnie blisko przerwy iskrowej. Poniżej omówiono sposób jakościowej oceny wpływu tej odległości na generowanie wyładowań iskrowych oraz na uzyskane wyniki.

Aby ocenić wpływ, jaki ma obecność metalowej i uziemionej ściany na rozwój kanału wyładowania w badanej przerwie iskrowej, wykonano symulacje rozkładu potencjału modelu iskiernika odzwierciedlającego układ pomiarowy, stosując metodę omówioną w Części II niniejszej pracy. W pierwszym kroku wykorzystano opracowany model symulacyjny do wyznaczenia potencjalnego obszaru rozwoju wyładowania Rys. 8.3. Przyjęto, że obszar ten ma kształt prostopadłościanu o wysokości równej wysokości zawieszenia elektrody wysokonapięciowej (7,5 m) i podstawie kwadratu, o boku określonym przez odległość pomiędzy osią przerwy iskrowej, a najbardziej oddalonym fragmentem kanału wyładowania należącego do badanej populacji (5,7 m).

Wpływ oddziaływania uziemionej ściany zbadano dla punktów obliczeniowych znajdujących się w osi przerwy iskrowej, a także dla punktów znajdujących się na granicy potencjalnego obszaru rozwoju wyładowania położonej najbliższej uziemionej ściany (Rys. 8.4).



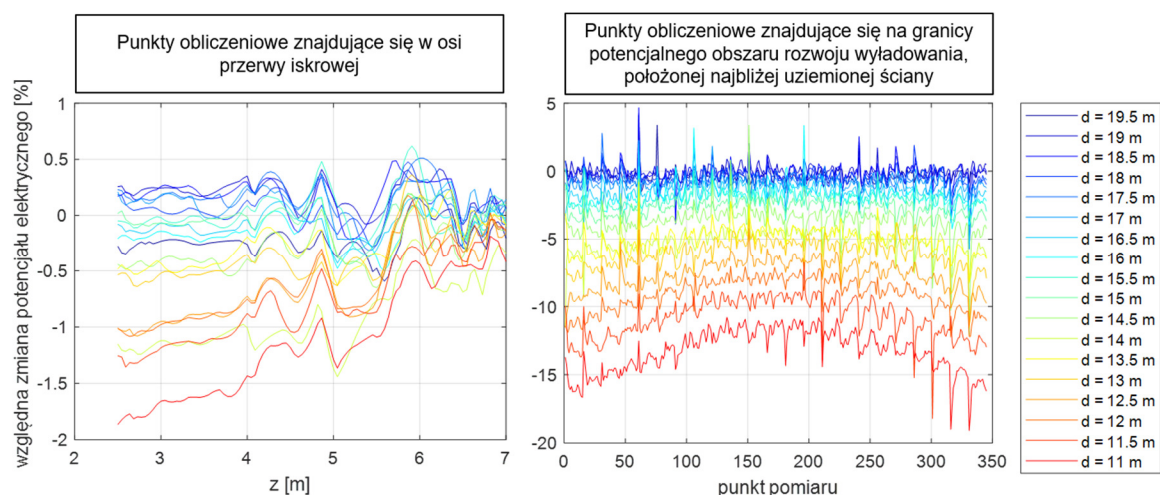
Rys. 8.3 Sposób definicji potencjalnego obszaru wyładowania na podstawie wyników symulacji



Rys. 8.4 Model obliczeniowy do wyznaczenia wpływu uziemionej ściany na rozkład pola elektrycznego wewnątrz potencjalnego obszaru wyładowania

Na Rys. 8.5 pokazano wykresy względnej zmiany potencjału elektrycznego w zależności od odległości d , w jakiej znajduje się uziemiona ściana od osi przerwy iskrowej. Jako punkt odniesienia przyjęto sytuację, w której uziemiona ściana położona jest w odległości 20 m od osi przerwy iskrowej, co stanowi potencjalnie największą odległość, jaka jest możliwa do osiągnięcia w wykorzystanej hali laboratoryjnej. Wykonane symulacje pokazały, że obecność uziemionej ściany oddalonej o 11 m od przerwy iskrowej nie wpływa znacząco na rozkład potencjału

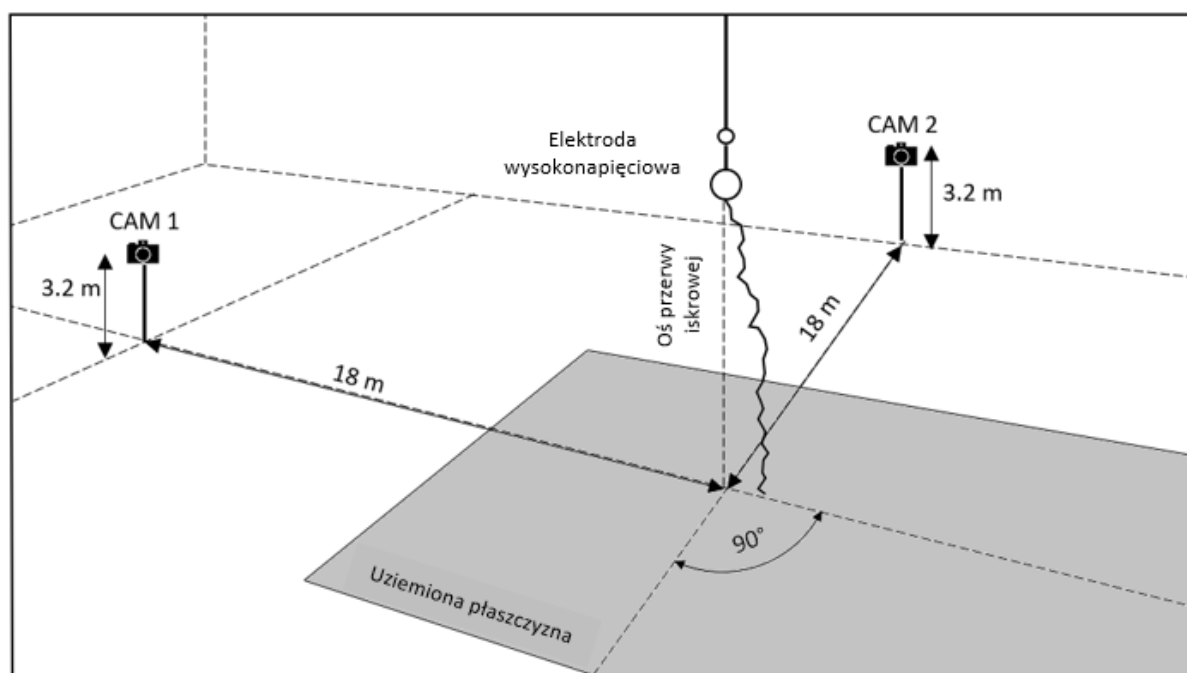
w przerwie iskrowej (w stopniu nie większym niż 2%), jednak może wpływać na rozkład potencjału elektrycznego w obszarze, w którym może nastąpić rozwój wyładowania, a tym samym należy uwzględnić ten fakt interpretując wyniki pomiarów laboratoryjnych. Wykonane symulacje pokazały także, że w badanym układzie możliwe jest pominięcie wpływu pozostałych elementów wyposażenia laboratorium.



Rys. 8.5 Względna zmiana potencjału elektrycznego w zależności od odległości pomiędzy uziemioną ścianą a osią przerwy iskrowej

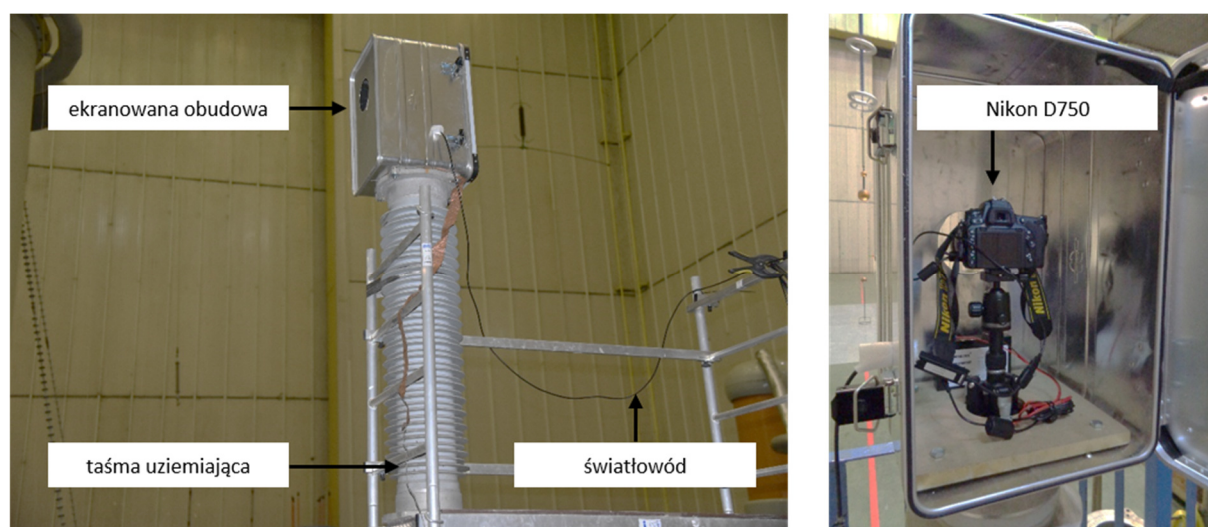
8.3. Układy rejestracji trajektorii wyładowań iskrowych

Rejestracja trajektorii wyładowania została wykonana za pomocą dwóch zsynchronizowanych aparatów fotograficznych Nikon D750. Ze względu na wysokie rozświetlenie kanału wyładowania, ustawiono maksymalną wartość przesłony obiektywu ($f/22$), a dodatkowo na obiektywach zainstalowano filtry szare ND5. Zdjęcia wykonano w rozdzielczości 6016x4016 pikseli i kadrowano w taki sposób, aby obszar, w którym możliwe było wystąpienie wyładowania, obejmował jak największą część matrycy, co miało na celu umożliwienie rejestracji możliwie jak największej liczby szczegółów związanych z kształtem kanału wyładowania. W celu zmniejszenia błędów związanych ze zniekształceniami geometrycznymi, oba aparaty były ustawione w tej samej odległości od badanej przerwy iskrowej, a ogniskowe obiektywów były regulowane w taki sposób, aby możliwe było uzyskanie jak najmniejszego kąta widzenia. Sposób ustawienia aparatów został pokazany na Rys. 8.6. Sterowanie wyzwalaniem oraz akwizycja danych były wykonywane za pomocą komputera znajdującego się w pomieszczeniu kontrolnym (nastawnia). Sygnał pomiędzy nastawnią, a aparatami był przekazywany za pośrednictwem łącza światłowodowego o długości 40 m. Ze względu na rozmiar laboratorium oraz bardzo silne zakłócenia pojawiające się wskutek wyładowań, nie było możliwe zastosowanie komunikacji bezprzewodowej.



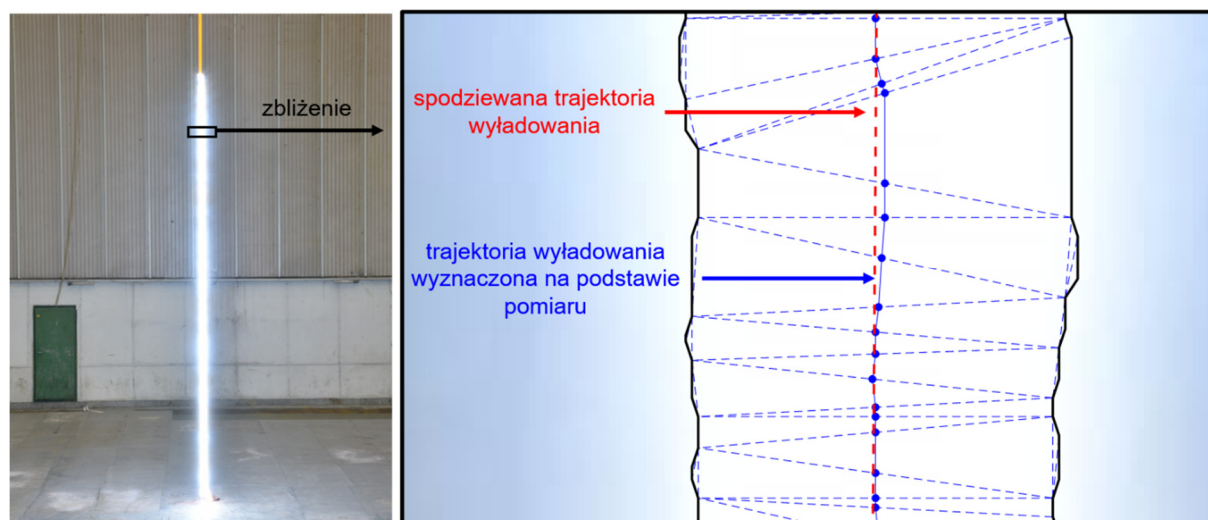
Rys. 8.6 Sposób ustawienia aparatów fotograficznych podczas pomiarów trajektorii wyładowań iskrowych

Silne oddziaływanie pola elektrycznego zakłócało również działanie samych aparatów (np. resetowanie ustawień lub wyłączanie urządzeń). Z tego względu oba aparaty zostały umieszczone w metalowych obudowach na specjalnie wykonanych statywach (Fot. 8.6). Dodatkowym zadaniem statywów była ochrona aparatów przed bezpośrednim wyładowaniem. Pomimo tego, że aparaty były ustawione w odległości ponad trzykrotnie większej niż długość przerwy iskrowej, możliwe było wystąpienie bezpośredniego wyładowania od przerwy iskrowej do aparatów. Zdarzenia takie były odnotowywane w trakcie badań z wykorzystaniem udarów łączeniowych o biegunowości dodatniej i o wartości szczytowej przekraczającej 2MV.



Fot. 8.6 Statywy ekranujące wykorzystywane podczas pomiarów trajektorii wyładowań iskrowych

metoda wykonywania pomiarów. Przedstawiony na Rys. 8.7 sposób wyznaczania trajektorii zostanie omówiony w dalszej części niniejszej rozprawy.

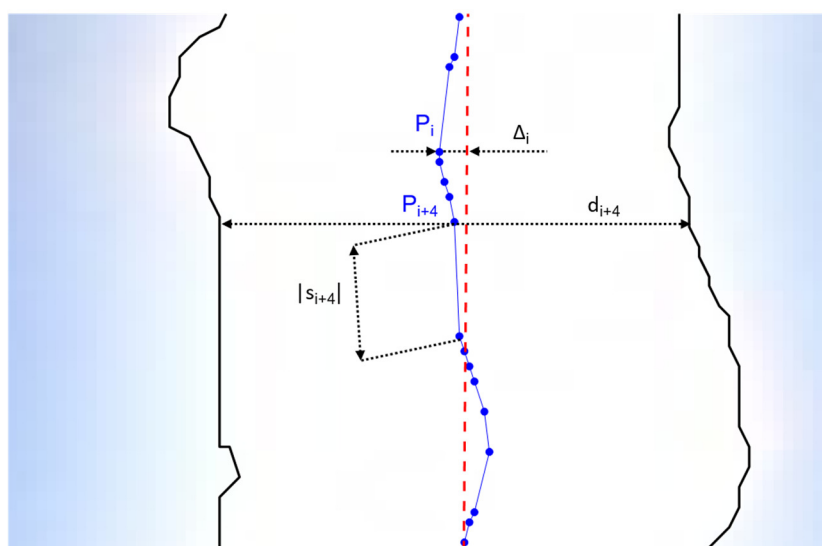


Rys. 8.7 Fragment kanału referencyjnego wraz zaznaczonymi trajektoriami wyładowania: przewidywaną (oznaczona kolorem czerwonym, wyznaczoną (oznaczona kolorem niebieskim)

Pierwszym zidentyfikowanym źródłem błędów jest sposób poziomowania aparatów fotograficznych. Aparaty były pozycjonowane przy wykorzystaniu wbudowanego systemu poziomującego, a jako dodatkową weryfikację ustawienia wykorzystano charakterystyczne punkty konstrukcyjne hali laboratoryjnej. Dzięki zastosowaniu obu tych metod możliwe było zmniejszenie błędów, jednakże nie pozwoliło to na całkowitą ich eliminację. Stopień odchylenia aparatów od pozycji optymalnej można oszacować mierząc kąt nachylenia teoretycznej trajektorii wyładowania. W przypadku dokładnego ustawienia aparatów, kąt pomiędzy trajektorią, a linią wyznaczającą dolną krawędź fotografii powinien wynosić 90° . Wykonane pomiary wykazały jednak, że kąty te wynoszą $89,59^\circ$ oraz $89,54^\circ$, odpowiednio dla aparatu pierwszego (CAM 1) i drugiego (CAM 2). W obu przypadkach zmierzone odchylenia nie przekraczają $0,5^\circ$ i nie powinny mieć wpływu na interpretację wyników pomiarów, nie mniej jednak należy je mieć na uwadze podczas analizy wyników pomiarów.

Drugim źródłem błędów są odkształcenia trajektorii wyładowania, które można zaobserwować porównując spodziewaną trajektorię, jaką powinno mieć wyładowanie rozwijające się prostopadle do powierzchni elektrody pływowej, z trajektorią uzyskaną na podstawie pomiaru. W tym przypadku jako miarę błędu można przyjąć średnią wartość odległości pomiędzy rozpatrywanymi trajektoriami (spodziewaną, jaką powinno mieć wyładowanie rozwijające się prostopadle do powierzchni elektrody pływowej i zmierzoną, przedstawioną na Rys. 8.8). Dla iskry przedstawionej na Fot. 8.7, średnie wartości odległości Δ wynoszą 1,67 mm oraz 2,05 mm dla,

odpowiednio, CAM 1 i CAM 2. Wartości te można również wyrazić jako wielkości względne odniesione do średniej pozornej szerokości kanału wyładowania d , przy czym wielkość d została wprowadzona na Rys. 8.8 jako odległość między dwiema przeciwległymi granicami kanału wyładowania. Odniesienie odległości Δ do pozornej szerokości kanału wyładowania pozwala ocenić stopień odkształcenia trajektorii kanału wyładowania możliwy do uwzględnienia przy ocenie dokładności wykonanych pomiarów.



Rys. 8.8 Sposób określania odległości między trajektoriami spodziewaną i wyznaczoną

Wyniki obliczeń odległości pomiędzy badanymi trajektoriami zestawiono w Tab. 8.1. Na ich podstawie można stwierdzić, że trajektorie spodziewana, jaką powinno mieć wyładowanie rozwijające się prostopadle do powierzchni elektrody pływowej, oraz zmierzona, nie pokrywają się ze sobą. Zmierzone różnice wskazują jednak, że rozbieżność trajektorii zmierzonej od spodziewanej, jaką powinno mieć wyładowanie rozwijające się prostopadle do powierzchni elektrody pływowej, nie jest znacząca i dla analizowanego przypadku nie przekracza 2,5%.

Tab. 8.1 Odchylenie od trajektorii teoretycznej

Fotografia	Δ	$\Delta / d \cdot 100\%$
	[mm]	[%]
CAM 1	1,67	1,8
CAM 2	2,05	2,5

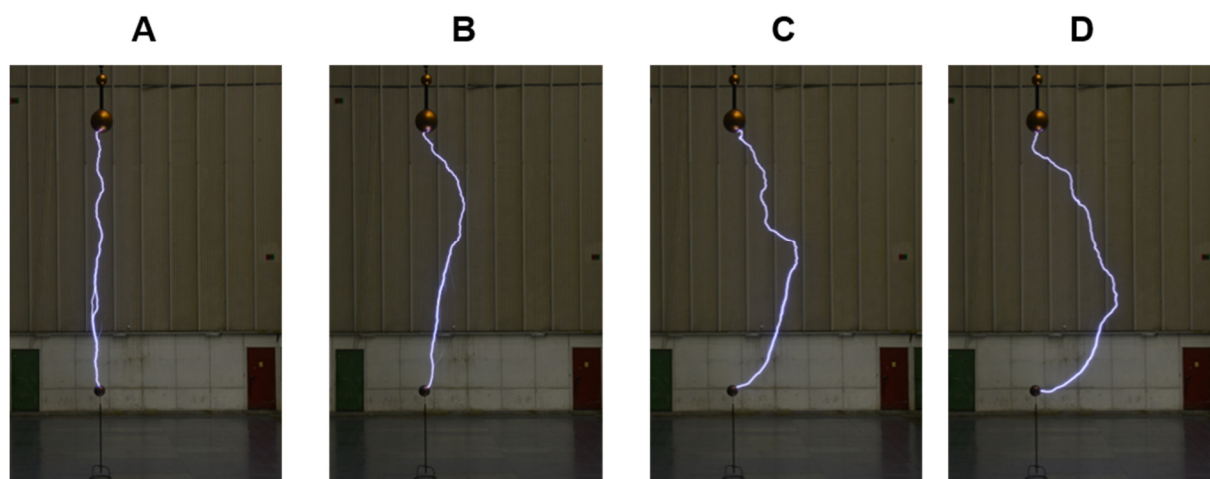
Jako dodatkowy sposób pozwalający na ocenę jakości zastosowanej metody wyznaczania trajektorii, wykonano obliczenia krętości wyładowania referencyjnego. Zgodnie z definicją krętości, średnia wartość kąta θ_m dla wyładowania pokazanego na Fot. 8.7 powinna dążyć do 0° . Ponieważ rozpatrywane wyładowanie referencyjne rozwija się wzdłuż przerwy iskrowej,

kolejne segmenty powinny być równoległe do osi wyładowania. Należy jednak zaznaczyć, że w przypadku rzeczywistych wyładowań, kąt θ_m nie może osiągnąć wartości równej 0° , ponieważ w rzeczywistych warunkach nie jest możliwe osiągnięcie idealnie prostego kanału wyładowania. Na podstawie wyników pokazanych w Tab. 8.2 można zauważyć, że zgodnie z oczekiwaniem krętość wyładowania referencyjnego charakteryzuje się wartościami kąta θ_m , które są znacznie mniejsze, niż ma to miejsce w przypadku rzeczywistych wyładowań rozwijających się w sposób naturalny (czyli bez zastosowania układu z drutem w osi wyładowania). Typowe wartości kąta θ_m spotykane w literaturze wynoszą $20,9^\circ$ [59] lub $23,9^\circ$ [60].

Tab. 8.2 Wyniki pomiaru kąta θ_m dla wyładowania referencyjnego

	Trajektoria 2D CAM 1	Trajektoria 2D CAM 2	Trajektoria 3D
θ_m	5,55	3,36	6,51
σ_θ	6,03	4,60	5,96

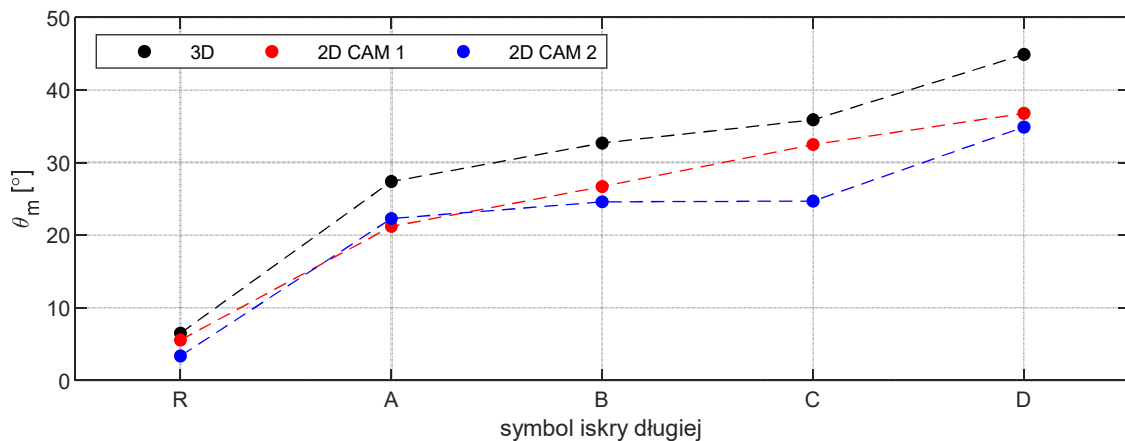
Kąt θ_m opisuje odchylenie trajektorii wyładowania od osi przerwy iskrowej. Poprawność przyjętej metody pomiaru można zatem dodatkowo zweryfikować wykonując obliczenia kąta θ_m dla wybranych wyładowań, cechujących się różnym stopniem odchylenia kanału wyładowania od osi przerwy iskrowej. Na Rys. 8.9 pokazano cztery wyładowania sfotografowane w płaszczyźnie XZ i uszeregowane w kolejności od najmniejszego do największego odchylenia trajektorii od osi przerwy iskrowej.



Rys. 8.9 Wyładowania iskrowe powstałe w wyniku oddziaływania udarów łączeniowych biegunowości dodatniej

Na Rys. 8.10 przedstawiono z kolei wartości kąta θ_m dla tych samych wyładowań. Obliczenia kąta θ_m zostały wykonane dla trzech przypadków: 1) trajektorii wyładowania jako zbioru

punktów w przestrzeni trójwymiarowej (3D), 2) trajektorii wyładowania jako zbioru punktów w przestrzeni dwuwymiarowej, obserwowanej w płaszczyźnie XZ (2D CAM1), 3) trajektorii wyładowania jako zbioru punktów w przestrzeni dwuwymiarowej obserwowanej w płaszczyźnie YZ (2D CAM2). Większe wartości kąta θ_m dla wyładowań o większym odchyleniu od osi przerwy iskrowej potwierdzają poprawność zastosowanej metody pomiaru kąta θ_m . Dodatkowo widoczne jest również, że wyładowanie referencyjne (oznaczone na Rys. 8.10 symbolem R) posiada dużo mniejsze odchylenie od osi przerwy iskrowej, niż ma to miejsce w przypadku rzeczywistych wyładowań.



Rys. 8.10 Wyniki pomiaru kąta θ_m dla wyładowań przedstawionych na Rys. 8.9 oraz dla wyładowania referencyjnego

8.4. Podsumowanie

Na podstawie wykonanych pomiarów oraz przeprowadzonych na ich podstawie analiz stwierdza się, że zaprojektowany oraz zestawiony układ badawczy zapewnia możliwość wykonania pomiarów, których celem jest wyznaczenie parametrów opisujących trajektorię iskry długiej. Wykazano możliwość wykonania badań dla następujących warunków:

1. Rodzaj napięcia: udar piorunowy i udar łączeniowy;
2. Biegunowość napięcia udarowego: dodatnia i ujemna;
3. Wartość szczytowa napięcia: 4200 kV dla udarów piorunowych i 2800 kV dla udarów łączeniowych;
4. Długość przerwy iskrowej: nie większa niż 5,5 m.

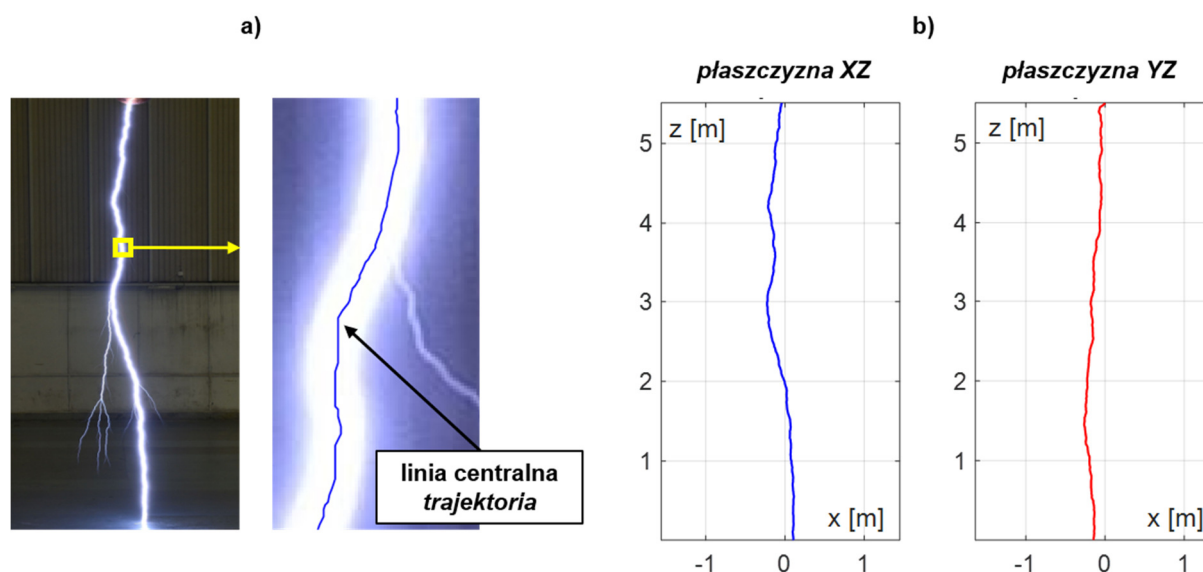
Dodatkowo przeprowadzono pomiary, na podstawie których wykazano, że opracowana metoda rejestracji obrazu kanału wyładowania pozwala na rejestrację trajektorii wyładowania, w taki sposób aby było możliwe odtworzenie przestrzennego kształtu kanału wyładowania.

9. Wyznaczenie trajektorii iskry długiej metodą triangulacyjną

9.1. Wprowadzenie

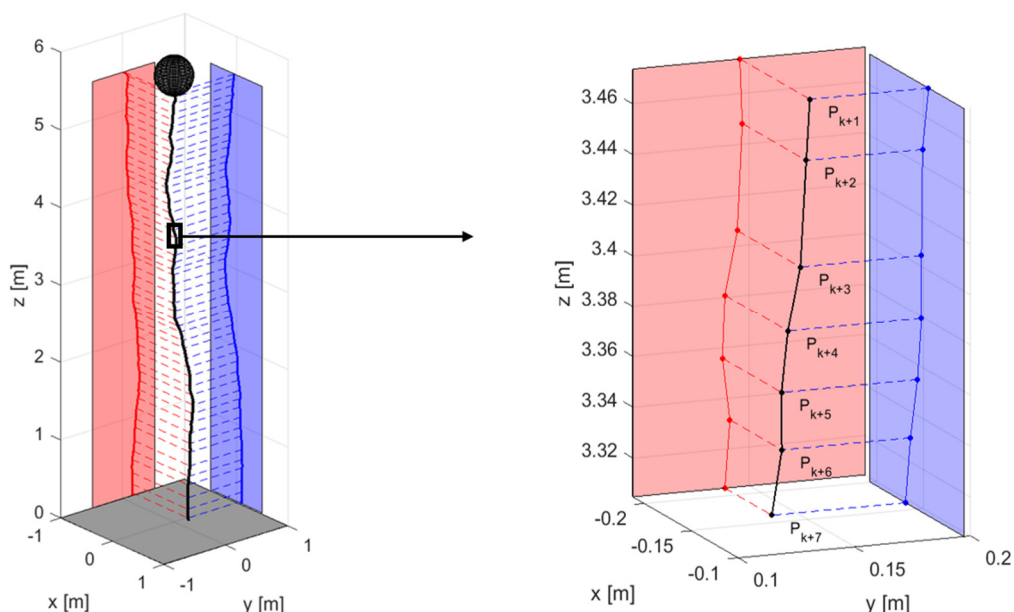
Jak wspomniano w rozdziałach 7 i 8, badania trajektorii rozwoju iskry długiej prowadzone są głównie na podstawie obrazów przedstawiających kanał wyładowania. Do wykonywania zdjęć kanału wyładowania najczęściej wykorzystuje się aparaty fotograficzne o tzw. długim czasie naświetlania (ang. *still cameras*) [59-62], choć, jak pokazano w [21, 65, 69, 74, 83-84, 98-99], możliwe jest też wykorzystanie kamer szybkich.

Wyznaczenie trajektorii wyładowania najczęściej przebiega wg następującego schematu. W pierwszym etapie, na podstawie zarejestrowanego obrazu wyodrębniana jest trajektoria wyładowania (Rys. 9.1a). Najczęściej przyjmuje się, że trajektoria odpowiada linii centralnej kanału wyładowania. W przypadku użycia dwóch aparatów fotograficznych możliwe jest wyznaczenie rzutów trajektorii na dwie prostopadłe do siebie płaszczyzny przyjętego układu współrzędnych (Rys. 9.1b).



Rys. 9.1 Trajektoria wyładowania na płaszczyźnie dwuwymiarowej:
a) kanał wyładowania wraz zaznaczoną linią centralną, b) trajektorie wyładowania widziane w dwóch prostopadłych płaszczyznach prostokątnego układu współrzędnych

Znajomość wszystkich trzech współrzędnych XYZ pozwala zrekonstruować przebieg kanału wyładowania w przestrzeni trójwymiarowej (Rys. 9.2). Przyjęcie założenia, że trajektoria kanału wyładowania jest równoważna linii centralnej, pozwala na przedstawienie kanału wyładowania w postaci zbioru połączonych ze sobą prostoliniowych segmentów.



Rys. 9.2 Sposób rekonstrukcji przestrzennego przebiegu trajektorii wyładowania na podstawie trajektorii wyznaczonych w płaszczyźnie dwuwymiarowej

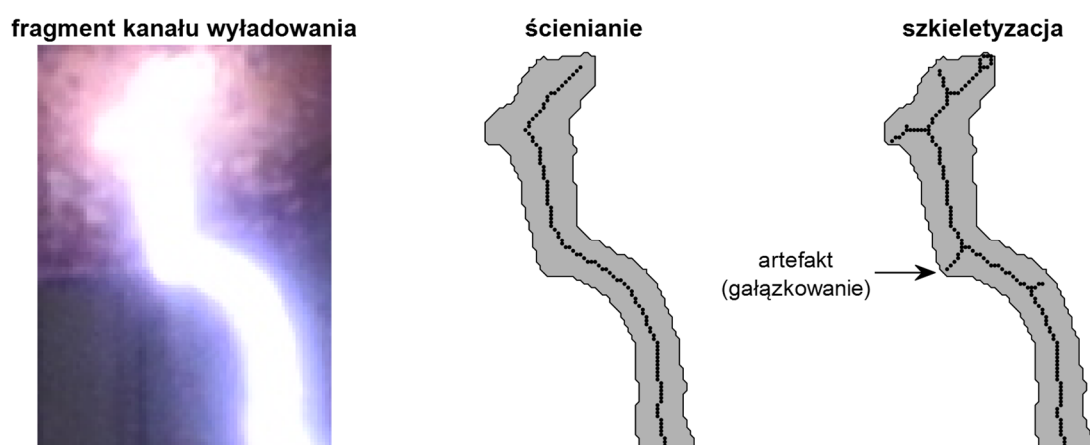
Wyznaczenie linii centralnej (trajektorii) w analizie własności geometrycznych wyładowań jest etapem krytycznym dla uzyskania poprawnych danych pomiarowych. Na tym etapie należy dokonać analizy wpływu zakłóceń (oceniając np. odbicia światła lub różnice w rozświetleniu kanału wyładowania wynikające z wartości prądu wyładowania [62]) oraz warunków, w jakich wykonywano pomiary (oceniając np. warunki oświetleniowe czy też sposób wykonywania zdjęć, takie jak ustawienia przesłony, czułość matrycy, itp.). Obecnie nie istnieją stosowane w technice wysokich napięć ustandaryzowane metody wykonywania zdjęć wyładowań iskry długiej, istotne jest zatem, aby zastosowana metoda ekstrakcji linii centralnej wyładowania była możliwie jak najmniej wrażliwa zarówno na zakłócenia, jak i na warunki, w jakich zostały wykonane fotografie kanału wyładowania.

9.2. Sposoby wyznaczania linii centralnej kanału wyładowania

W literaturze przedmiotu do wyznaczania trajektorii wyładowań iskier długich wykorzystywano dotychczas metody bazujące wyłącznie na przekształceniach morfologicznych (ang. *morphological operations*). W zależności od wykonywanych badań, autorzy opracowywali własne metody [61] lub wykorzystywali gotowe narzędzia obliczeniowe stosowane do analizy obrazów [59-60, 62, 74].

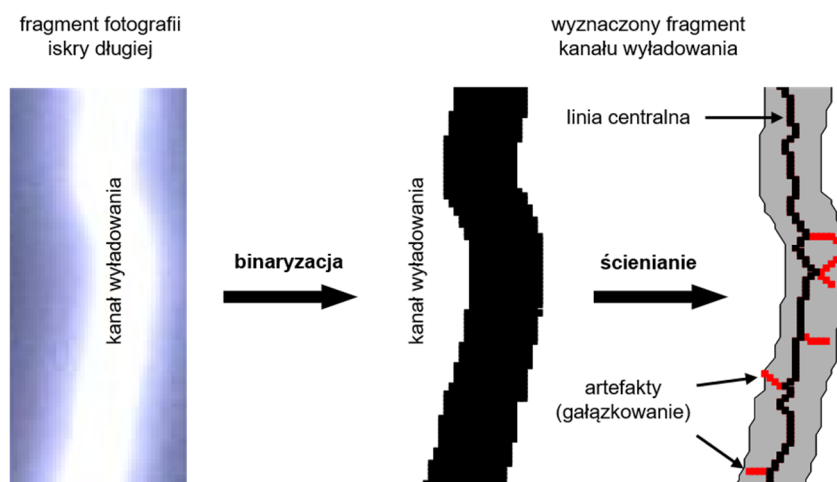
Dwoma najczęściej stosowanymi przekształczeniami morfologicznymi pozwalającymi na wyznaczenie linii centralnej są szkieletyzacja (ang. *skeletonization*) [100-106] oraz ścienianie (ang. *thinning*) [107-113]. W przypadku obiektów takich jak kanał wyładowania, lepsze

rezultaty daje ścienianie, co wynika z faktu, że iskra długa jest obiektem o bardzo nieregularnej strukturze, przez co linia centralna wyznaczona metodą szkieletyzacji posiada bardzo liczne dodatkowe gałązki (ang. *spurs*). Istnieją metody pozwalające na usuwanie tych gałązek, jednakże metody te powodują zniekształcenie finalnego przebiegu trajektorii. Z tego względu bardziej korzystne jest zastosowanie metod opartych na algorytmach ścieniania, gdyż, jak pokazały wykonane badania, tego typu metody pozostawiają znacznie mniej niepożądanych gałązek, dzięki czemu zniekształcenia trajektorii powstałe w procesie ich filtrowania są o wiele mniejsze. Na Rys. 9.3 przedstawiono porównanie działania algorytmów ścieniania i szkieletyzacji dla fragmentu kanału wyładowania powstałego przy napięciu udarowym piorunowym biegunowości ujemnej. Dla rozpatrywanego przypadku zastosowanie algorytmu ścieniania pozwoliło na wyznaczenie linii centralnej nie posiadającej dodatkowych artefaktów, podczas gdy użycie algorytmu szkieletyzacji skutkowało pojawieniem się pięciu dodatkowych gałązek. Analogiczny efekt obserwowano również analizując inne kanały wyładowań iskrowych.



Rys. 9.3 Porównanie efektów działania algorytmów ścieniania i szkieletyzacji na przykładzie wyładowania piorunowego biegunowości ujemnej

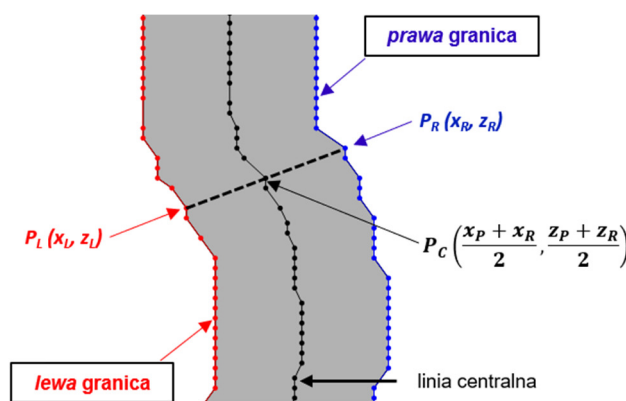
Na Rys. 9.4 pokazano fragment kanału wyładowania w postaci obrazu binarnego. W procesie wstępnej analizy obrazu (binaryzacji), fragmentom fotografii odpowiadającym kanałowi wyładowania przyporządkowywano piksele koloru czarnego, a pozostałe fragmenty wyładowania przyjęły barwę białą. W wyniku operacji ścieniania uzyskano linię centralną wraz z dołączonymi artefaktami wynikającymi z *efektu gałązkowania* (fragmenty oznaczone kolorem czerwonym). W procesie filtracji polegającej na usuwaniu pikseli posiadających wyłącznie jednego sąsiada, usunięto gałązki pozostawiając wyłącznie linię centralną.



Rys. 9.4 Ilustracja procesu przetwarzania fotografii kanału wyladowania do postaci macierzy binarnej

Do wyznaczenia linii centralnej wykorzystano algorytm opisany w pracy [114]. Wyznaczenie linii centralnej wyłącznie w oparciu o przekształcenia morfologiczne nie daje jednak zadowalających rezultatów, ponieważ w przypadku badania wyladowań o stosunkowo zróżnicowanym kształcie może prowadzić do zniekształcenia trajektorii wyladowania (opis wspomnianych zniekształceń zostanie podany w dalszej części rozdziału). Jednym ze sposobów pozwalającym na poprawę jakości wyznaczania trajektorii jest uzupełnienie przekształceń morfologicznych o dodatkowe przekształcenia geometryczne. W takim podejściu przekształcenia morfologiczne ograniczają się do wyznaczenia granic kanału wyladowania, natomiast sama trajektoria obliczana jest na podstawie własności geometrycznych otrzymanego wielokąta zamkniętego.

Najprostszą operacją geometryczną służącą do wyznaczenia linii centralnej figury geometrycznej utworzonej przez obwiednię kanału wyladowania jest uśrednienie. W tej metodzie linia okalająca kanał wyladowania dzielona jest na dwie umowne granice (Rys. 9.5). Współrzędne punktów wyznaczających linię centralną (P_C) oblicza się na podstawie współrzędnych dwóch najbliższych położonych siebie punktów P_L i P_R należących do różnych granic obwiedni kanału wyladowania.

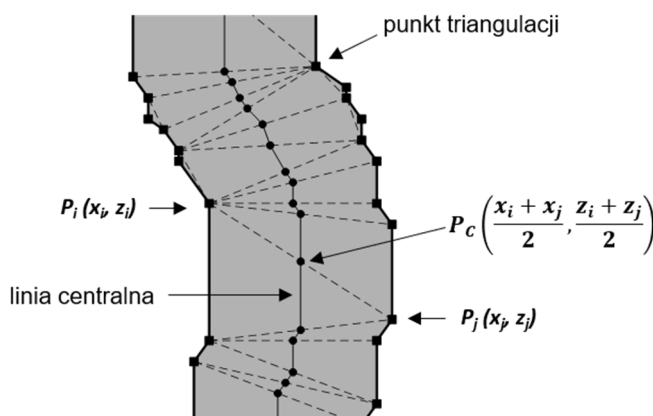


Rys. 9.5 Ilustracja sposobu wyznaczania linii centralnej przy wykorzystaniu metody uśredniania

Największą zaletą tej metody jest jej prostota oraz wydajność. Dodatkowo trajektoria wyznaczona tą metodą definicyjnie jest najbardziej zbliżona do linii centralnej. Zgodnie bowiem z przyjętą definicją linii centralnej, punkty linii centralnej to punkty położone w równej odległości od najbliższych krawędzi rozpatrywanego obiektu.

Kolejną metodą wyznaczania linii centralnej jest dokonanie triangulacji wielokąta utworzonego przez obwiednię kanału wyładowania [115-119]. Metoda ta jest z powodzeniem stosowana w różnych gałęziach nauki i techniki, lecz do tej pory nie była stosowana w przypadku badania wyładowań elektrycznych. Przykładem zastosowania triangulacji mogą tutaj być prace z dziedziny geodezji poświęcone analizie przebiegu rzek [120-121], czy też inżynierii lądowej, gdzie analizowane są trasy dróg [122-123].

Na Rys. 9.6 pokazano sposób podziału na trójkąty, zastosowany do fragmentu zarejestrowanej iskry długiej. Punkty oznaczone jako czarne kwadraty są wierzchołkami wielokąta utworzonego przez brzegi kanału wyładowania. Liniami przerywanymi oznaczono krawędzie trójkątów znajdujących się wewnątrz kanału wyładowania, które zostały utworzone w procesie triangulacji. Współrzędne punktów wyznaczających linię centralną P_C (czarne kropki) obliczane są na podstawie współrzędnych kolejnych punktów triangulacyjnych P_i i P_j znajdujących się na przeciwległych granicach kanału wyładowania.

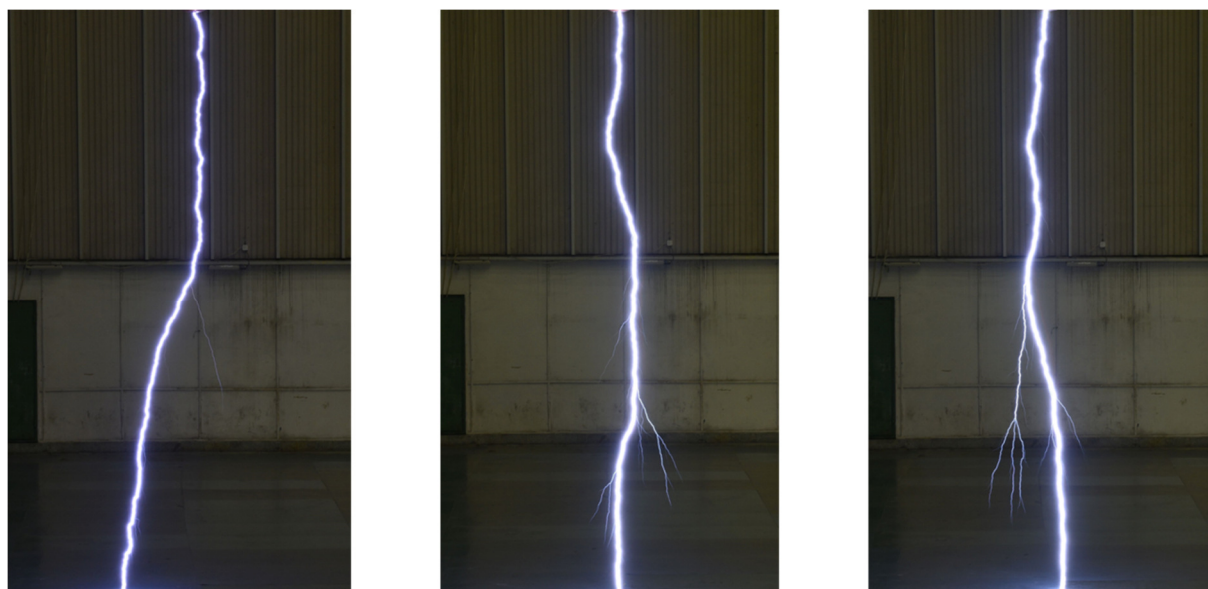


Rys. 9.6 Ilustracja sposobu wyznaczania linii centralnej przy wykorzystaniu triangulacji

9.3. Analiza działania wybranych metod wyznaczania trajektorii

Zgodnie z przyjętymi założeniami, badania trajektorii rozwoju iskry długiej powinny być wykonane dla odpowiednio dużej liczby wyładowań. Rozwój iskry jest zależny od czynników losowych, których uwzględnienie wymaga zastosowania narzędzi statystycznych, które najlepiej działają dla dużych populacji. Specyfiką badań iskry długiej jest to, że kanały wyładowań

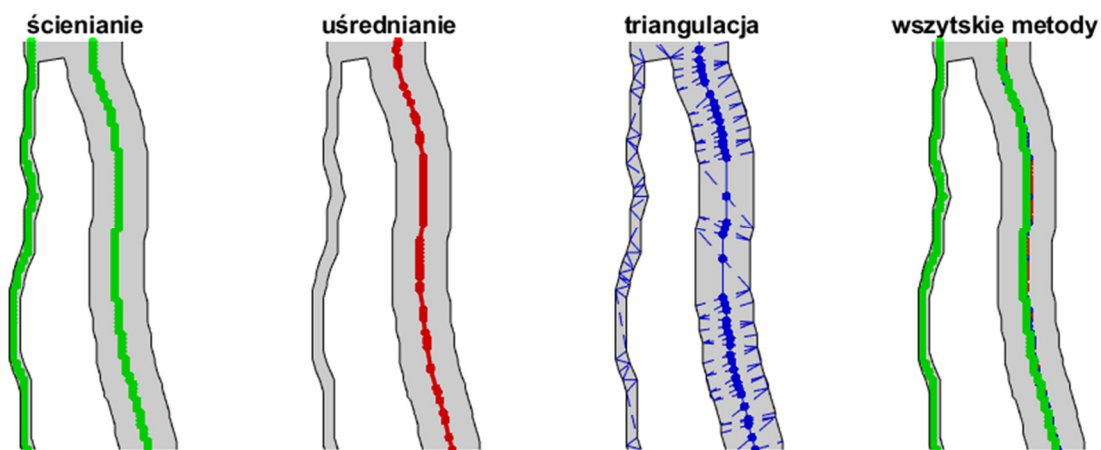
poszczególnych iskier mogą się znacznie różnić pomiędzy sobą. Dwoma najbardziej wyraźnymi różnicami są grubość kanału wyładowania oraz liczba i rozmiar gałęzi dołączonych do kanału wyładowania. Różnice te łatwo jest zaobserwować porównując wyładowania powstałe w wyniku oddziaływania dwóch różnych rodzajów napięć (łączeniowego oraz piorunowego), ale różnice te są również obserwowane pomiędzy wyładowaniami należącymi do tej samej populacji. Na Fot. 9.1 przedstawiono zdjęcia trzech iskier uzyskanych w wyniku zastosowania udarów piorunowych o biegunowości dodatniej. Pomimo, iż wszystkie wyładowania zostały zarejestrowane dla tych samych warunków probierczych (układ elektrod, warunki atmosferyczne, nastawy wartości szczytowej napięcia kształtu udaru), posiadają inną liczbę oraz rozmiar gałęzi.



Fot. 9.1 Wyładowania będące następstwem oddziaływania udarów piorunowych biegunowości dodatniej, charakteryzujące się różnym stopniem rozgałęzienia kanału wyładowania

W analizie trajektorii głównym problemem jest konieczność filtrowania gałęzi bocznych, ponieważ kąty krętości zdefiniowane są wyłącznie dla głównego kanału wyładowania. Zatem konieczne jest wykorzystanie metod dających możliwość wyznaczania linii centralnej niezależnie od stopnia złożoności badanej iskry.

Na Rys. 9.7 przedstawiono wyniki działania metod wyznaczania linii centralnej dla fragmentu kanału wyładowania, zawierającego pojedyncze odgałęzienie. W przypadku metody morfologicznej, gałąź ta nie została usunięta. Taką gałąź można również usunąć w dalszej obróbce, jednak należy pamiętać, że gałęzie są strukturami bardzo złożonymi i w niektórych przypadkach są bardzo podobne do głównego kanału wyładowania, co stanowi znaczne utrudnienie przy ich usuwaniu na końcowym etapie obróbki zdjęć.

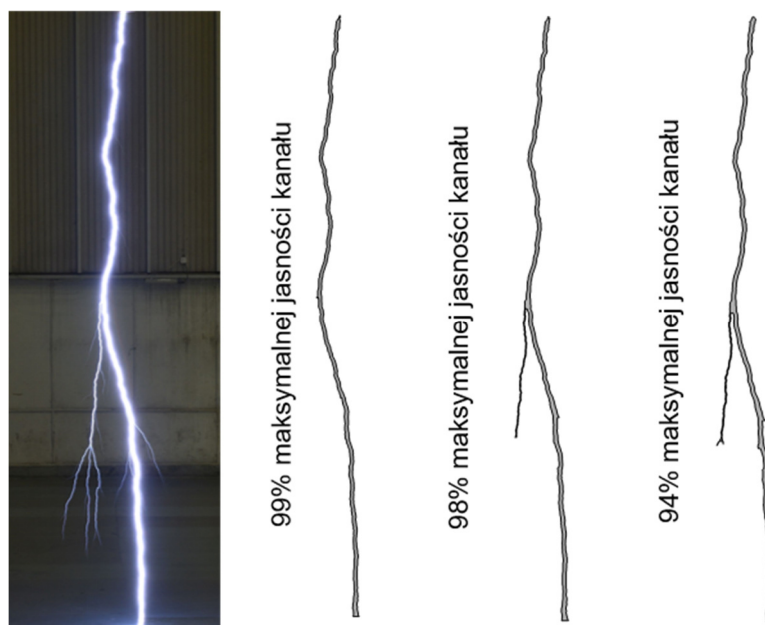


Rys. 9.7 Porównanie metod wyznaczania linii centralnej

Korzystne jest więc, aby gałęzie zostały usunięte na wstępnym etapie analizy obrazu. Jak wykazały wykonane badania, główny kanał wyładowania jest nieznacznie jaśniejszy od gałęzi bocznych. Różnice jasności zależą od rodzaju wyładowania oraz od wartości płynącego prądu. Na podstawie wykonanych badań zauważono, że dla wyładowań piorunowych różnice są mniejsze, niż dla wyładowań łączeniowych, tym samym filtracja gałęzi jest łatwiejsza dla udarów łączeniowych, niż dla udarów piorunowych. Bazując na kryterium jasności można określić próg jasności, poniżej którego wszystkie elementy iskry są usuwane już na etapie binaryzacji.

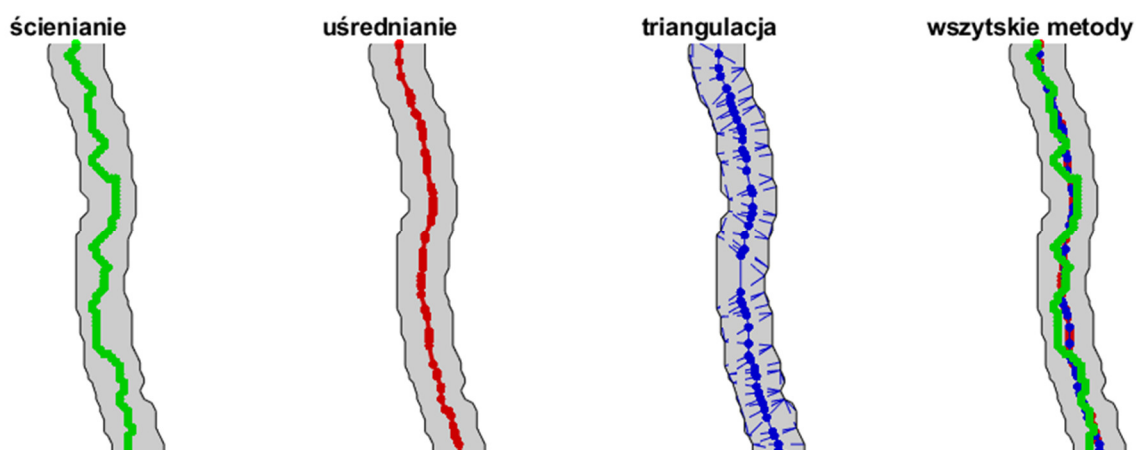
W trakcie procesu binaryzacji zdjęcie wyładowania przekształcane jest na obraz szary, będący macierzą o rozmiarze równym rozdzielczości wykonanego zdjęcia i wartościach ze zbioru od 0 do 255, co odpowiada 256 odcieniom szarości. Przyjmując, że wartość 0 odpowiada pikselom koloru czarnego, a 255 pikselom koloru białego, a także mając na uwadze, że kanał wyładowania jest najjaśniejszym obiektem znajdującym się na zdjęciu, możliwe jest określenie progu detekcji, powyżej którego wszystkie piksele będą uznawane za piksele należące do kanału wyładowania, a wszystkie pozostałe będą odrzucane (filtrowane). Próg jasności można wyrazić w wartościach względnych odnosząc go do wartości 255 odpowiadającej maksymalnej jasności. Na Rys. 9.8 przedstawiono przykład działania filtru opartego o kryterium jasności.

Można zauważyć, że w przypadku tego rodzaju wyładowania nawet niewielka zmiana progu jasności wpływa na rozmiar gałęzi identyfikowanych jako kanał wyładowania. W trakcie badań okazało się również, że dobranie progu jasności dla jednej iskry daje dobre rezultaty dla wszystkich iskier tworzących populację. W trakcie badań przyjęto, że próg jasności wynosił od 98% do 99% dla wyładowań piorunowych, oraz od 94% do 96% dla wyładowań łączeniowych. Wyniki przedstawione na Rys. 9.8 wskazują, że zwiększenie progu jasności pozwala skutecznie oddzielić gałęzie od głównego kanału wyładowania.



Rys. 9.8 Porównanie skuteczności filtracji gałęzi dla różnych progów jasności

Pomimo wymienionych wyżej zalet wyznaczania linii centralnej na podstawie analizy jasności kanału wyładowania, zwiększanie progu jasności sprawia, że granice kanału wyładowania są bardziej nieregularne, co może mieć wpływ na kształt wyładowania, a zatem również i na krętość wyznaczonej linii centralnej. Na Rys. 9.9 przedstawiono linie centralne wyznaczone trzema omawianymi metodami dla progu jasności wynoszącego 99%.



Rys. 9.9 Porównanie metod wyznaczania linii centralnej
w przypadku zastosowania filtra opartego o kryterium 99% progu jasności

Widoczne jest, że dla metody morfologicznej (metoda ścieniania) trajektoria wyładowania jest o wiele bardziej kręta, niż ma to miejsce w dwóch pozostałych przypadkach (zniekształcenia związane z efektem gałązkowania). Trajektorie średniej oraz triangulacji są bardzo zbliżone. Różnice w sposobie odtworzenia trajektorii widoczne są również przy porównaniu wartości

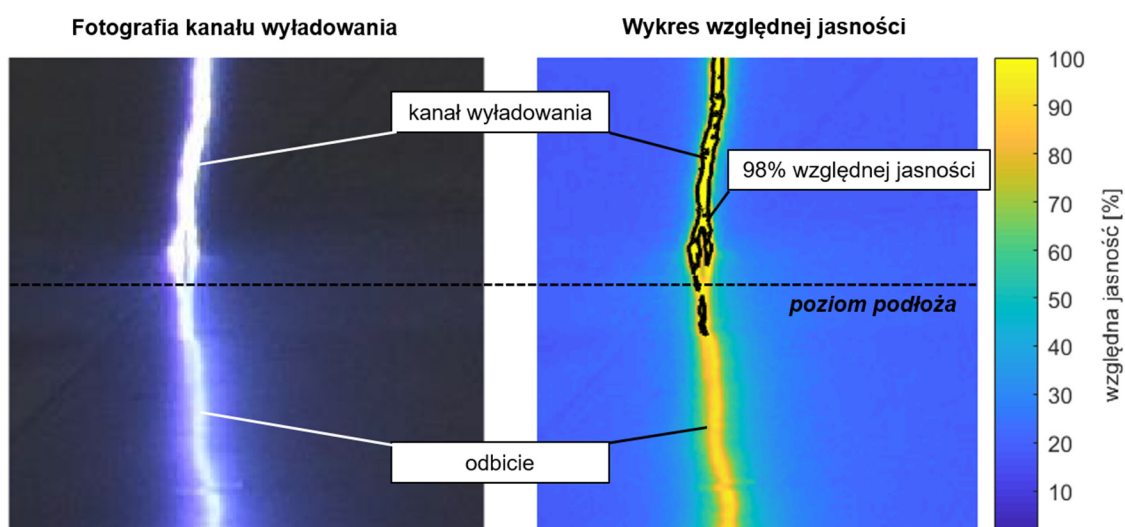
kątów krętości α_m (Tab. 9.1). Nieprawidłowo zwiększona krętość kanału prowadzi do znacznego wzrostu kątów krętości, zarówno wartości średniej α_m jak i odchylenia standardowego σ_α .

Tab. 9.1 Wartości kąta α_m dla różnych metod ekstrakcji trajektorii

Metoda	α_m [°]	σ_α [°]
ścienianie	24,0	26,7
uśrednianie	9,3	12,3
triangulacja	13,7	11,8

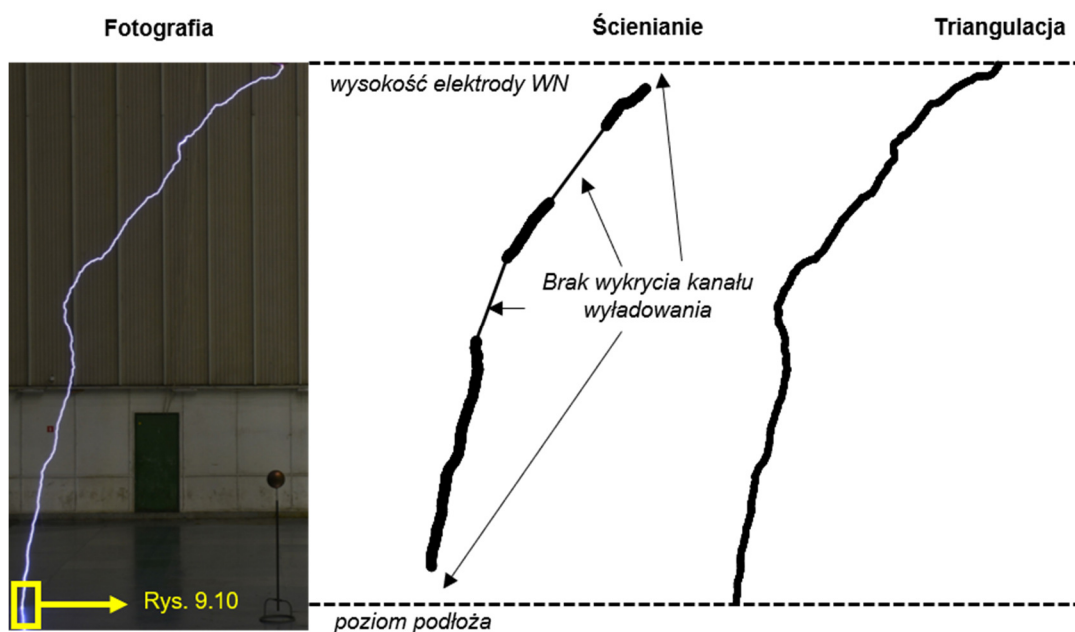
Dobór właściwego progu jasności jest również istotny w przypadku badań isker wytworzonych w układzie z elektrodą płytową. W tego typu układach elektroda płytowa jest wykonana najczęściej z metalowych arkuszy blachy [21, 59, 68-69, 74, 83]. Efektem tego jest bardzo intensywne odbicie kanału wyładowania od powierzchni blachy, które utrudnia poprawne określenie miejsca uderzenia wyładowania w elektrodę (zob. Rys. 9.10). Skutkiem tego może być nieprawidłowe wyznaczenie trajektorii w przestrzeni oraz, w konsekwencji, zawyżona długość iskry. Podobnie jak w przypadku gałęzi, odbicie jest ciemniejsze od głównego kanału. Niestety, w przypadku wyładowań o relatywnie niskim rozświetleniu różnice te są bardzo niewielkie (przykładem takich wyładowań są wyładowania łączeniowe o biegunowości dodatniej).

Na Rys. 9.10 przedstawiono fragment iskry w pobliżu miejsca kontaktu kanału wyładowania z elektrodą płytową. Z przedstawionego rysunku wynika, że zastosowanie progu detekcji na poziomie 98% względnej jasności, pozwala na właściwe wyznaczenie poziomu elektrody płytowej, a tym samym na określenie punktu końcowego kanału wyładowania.



Rys. 9.10 Fragment iskry długiej w miejscu kanału wyładowania z elektrodą płytową

Jednakże zastosowanie tak wysokiego progu detekcji w przypadku wyładowań cechujących się mniejszą jasnością (np. wspomniane wyładowania łączeniowe o biegunowości dodatniej) wyklucza możliwość zastosowania metod morfologicznych, ponieważ prowadzą one do wymazania części kanału wyładowania. Na Rys. 9.11 pokazano porównanie trajektorii wyznaczonych metodą ścieniania oraz triangulacji. Widoczne jest, że dla progu detekcji wynoszącego 98% zastosowanie metody ścieniania prowadzi do pominięcia niektórych fragmentów kanału wyładowania.

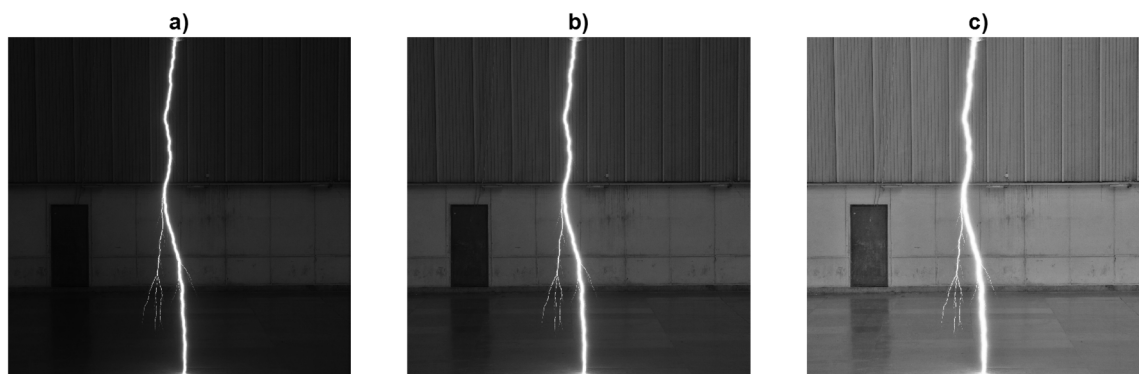


Rys. 9.11 Porównanie metod wyznaczania trajektorii wyładowania przy założeniu 98% progu jasności

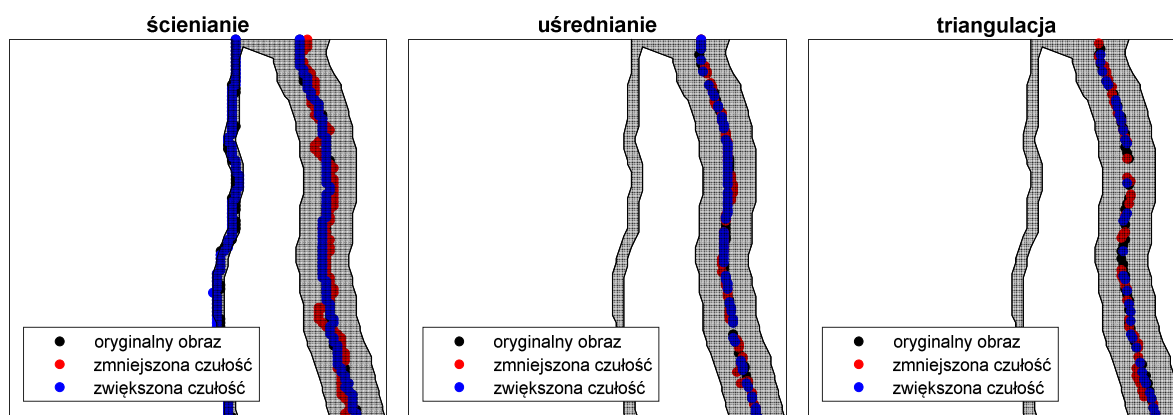
Zagadnienie progu detekcji kanału wyładowania jest ściśle powiązane z warunkami, w jakich dokonano rejestracji obrazu iskry długiej. Do najważniejszych warunków zalicza się natężenie oświetlenia oraz czułość matrycy wykorzystywanego aparatu fotograficznego. Na Rys. 9.12 pokazano trzy wyładowania. Rys. 9.12 b) przedstawia oryginalne zdjęcie wyładowania, natomiast Rys. 9.12 a) i Rys. 9.12 c) przedstawiają kolejno obrazy o zmniejszonej oraz zwiększonej czułości matrycy aparatu fotograficznego. Wszystkie zdjęcia przedstawiają to samo wyładowanie, co oznacza, że stosowane metody wyznaczania trajektorii powinny w każdym z przypadków dać takie same wyniki.

Na Rys. 9.13 pokazano porównanie wyników wyznaczenia trajektorii trzema omówionymi wyżej metodami dla wyładowań pokazanych na Rys. 9.12. Uzyskane rezultaty pokazują, że zastosowanie dodatkowych przekształceń geometrycznych sprawia, że metody wyznaczania linii centralnej są mniej wrażliwe na czynniki związane ze sposobem wykonywania zdjęć. W

przypadku metody ścieniania można zauważyć nie tylko zwiększenie krętości dla mniejszych czułości aparatu, ale również nieskuteczność filtracji gałęzi, gdy czułość ulega zwiększeniu.



Rys. 9.12 Zdjęcia wyładowań wykorzystane do oceny wpływu czułości matrycy aparatu fotograficznego na sposób wyznaczenia trajektorii: a) zmniejszona czułość matrycy, b) normalna czułość matrycy, c) zwiększona czułość matrycy

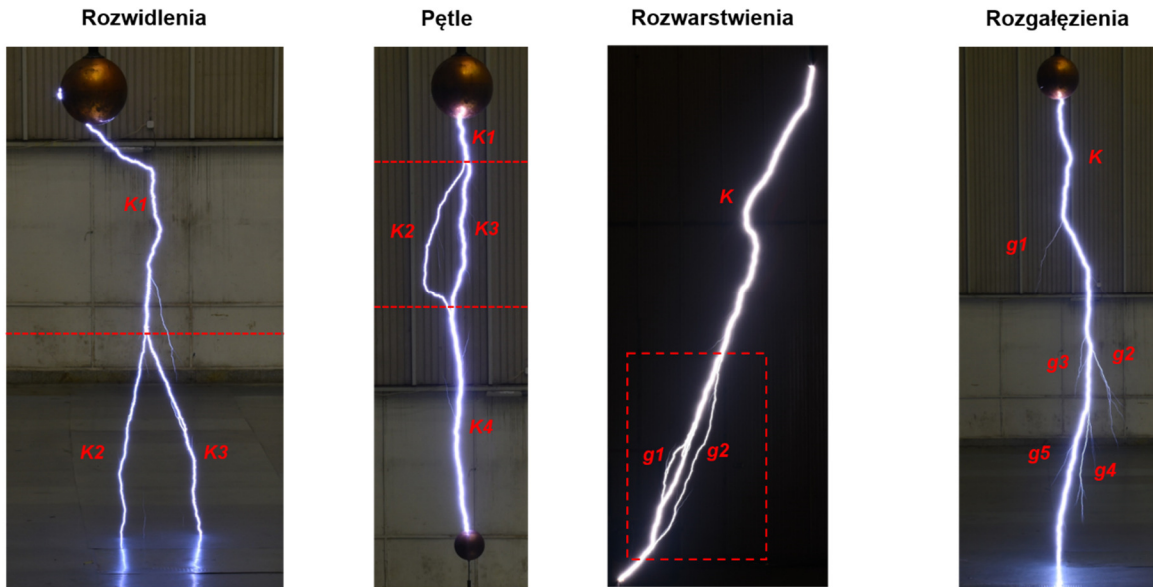


Rys. 9.13 Porównanie wyników wyznaczania trajektorii wyładowania dla iskier pokazanych na Rys. 9.12 uzyskanych metodami ścieniania, uśredniania oraz triangulacji

Zastosowanie metody uśredniania i triangulacji pozwala na uzyskanie linii centralnej głównego kanału niezależnie od stopnia skomplikowania iskry wynikającego z liczby, rozmiaru gałęzi oraz właściwości badanego układu, związanego z rodzajem zastosowanych elektrod. Można przyjąć, że metody średniej oraz triangulacji są bardziej stabilne, co stanowi o ich przewadze w porównaniu z metodą ścieniania, w kontekście analizy dużych zbiorów iskier o zróżnicowanym kształcie.

W tym miejscu należy zauważyć, że rozgałęzienia nie są jedynymi zjawiskami wpływającymi na kształt kanału wyładowania. Na Rys. 9.14 pokazano przykłady najczęściej obserwowanych *odkształceń*, komplikujących bezpośrednią analizę własności geometrycznych iskry długiej. W tego typu przypadkach omówione powyżej metody mogą okazać się niewystarczające i konieczne jest dokonanie dodatkowych przekształceń. Jednym z najprostszych jest podział iskry

na kilka części. Metoda ta może być zastosowana w przypadku rozwidleń, pętli oraz rozgałęzień (patrz Rys. 9.14). Dzięki dokonaniu podziału, wyodrębnianych jest kilka kanałów $K1$, $K2$, $K3$, ..., które analizuje się odrębnie przy wykorzystaniu znanych metod analizy geometrii. Podobną technikę można też zastosować, gdy istotne jest zbadanie własności głównego kanału wyładowania wraz z dołączonymi do niego gałęziami. W takim przypadku iskra zostaje podzielona na główny kanał wyładowania K oraz dodatkowe gałęzie, które traktowane są jako osobne obiekty $g1$, $g2$, $g3$,



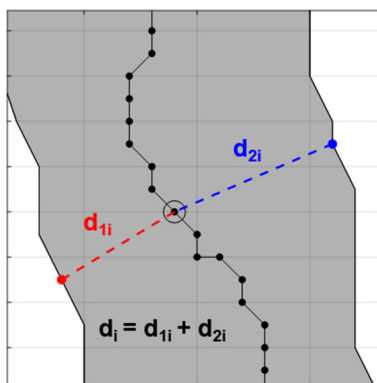
Rys. 9.14 Przykłady najczęściej obserwowanych odkształceń kanału wyładowania

Opisane przypadki odkształceń wymagają indywidualnego podejścia i mogą utrudniać analizę dużych populacji wyładowań. Literatura również wzmiankuje występowanie takich zjawisk [124], jednak są one rzadkie i w niniejszej pracy zostały pominięte.

9.4. Weryfikacja działania metod wyznaczania trajektorii wyładowania

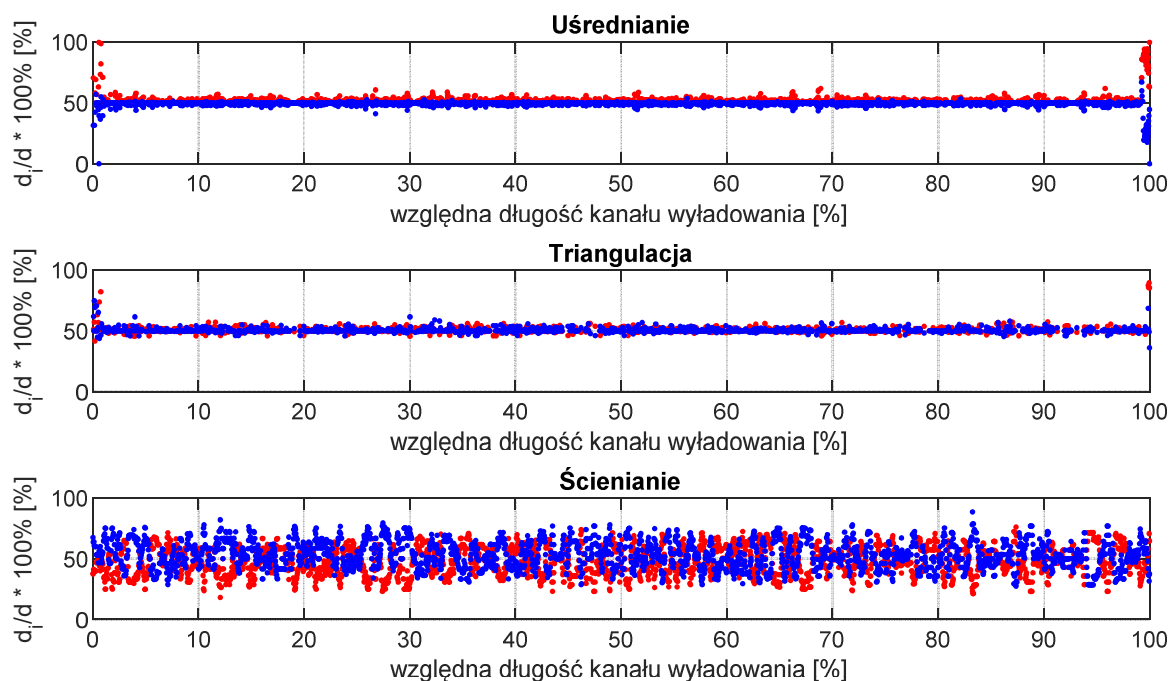
Jak pokazano na Rys. 9.7 i Rys. 9.9, każda z omawianych metod daje inne rezultaty, a wielkość tych różnic jest zależna od rozpatrywanego przypadku. Precyzję, z jaką każda z metod odtwarza linię centralną, można określić wyznaczając odległość trajektorii od granic kanału wyładowania. Na Rys. 9.15 przedstawiono fragment kanału wyładowania, służący do oceny jakości odtworzenia linii centralnej, wyznaczony metodą ścieniania. Czarnymi kropkami zaznaczono kolejne punkty trajektorii. Odcinki d_{1i} oraz d_{2i} oznaczone liniami przerywanymi są odległościami danego punktu trajektorii P_i od granic kanału wyładowania. Suma odległości d_{1i} oraz d_{2i} jest zatem szerokością kanału wyładowania d_i wyznaczoną dla punktu P_i . W przypadku gdy punkt

P_i jest położony na środku kanału wyładowania, odległości d_{1i} oraz d_{2i} są takie same i wyrażone w wartościach względnych stanowią 50% szerokości kanału wyładowania.



Rys. 9.15 Sposób wyznaczania parametrów wykorzystywany do oceny jakości odtworzenia linii centralnej

Na Rys. 9.16 przedstawiono wykres przedstawiający względną odległość wszystkich punktów trajektorii od granic kanału wyładowania, wyznaczoną dla trzech omawianych metod: metody uśredniania, metody triangulacji, metody ścieniania. Odległości wykreślono w funkcji względnej długości kanału wyładowania, przyjmując, że punkt początkowy (0% względnej długości kanału wyładowania) znajduje się na elektrodzie wysokonapięciowej, a punkt końcowy (100% względnej długości kanału wyładowania) w miejscu zetknięcia kanału wyładowania z elektrodą niskonapięciową.



Rys. 9.16 Wykresy względnej odległości wszystkich punktów trajektorii od granic kanału wyładowania, wyznaczone dla trzech metod: metody uśredniania, metody triangulacji, metody ścieniania

Wyniki przedstawione na Rys. 9.16 pokazują, że w przypadku obu zaproponowanych metod geometrycznych (metoda uśredniania, metoda triangulacji) rozrzut wartości d_{1i} oraz d_{2i} jest niewielki. Świadczy to o tym, że trajektoria wyładowania wyznaczona tymi metodami tylko w niewielkim stopniu odbiega od linii centralnej przechodzącej przez środek kanału wyładowania. Inaczej wygląda to w przypadku metody ścieniania, dla której widoczny jest stosunkowo duży rozrzut wyników świadczący o znacznym odchyleniu wyznaczonej tą metodą trajektorii od linii centralnej.

W Tab. 9.2 przedstawiono średnie odległości d_1 oraz d_2 wraz z odpowiadającymi im odchyleniami standardowymi, odpowiadające danym wykreślonym na Rys. 9.16. W przypadku wszystkich rozpatrywanych metod, średnie wartości d_1 oraz d_2 są zbliżone i zawierają się w granicach $50 \pm 3\%$. Różnice pomiędzy metodami ujawniają się jednak przy porównaniu odchyleń standardowych, które obrazują rozrzut wartości widoczny na Rys. 9.16. W związku z tym można przyjąć, że odchylenie standardowe jest miarą jakości tego, jak dokładnie wyznaczona trajektoria odwzorowuje linię centralną kanału wyładowania.

Tab. 9.2 Odchylenie linii centralnej – porównanie metod

Metoda	d_1 [%]	σ_{d1} [%]	d_2 [%]	σ_{d2} [%]
ścienianie	51,2	1,7	49,6	1,0
uśrednianie	50,6	1,7	50,5	1,7
triangulacja	48,2	11,1	52,9	11,2

Wyniki zaprezentowane na Rys. 9.16 oraz w Tab. 9.2 zostały uzyskane dla iskry przedstawionej na Rys. 9.9, która stanowi pewien szczególny przypadek (iskra o dużej liczbie gałęzi, dla której trzeba stosować wysoki próg detekcji – przypadek szczególnie niekorzystny dla metod morfologicznych). W Tab. 9.3 pokazano wyniki analogicznych obliczeń wykonanych dla wyładowań uzyskanych przy wykorzystaniu innych rodzajów napięć oraz biegunowości (do obliczeń wykorzystano przykładowe iskry każdego rodzaju).

Wyniki przedstawione w Tab. 9.3 pokazują, że niezależnie od rodzaju wyładowania oraz jego biegunowości, uzupełnienie dotychczas stosowanych metod morfologicznych o zaprezentowane wyżej dodatkowe przekształcenia geometryczne, pozwala na uzyskanie znacznie lepszej zbieżności trajektorii wyładowania do linii centralnej.

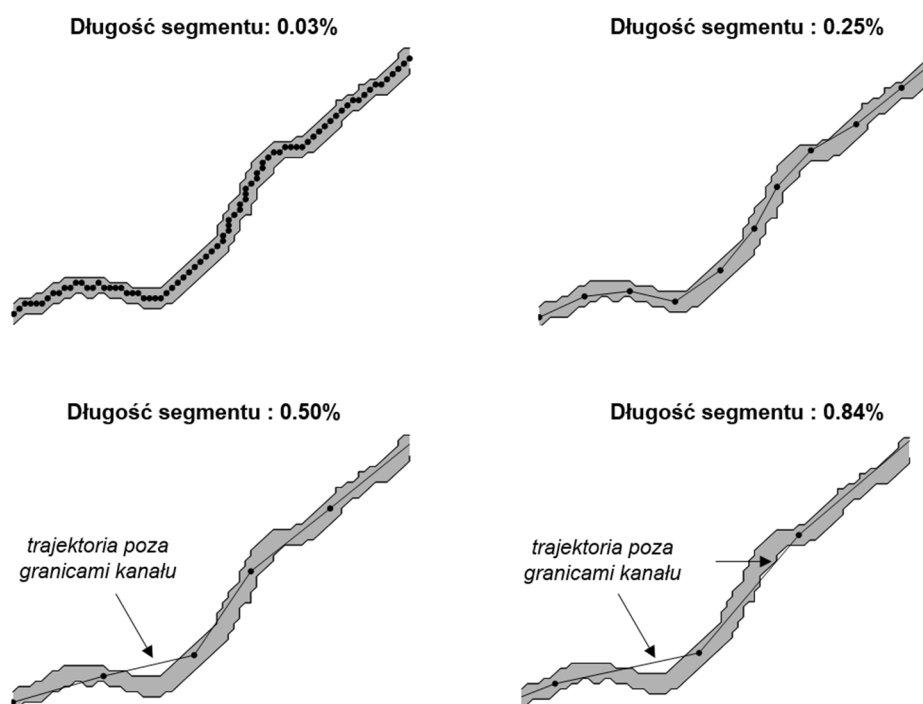
Tab. 9.3 Odchylenie linii centralnej – porównanie metod (wiele iskier)

Rodzaj wyładowania	Metoda	d_1 [%]	σ_{d1} [%]	d_2 [%]	σ_{d2} [%]
SI +	uśrednianie	53,0	4,8	49,5	2,9
	triangulacja	51,9	5,6	51,7	5,6
	ścienianie	44,6	<u>10,0</u>	58,2	<u>9,0</u>
SI -	uśrednianie	51,7	2,5	49,3	1,7
	triangulacja	50,5	1,5	50,5	1,4
	ścienianie	48,9	<u>3,0</u>	52,3	<u>3,1</u>
LI +	uśrednianie	53,0	4,8	49,5	2,9
	triangulacja	51,9	5,6	51,7	5,6
	ścienianie	44,6	<u>10,0</u>	58,2	<u>9,0</u>
LI -	uśrednianie	51,7	2,8	49,2	2,2
	triangulacja	50,8	2,3	50,7	2,3
	ścienianie	45,0	<u>11,4</u>	56,3	<u>11,5</u>

9.5. Wykorzystanie triangulacji w celu podziału kanału wyładowania na segmenty

Ostatnią kwestią związaną ze sposobem wyznaczania trajektorii wyładowania jest wspomniany już problem doboru właściwej długości segmentu obliczeniowego. Wspólną cechą metod, które były dotychczas stosowane w literaturze, jest to, że wyznaczone za ich pomocą segmenty posiadają stałą długość nie tylko dla rozpatrywanej iskry, ale też dla całej badanej populacji. Tego typu podejście rodzi kilka problemów, mających wpływ na uzyskiwane rezultaty, co staje się szczególnie istotne w przypadku badania dużej populacji iskier.

W danej populacji mogą znajdować się iskry, które znacząco różnią się od pozostałych iskier kształtem kanału wyładowania. Dodatkowo, poszczególne fragmenty jednej iskry często wykazują lokalnie bardzo duże różnice w krętości. Z tego względu zastosowanie stałej długości segmentu może prowadzić do nieprawidłowego odtworzenia trajektorii wyładowania. Do takich sytuacji dochodzi, gdy segment obliczeniowy jest zbyt długi, co skutkuje pominięciem fragmentów kanału wyładowania. Na Rys. 9.17 przedstawiono przebieg trajektorii wyładowania dla czterech długości segmentu. Segment o długości 0,03% jest najkrótszym możliwym segmentem dla przedstawionej iskry, co wynika z rozdzielczości wykonanej fotografii. Pozostałe długości segmentów odpowiadają przykładowym wartościom spotykanym w literaturze [52-53]. Z przedstawionego rysunku wynika, że segmenty o długości 0,50% oraz 0,84% są zbyt długie, ponieważ fragmenty trajektorii znajdują się poza granicami kanału wyładowania.

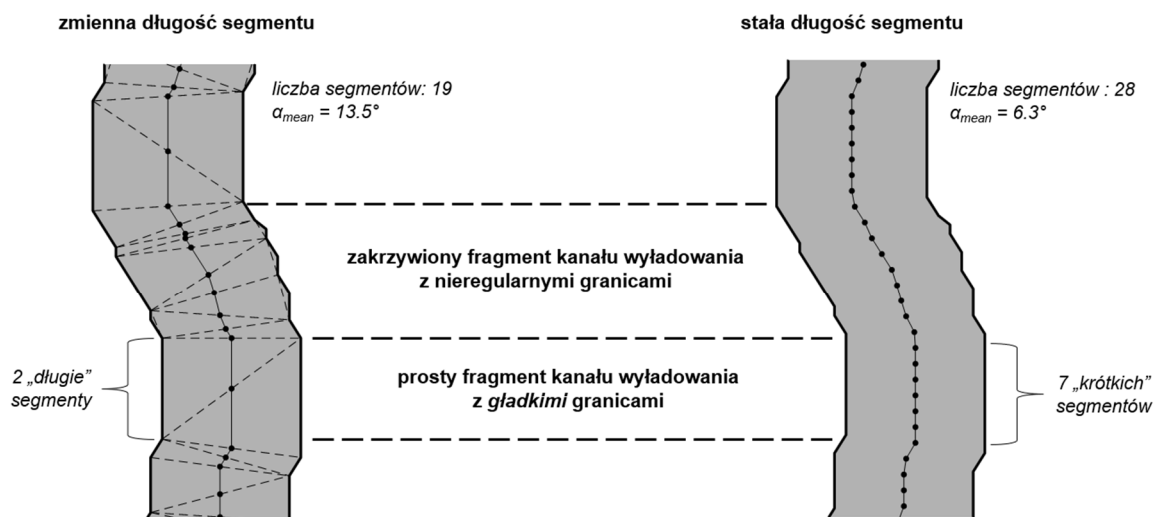


Rys. 9.17 Sposób odtworzenia trajektorii dla czterech wybranych długości segmentów obliczeniowych

Zastosowanie stałej długości segmentu nie jest zatem rozwiązaniem optymalnym. Wraz ze wzrostem liczebności oraz zróżnicowania populacji iskier, zwiększa bowiem niepewność pomiaru kątów krętości. W związku z powyższym najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie metod pozwalających na wyznaczanie trajektorii składającej się z segmentów o zmiennej długości, dostosowanej indywidualnie nie tyle do jednej iskry, lecz do jej poszczególnych fragmentów. W ten sposób możliwe jest zbliżenie się do stanu, w którym długość segmentu obliczeniowego jest dobrana w taki sposób, aby wyznaczona trajektoria odwzorowywała naturalną zmienność kanału wyładowania [53]. Do tej pory tego typu podejście nie było stosowane, gdyż, jak wskazuje literatura, w znacznym stopniu komplikowałoby analizę wyników badań. Rozwiązaniem tego problemu może być wykorzystanie przedstawionej w niniejszym rozdziale metody triangulacji.

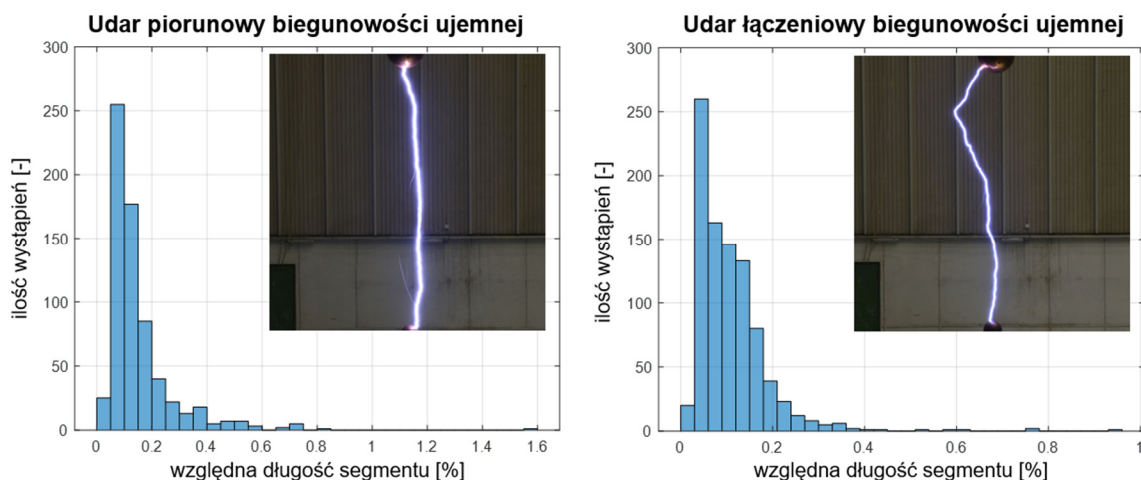
Na Rys. 9.18 porównano dwie trajektorie wyładowania wyznaczone metodami opartymi o stałą i zmienną długość segmentu obliczeniowego, przy czym zmienną długość segmentu uzyskano przy użyciu metody triangulacji. W przypadku metody o stałej długości segmentu prawidłowe wyznaczenie trajektorii w miejscach gdzie kanał wyładowania jest zakrzywiony a jego granice są nieregularne wymaga zastosowania segmentu o mniejszej długości. Efektem tego jest zbyt duża ilość liczba segmentów na odcinkach, gdzie iskra wykazuje małą zmienność i rozwija się niemal w linii prostej. Z kolei w przypadku zastosowania metody triangulacji, długość segmentu jest lokalnie dostosowywana do kształtu kanału wyładowania. Dzięki temu możliwe jest

zmniejszenie liczby segmentów niezbędnych do prawidłowego odtworzenia trajektorii. Jest to bardzo ważne, gdyż krętość jest obliczana jako wartość średnia, a zbyt duża liczba segmentów na odcinkach o małej zmienności może zaburzać ostateczny wynik. Dla przykładu krętość fragmentu kanału wyładowania przedstawionego na Rys. 9.18 wynosi $13,5^\circ$ dla metody ze zmienną długością segmentu oraz $6,3^\circ$ dla metody ze stałą długością segmentu.



Rys. 9.18 Porównanie metod wyznaczania bazujących na zmiennej oraz stałej długości segmentu obliczeniowego

Zastosowanie metody triangulacji pozwala zatem na wyznaczenie trajektorii składającej się z segmentów o zmiennej długości, co umożliwi wierniejsze odzwierciedlenie naturalnej zmienności kanału wyładowania. Efektem tego jest zmniejszenie niepewności pomiaru kątów krętości, dzięki eliminacji efektu sztucznego zaniżania krętości wynikającego ze zbyt małej długości segmentu oraz błędnego odwzorowania trajektorii, co spowodowane jest z kolei zbyt długimi segmentami wychodzącymi poza granice kanału wyładowania. Dodatkowo dzięki zastosowaniu metody triangulacyjnej możliwe jest wyznaczenie długości segmentów obliczeniowych na drodze pomiarów, eliminując tym samym konieczność arbitralnego doboru tego parametru podczas badań symulacyjnych. Przykładowe wyniki pomiaru długości segmentów, na które podzielono kanał wyładowania pokazano Rys. 9.19.



Rys. 9.19 Przykładowe wyniki pomiaru długości segmentów na jakie podzielono kanał wyładowania, uzyskane dla dwóch wybranych iskier długich

9.6. Podsumowanie

Wykonane obliczenia i analizy pokazały, że dokładność stosowanych dotychczas metod wyznaczania trajektorii iskry długiej, opartych wyłącznie na przekształceniach morfologicznych zdjęć wyładowań, może być znacząco poprawiona, dzięki wprowadzeniu dodatkowych przekształceń geometrycznych. Spośród zaproponowanych metod, największe możliwości stwarza zastosowanie w tym celu metody triangulacji.

Największą zaletą tej metody jest możliwość podziału kanału wyładowania na segmenty o zmiennej długości, w sposób, który oddaje naturalną zmienność trajektorii rozwoju iskry długiej. Pozwala to na rozwiązanie podnoszonego w literaturze problemu związanego z arbitralnym doбором długości segmentu, mającym wpływ zarówno na wyniki analizy krętości, jak i na sposób wykonywania badań symulacyjnych z wykorzystaniem modelowania fraktalnego. Stanowi to nawiązanie do jednej z tez niniejszej rozprawy, mówiącej, że możliwy jest podział kanału wyładowania na segmenty oddające naturalny sposób zmian kierunku trajektorii rozwoju iskry długiej.

Dodatkowo, trajektoria wyznaczona metodą triangulacji jest dużo mniej zależna od czynników zewnętrznych związanych ze sposobem wykonywania zdjęć kanału wyładowania. Dzięki temu możliwe jest bezpośrednie porównywanie wyników badań wykonanych w różnych warunkach i przy wykorzystaniu różnego rodzaju aparatury rejestrującej obraz wyładowań.

Odporność na czynniki zewnętrzne, takie jak warunki oświetlenia, jasność kanału wyładowania czy też obecność w pomiarze odbić światła, sprawia że metoda triangulacyjna może być stosowana do różnego rodzaju wyładowań różniących się pomiędzy sobą intensywnością świecenia

oraz liczbą gałęzi. W przypadku stosowania metod opartych wyłącznie o przekształcenia morfologiczne, każdy rodzaj wyładowania musi być analizowany indywidualnie, a niekiedy nawet w tej samej populacji iskier zdarzają się wyładowania na tyle różniące się od ogółu, że przyjęte w analizie parametry (np. próg jasności lub długość segmentu) prowadziły do generowania błędnych wyników. Stanowi to istotny problem w przypadku analizy dużych populacji wyładowań, który może istotnie zwiększać niepewność pomiaru przebiegu trajektorii. Zastosowanie triangulacji pozwala zatem zmniejszyć wartości błędów analizy trajektorii oraz jednocześnie usprawnia sam proces wykonywania pomiarów.

Zaproponowana w niniejszej rozprawie metoda wyznaczania trajektorii wyładowań iskrowych pozwala na realizację następujących celów:

1. Umożliwiono automatyzację pozyskiwania danych pomiarowych, a w konsekwencji analizy różnych rodzajów wyładowań, co jest istotnym zagadnieniem w kontekście analizy dużych populacji iskier o zróżnicowanych cechach geometrycznych;
2. Umożliwiono podział kanału wyładowania na segmenty w sposób odzwierciedlający naturalną zmienność kanału wyładowania, co stanowi odpowiedź na jedną z opisanych przesłanek wynikających z badań symulacyjnych.

10. Badania trajektorii iskry długiej

10.1. Procedura wykonywania pomiarów

Pomiary trajektorii rozwoju skry długiej zostały wykonane dla 12. konfiguracji układu pomiarowego (Tab. 10.1). Podczas badań wykonano pomiary dla dwóch długości przerw iskrowych: $d = 3,3$ m oraz $d = 5,5$ m, dwóch układów elektrod: kula-kula oraz kula-płyta, dwóch rodzajów wyładowań: udar piorunowy oraz udar łączeniowy [51, 125], a także dwóch biegunowości tych wyładowań: dodatniej oraz ujemnej. Ze względu na ograniczenia układu probierczego związane z maksymalną wartością napięcia probierczego, w przypadku odległości $d = 5,5$ m wykonano pomiary wyłącznie dla biegunowości dodatniej.

Tab. 10.1 Konfiguracje układu laboratoryjnego wykorzystane w trakcie pomiarów

Długość przerwy iskrowej	Układ elektrod	Rodzaj wyładowania	Biegunowość wyładowania	Konfiguracja
$d = 3,3$ m	kula-płyta (S-P)	udar łączeniowy (SI)	dodatnia (+)	1
			ujemna (-)	2
		udar piorunowy (LI)	dodatnia (+)	3
			ujemna (-)	4
	kula-kula (S-S)	udar łączeniowy (SI)	dodatnia (+)	5
			ujemna (-)	6
		udar piorunowy (LI)	dodatnia (+)	7
			ujemna (-)	8
$d = 5,5$ m	kula-płyta (S-P)	udar łączeniowy (SI)	dodatnia (+)	9
		udar piorunowy (LI)	dodatnia (+)	10
	kula-kula (S-S)	udar łączeniowy (SI)	dodatnia (+)	11
		udar piorunowy (LI)	dodatnia (+)	12

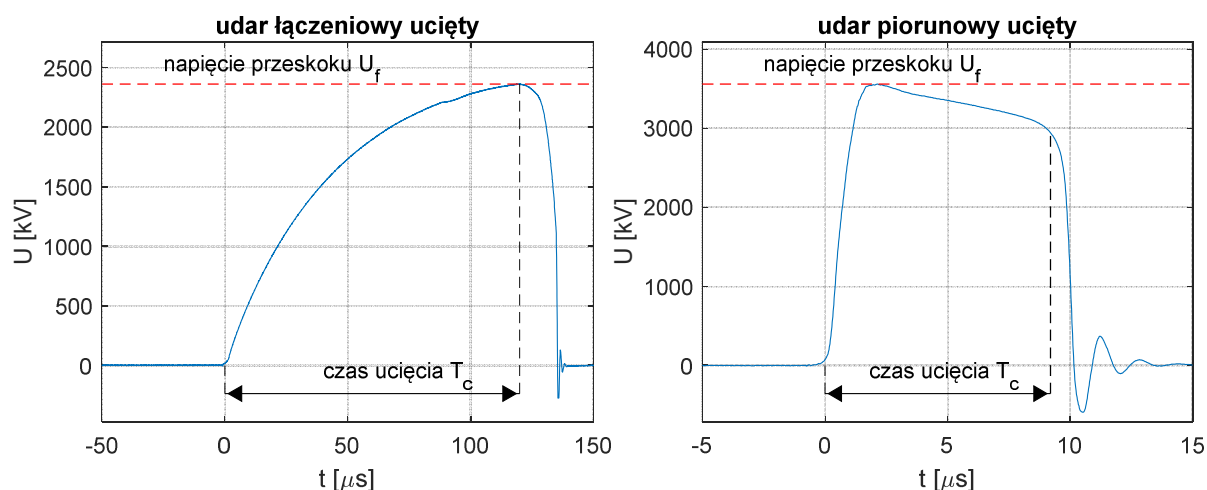
Pomiary laboratoryjne były podzielone na dwa etapy. W pierwszym z nich wyznaczano 50-procentowe napięcie przeskoku, U_{50} [126]. Wartość U_{50} dla każdej konfiguracji została określona na podstawie 31 wyładowań, zgodnie z procedurą D opisaną w normie IEC 60060-1 [51],

określaną również w literaturze mianem tzw. metody „góra-dół”. Wyniki pomiarów U_{50} oraz odpowiadające im wartości odchylenia standardowego σ_{u50} przedstawiono w Tab. 10.2.

Tab. 10.2 Wyniki pomiaru napięć przeskoku oraz czasów ucięcia

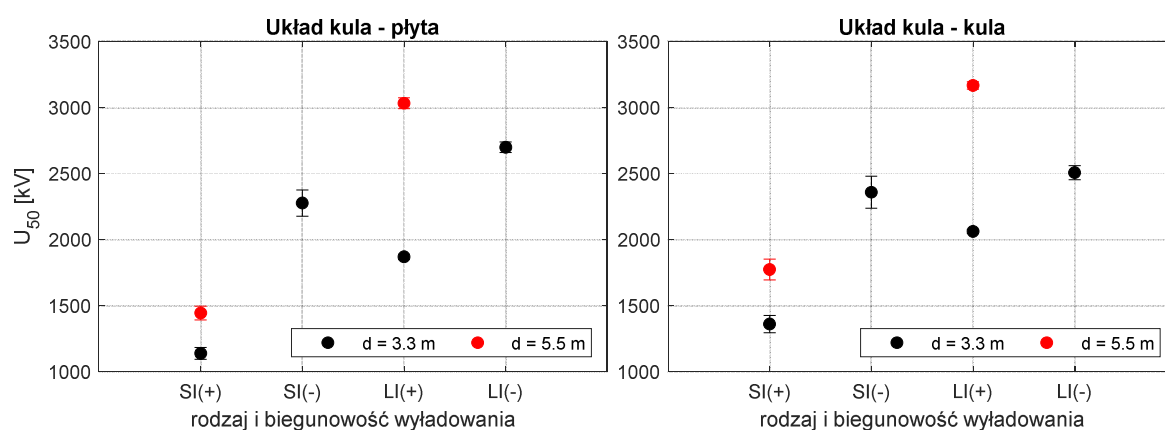
Rodzaj i biegunowość wyładowania	Układ elektrod	Długość przerwy iskrowej: d [m]	U_{50} [kV]	σ_{u50} [kV]	U_{mean} [kV]	σ_U [kV]	T_{Cmean} [μ s]	σ_{Tc} [μ s]
SI (+)	S - P	3,3	1140	45	1200	12,1	178,1	15,2
SI (-)	S - P	3,3	2277	99	2161	147,3	108,9	25,7
LI (+)	S - P	3,3	1870	20	2002	13,8	12,0	1,8
LI (-)	S - P	3,3	2699	41	2857	18,4	6,4	0,7
SI (+)	S - S	3,3	1362	66	1423	25,3	166,6	22,8
SI (-)	S - S	3,3	2359	120	2295	146,4	124,7	39,2
LI (+)	S - S	3,3	2063	16	2101	13,7	13,3	3,2
LI (-)	S - S	3,3	2507	53	2547	16,9	9,5	1,2
SI (+)	S - P	5,5	1446	52	1598	7,4	222,4	11,1
LI (+)	S - P	5,5	3032	40	3181	8,5	19,3	6,0
SI (+)	S - S	5,5	1775	79	1935	16,5	226,1	27,9
LI (+)	S - S	5,5	3167	28	3364	17,8	14,5	3,6
Na podstawie zapisów zawartych w [127-129] przyjmuje się, że niepewność pomiaru wartości napięcia udarowego nie przekraczała 2,3 % wartości mierzonej, przy założeniu, że niepewność pomiaru rozszerzona została określona jako niepewność standardowa pomiaru pomnożona przez współczynnik rozszerzenia $k = 2$, co dla rozkładu normalnego jest równoznaczne z prawdopodobieństwem rozszerzenia wynoszącym w przybliżeniu 95%.								

Na Rys. 10.1 przedstawiono sposób określania wielkości, na podstawie których wyznaczono parametry zawarte w Tab. 10.2 (napięcie przeskoku U_f oraz czas ucięcia T_c). W przypadku udarów łączeniowych ucięcie napięcia następowało zawsze na czole udaru ($T_c < T_p$), natomiast dla udarów piorunowych ucięcie występowało na grzbiecie, w czasie pomiędzy czasem czoła oraz czasem do półszczytu ($T_1 < T_c < T_2$). Jako wartość napięcia przeskoku przyjęto maksymalną wartość napięcia jaka została zarejestrowana do chwili wystąpienia przeskoku (ucięcia udaru). Oznacza to, że dla udarów piorunowych napięciem przeskoku była wartość szczytowa definiowana zgodnie z IEC 60060-1 [51], natomiast w przypadku udarów łączeniowych była to wartość napięcia jaka występowała w momencie ucięcia udaru. Podczas pomiaru pięćdziesięcioprocentowego napięcia przeskoku U_{50} dla udarów łączeniowych, jak również w obliczeniach, brano pod uwagę tylko te wyładowania, które nie wywoływały przeskoku.



Rys. 10.1 Sposób określania napięcia przeskoku oraz czasu ucięcia dla udarów łączeniowych oraz piorunowych

Na podstawie uzyskanych wyników (Rys. 10.2) można zauważyć, że zgodnie z oczekiwaniami: (1) wytrzymałość układu kula-kula jest nieznacznie wyższa niż układu kula-płyta, (2) napięcie przeskoku jest niższe w przypadku wyładowań o biegunowości dodatniej, (3) zwiększenie długości przerwy iskrowej w większym stopniu wpływa na wartość napięcia przeskoku dla udarów piorunowych. Oznacza to, że z punktu widzenia badania parametrów trajektorii iskry długiej najbardziej korzystne wydaje się być wykonywanie badań w układach kula-płyta przy wykorzystaniu udarów łączeniowych biegunowości dodatniej, gdyż przy ograniczeniu maksymalnej wartości napięcia probierczego pozwalają one na przeprowadzenie badań w układach o najdłuższych przerwach iskrowych.



Rys. 10.2 Wyniki pomiaru 50-procentowego napięcia przeskoku

W drugim etapie badań, na podstawie wyznaczonego 50-procentowego napięcia przeskoku określano wartości napięć probierczych U_p , pozwalających na uzyskanie w przybliżeniu 95% prawdopodobieństwa wystąpienia wyładowania iskrowego:

$$U_p = U_{50} + 2 \cdot \sigma_{u50}. \quad (10.1)$$

Przyjęcie takiej wartości napięcia probierczego miało na celu skrócenie czasu wykonania badań, poprzez minimalizację liczby udarów niedoprowadzających do wystąpienia wyładowania. Ponieważ wartość napięcia przeskoku podlega wpływowi czynników stochastycznych i nigdy nie jest taka sama dla każdego wyładowania, napięcie przeskoku określa się przy użyciu parametrów rozkładu normalnego tej wielkości. Wartość średnia U_{mean} zestawiona dla wykonanych pomiarów w Tab. 10.2, odpowiada średniej rzeczywistej wartości napięcia przeskoku dla danej konfiguracji. W przypadku udarów piorunowych, nie różni się ona od założonej wartości o więcej niż 5%. Największe różnice obserwowane są dla udarów łączeniowych biegunowości ujemnej i sięgają one 14%, lecz wynika to faktu, że w przypadku tych udarów średni czas ucięcia $T_{C\text{mean}}$ jest znacznie krótszy od czasu czoła T_p . Zgodnie z oczekiwaniem, w porównaniu do udarów piorunowych udary łączeniowe charakteryzują się również większym rozrzutem wartości napięcia przeskoku σ_U , wynoszącym dla udarów łączeniowych od 3,6% do 5,1%.

Następnie określano liczbę wyładowań, dla których określano parametry opisujące trajektorię wyładowań. Biorąc pod uwagę wyłącznie czynniki statystyczne, najlepszym byłoby wykonanie pomiarów dla serii o maksymalnie dużej liczbie wyładowań. Jednakże ze względów praktycznych konieczne jest ograniczanie liczebności serii pomiarowej. Głównymi czynnikami determinującymi liczbę wyładowań w serii są zmienne warunki atmosferyczne oraz odstęp czasu między kolejnymi wyładowaniami. Wartość napięcia przeskoku oraz mechanizm rozwoju wyładowania są w pewnym stopniu zależne od warunków atmosferycznych. Z tego względu istotne jest, aby czas potrzebny na wykonanie jednej serii pomiarów był jak najkrótszy. Dzięki temu możliwe jest zachowanie w przybliżeniu stałych warunków atmosferycznych dla każdego wyładowania tworzącego badaną populację. Z drugiej strony, konieczne jest również zachowanie odpowiednio długiego czasu pomiędzy kolejnymi wyładowaniami, pozwalającego na pełną regenerację wytrzymałości elektrycznej przerwy iskrowej. Zbyt krótki czas pomiędzy kolejnymi udarami mógłby bowiem sprawiać, że ładunki elektryczne pozostałe po wyładowaniu wpływałyby na mechanizm rozwoju kolejnej iskry. Mając na uwadze powyższe czynniki, przyjęto że jedna seria pomiarowa składała z 45. wyładowań, generowanych w 55. sekundowych odstępach czasu. Tym samym, w trakcie pomiarów wykonano 1080 fotografii przedstawiających 540 wyładowania.

Ze względu na liczbę badanych konfiguracji oraz liczebność serii pomiarowych, nie było jednak możliwe utrzymanie stałych warunków atmosferycznych dla wszystkich badanych wyładowań. Niemniej jednak, wyniki pomiarów przedstawione w Tab. 10.3 pokazują, że wszystkie

pomiary zostały wykonane w relatywnie zbliżonych warunkach otoczenia. Wartości współczynników poprawkowych wskazują na to, że w każdej badanej konfiguracji warunki atmosferyczne nie wpływały na wartość napięcia probierczego o więcej niż 2,6%. Przy czym należy zaznaczyć, że wszystkie badania zostały wykonane przy wysokiej wilgotności względnej, zawierającej się w granicach od 70% do 88%.

Tab. 10.3 Warunki atmosferyczne panujące podczas pomiarów oraz wartość współczynnika poprawkowego

Rodzaj i biegunowość wyładowania	Układ elektrod	Długość przerwy iskrowej: d [m]	t [°C]	R [%]	p [hPa]	K_t [-]
SI (+)	S - P	3,3	8,4	84	999	0,993
SI (-)	S - P	3,3	7,2	78	1000	1,001
LI (+)	S - P	3,3	7,2	86	999	0,985
LI (-)	S - P	3,3	7,2	86	999	1,022
SI (+)	S - S	3,3	9,1	81	999	0,989
SI (-)	S - S	3,3	7,2	78	1000	1,006
LI (+)	S - S	3,3	7,2	70	1013	0,993
LI (-)	S - S	3,3	7,2	70	1013	1,026
SI (+)	S - P	5,5	7,6	78	1002	0,996
LI (+)	S - P	5,5	6,8	83	1003	0,986
SI (+)	S - S	5,5	7,8	75	1002	0,992
LI (+)	S - S	5,5	8,0	88	999	0,988

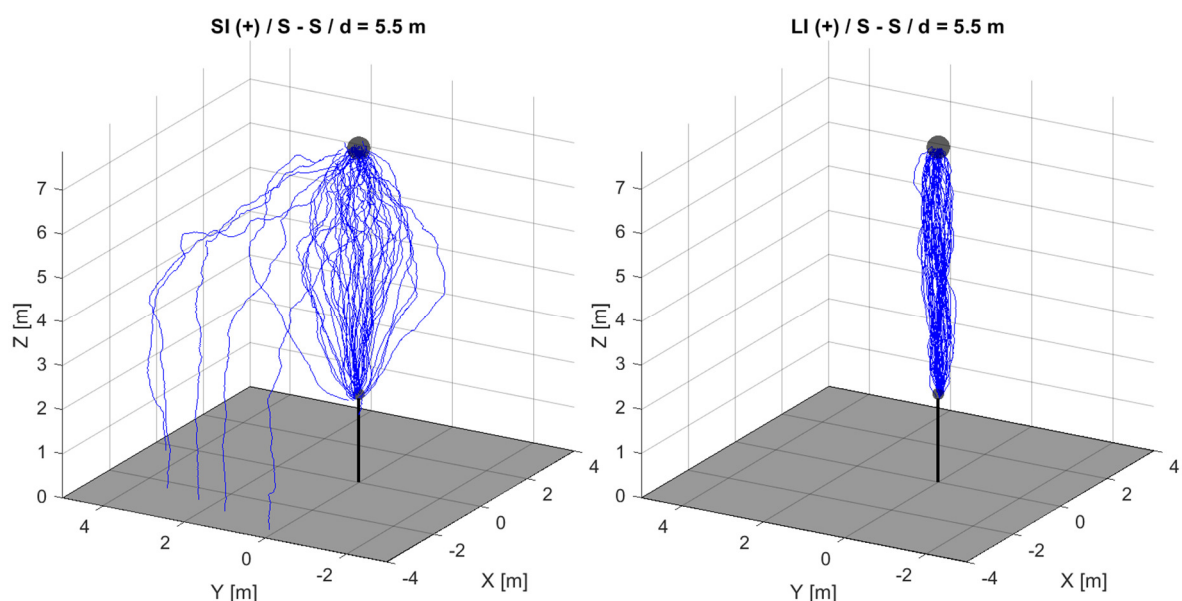
Wykonane pomiary pozwoliły na zrealizowanie następujących celów:

1. Wyznaczono wartości napięć probierczych oraz dodatkowo potwierdzono możliwość wykonania pomiarów dla założeń przedstawionych w Rozdziale 8.4;
2. Określono liczebność serii pomiarowych uwzględniającą wpływ zmiennych warunków atmosferycznych, wzajemne oddziaływanie wyładowań oraz możliwości układu pomiarowego.

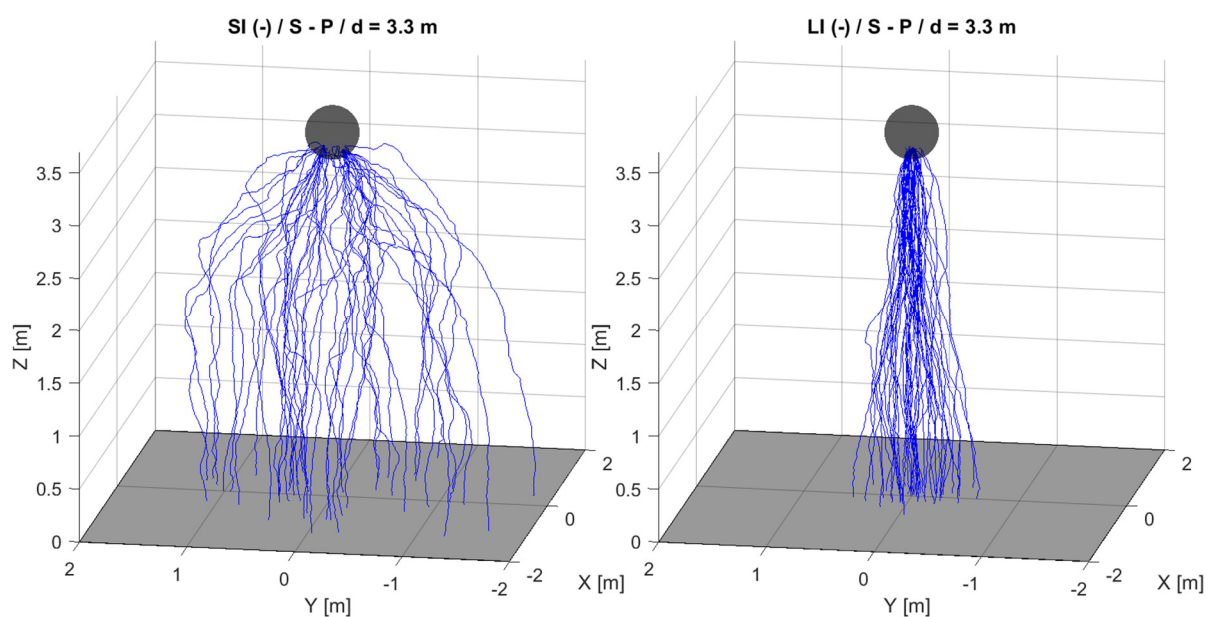
10.2. Potencjalny obszar rozwoju wyładowania

W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskano zastaw danych numerycznych zawierających informację o współrzędnych przestrzennych opisujących trajektorie zarejestrowanych wyładowań. W celu zobrazowania różnic jakie występują pomiędzy trajektoriami różnych populacji wyładowań, zwłaszcza tych, których źródłem są udary łączeniowe i piorunowe, zaproponowano przedstawianie wyników pomiarów w postaci wykresów przedstawiających

jednocześnie wszystkie trajektorie danej populacji. Dzięki przedstawieniu wyników w sposób graficzny, polegający na jednoczesnym ukazaniu wszystkich wyładowań tworzących daną populację, można zauważyć, że trajektorie poszczególnych rodzajów wyładowań w znaczący sposób różnią się między sobą. Na Rys. 10.3 oraz Rys. 10.4 pokazano przykładowe porównanie populacji wyładowań uzyskanych dla udarów łączeniowych oraz piorunowych, odpowiednio w układach kula-kula oraz kula-płyta. Trajektorie wyładowań będących następstwem udarów piorunowych wykazują większe skupienie wokół osi przerwy iskrowej (jako oś przerwy iskrowej uznaje się najkrótszą linię prostą łączącą elektrody probiercze), czego efektem jest zmniejszenie potencjalnego obszaru rozwoju wyładowania.

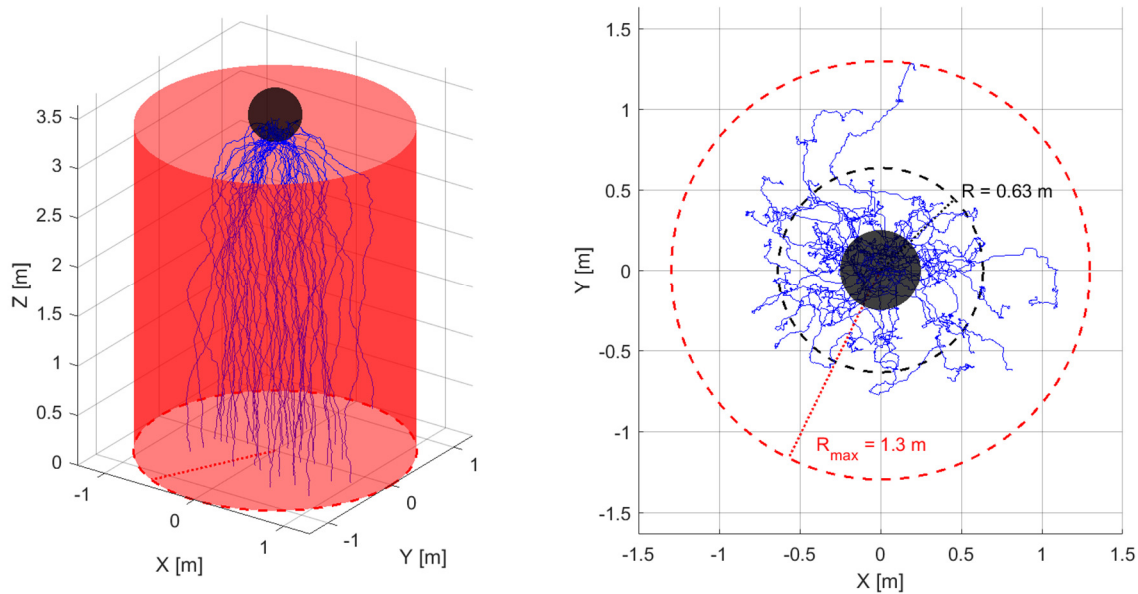


Rys. 10.3 Przykłady populacji wyładowań w układzie kula-kula



Rys. 10.4 Przykłady populacji wyładowań w układzie kula-płyta

Dla badanych układów elektrod zasięg potencjalnego obszaru rozwoju wyładowania można wyrazić jako średnią odległość R pomiędzy osią przerwy iskrowej, a najdalej położonymi punktami trajektorii poszczególnych wyładowań. Możliwe jest również określenie maksymalnego zasięgu potencjalnego obszaru rozwoju wyładowania $R_{\max}$, definiowanego jako promień cylindra, którego oś stanowi oś przerwy iskrowej, przy czym promień wyznaczany jest przez punkt należący do trajektorii wyładowania położony najdalej od osi przerwy iskrowej. Sposób wyznaczania zasięgu potencjalnego obszaru wyładowania pokazano na Rys. 10.5.

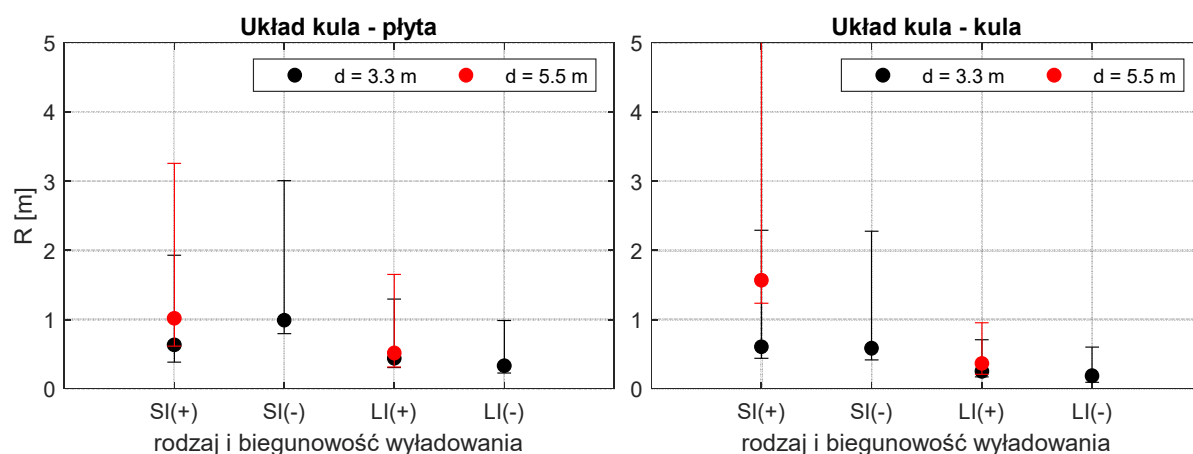


Rys. 10.5 Potencjalny obszar rozwoju wyładowania – SI (+) / S - P / d = 3,3 m

Na Rys. 10.6 przedstawiono wyniki pomiaru zasięgu potencjalnego obszaru rozwoju wyładowania dla przykładowej iskry zarejestrowanej w układzie SI (+) / S - P / d = 3,3 m. Punktami oznaczono wartość średniej odległości R , a słupkami oznaczono graniczne wartości $R_{\min}$ oraz $R_{\max}$. Na podstawie przedstawionej analizy wyników wykonanych pomiarów można stwierdzić, że:

1. Niezależnie od układu elektrod oraz od biegunowości wyładowania, iskry będące następstwem uderzeń łączeniowych posiadają większy potencjalny obszar wyładowania;
2. Zwiększenie długości przerwy iskrowej powoduje zwiększenie potencjalnego obszaru rozwoju wyładowania, przy czym wpływ ten jest większy w przypadku uderzeń łączeniowych;
3. W przypadku uderzeń łączeniowych istnieje większe prawdopodobieństwo występowania wyładowań, których zasięg znacząco odbiega od średniego zasięgu całej populacji (większe różnice pomiędzy wartościami R a $R_{\max}$);

4. Zwiększenie długości przerwy iskrowej powoduje zwiększenie prawdopodobieństwa występowania wyładowań, których zasięg odbiega od średniego zasięgu całej populacji, przy czym wpływ ten jest większy w przypadku udarów łączeniowych;
5. Rodzaj układu elektrod oraz biegunowość wyładowania nie mają większego wpływu na potencjalny zasięg obszaru rozwoju wyładowania oraz na prawdopodobieństwo występowania wyładowań, których zasięg odbiega od średniego zasięgu całej populacji.



Rys. 10.6 Zasięg potencjalnego obszaru rozwoju wyładowania

Na tej podstawie można zatem wnioskować, że rozwój wyładowań będących następstwem udarów łączeniowych jest w większym stopniu zależny od wpływu czynników losowych, niż ma to miejsce w przypadku udarów piorunowych. Kierunek rozwoju wyładowań będących następstwem udarów piorunowych jest bardziej zbliżony do kierunku wyznaczanego przez maksymalny gradient potencjału elektrycznego. W kontekście modelowania fraktalnego oznacza to, że w przypadku modeli wyładowań łączeniowych spodziewane są mniejsze wartości współczynnika η .

Wykonane pomiary pozwoliły na zrealizowanie następujących celów:

1. Opisano w sposób liczbowy różnice w potencjalnym zasięgu rozwoju wyładowania iskier będących następstwem udarów różnego rodzaju oraz biegunowości;
2. W oparciu o analizę potencjalnej strefy rozwoju wyładowania wskazano na powiązanie współczynnika prawdopodobieństwa η stosowanego w modelowaniu fraktalnym z rodzajem oraz biegunowością wyładowania. Stosowany dotychczas w literaturze sposób określania wartości współczynnika η był związany wyłącznie z wymiarem fraktalnym.

10.3. Wymiar fraktalny

W Tab. 10.4 pokazano wyniki pomiarów wymiaru fraktalnego dla wszystkich zbadanych konfiguracji układu probierczego: SI/LI, +/-, S-P, S-S. Symbolem $D_b(F)$ oznaczono wymiar fraktalny wyznaczony przy założeniu, że wszystkie wyładowania wchodzące w skład danej populacji tworzą jeden obiekt. Natomiast wielkość $D_b(F)_{\text{mean}}$ odpowiada wymiarowi fraktalnemu wyznaczanemu na podstawie średniej wymiarów fraktalnych poszczególnych iskieł danej populacji. Wielkość σ_{Db} jest zatem odchyleniem standardowym odpowiadającym średniej $D_b(F)_{\text{mean}}$.

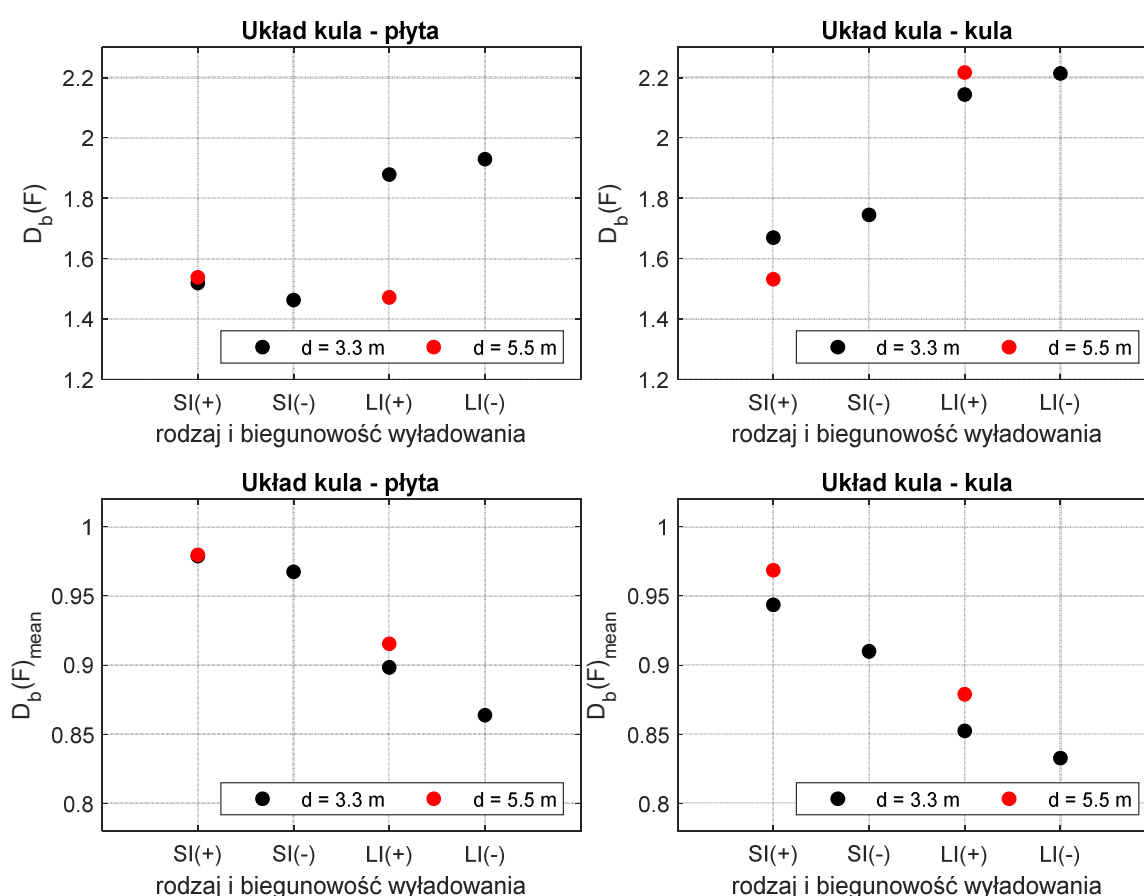
Tab. 10.4 Wyniki pomiaru wymiaru fraktalnego

Rodzaj i biegunowość wyładowania	Układ elektrod	Długość przerwy iskrowej: d [m]	$D_b(F)$ [-]	$D_b(F)_{\text{mean}}$ [-]	σ_{Db} [-]
SI (+)	S-P	3,3	1,52	0,98	0,04
SI (-)	S-P	3,3	1,46	0,97	0,03
LI (+)	S-P	3,3	1,88	0,90	0,04
LI (-)	S-P	3,3	1,93	0,86	0,05
SI (+)	S-S	3,3	1,67	0,94	0,04
SI (-)	S-S	3,3	1,74	0,91	0,04
LI (+)	S-S	3,3	2,14	0,85	0,02
LI (-)	S-S	3,3	2,21	0,83	0,02
SI (+)	S-P	5,5	1,54	0,98	0,04
LI (+)	S-P	5,5	1,47	0,92	0,04
SI (+)	S-S	5,5	1,53	0,97	0,04
LI (+)	S-S	5,5	2,22	0,88	0,01

Wyniki zawarte w Tab. 10.4 przedstawiono w sposób graficzny na Rys. 10.7. Na podstawie wykonanych pomiarów można stwierdzić, że:

1. Wymiar fraktalny $D_b(F)$, niezależnie od biegunowości oraz niezależnie od rodzaju elektrod, jest większy w przypadku wyładowań będących następstwem uderów piorunowych;
2. Średni wymiar fraktalny $D_b(F)_{\text{mean}}$ jest w mniejszym stopniu zależny od rodzaju elektrod niż ma to miejsce w przypadku wymiaru fraktalnego $D_b(F)$;
3. Niezależnie od układu elektrod, średni wymiar fraktalny $D_b(F)_{\text{mean}}$ dla uderów łączeniowych jest większy;

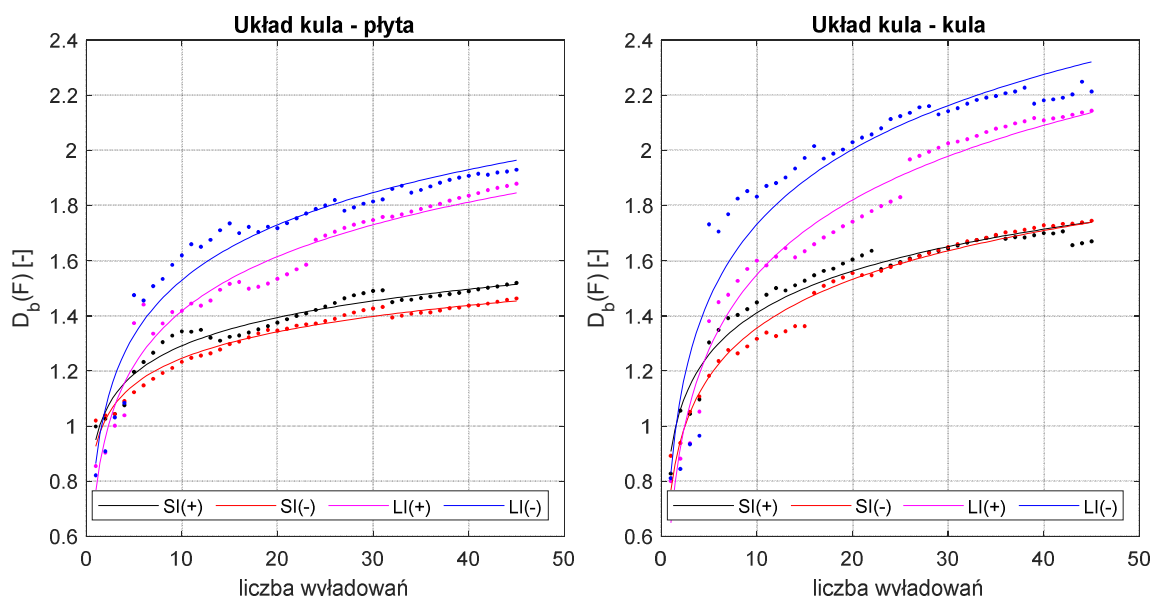
4. Niezależnie od układu elektrod, w przypadku tego samego rodzaju wyładowania średni wymiar fraktalny $D_b(F)_{\text{mean}}$ jest większy dla wyładowań o biegunowości dodatniej;
5. Zwiększenie długości przerwy iskrowej powoduje nieznaczny wzrost średniego wymiaru fraktalnego $D_b(F)_{\text{mean}}$, a obserwowane różnice są większe w układzie kula-kula;
6. W przypadku wymiaru fraktalnego $D_b(F)$ nie jest możliwe jednoznaczne określenie wpływu długości przerwy iskrowej;
7. Względne różnice pomiędzy wymiarami fraktalnymi $D_b(F)$ udarów łączeniowych i piorunowych zawierają się w przedziale od 24% do 32%, podczas gdy dla średniego wymiaru fraktalnego przedział ten wynosi 8% a 11%.



Rys. 10.7 Wyniki pomiaru wymiaru fraktalnego

Analizując wyniki obliczeń należy mieć na uwadze, że wymiar fraktalny $D_b(F)$ jest zależny od liczby wyładowań tworzących populację. Na Rys. 10.8 przedstawiono zależność pomiędzy liczbą wyładowań, a wartością $D_b(F)$. Widoczne jest, że wpływ kolejnych iskier dodawanych do populacji maleje wraz ze wzrostem liczebności populacji i dzieje się tak dlatego, że każde kolejne wyładowanie w coraz mniejszym stopniu zmienia kształt całej struktury. Wniosek ten potwierdza obserwacje wynikające z przeprowadzonych badań symulacyjnych. Zależność ta

jest prawdziwa dla każdego rodzaju i biegunowości wyładowania, niezależnie od rodzaju elektrod.



Rys. 10.8 Wpływ ilości wyładowań na wartość wymiaru fraktalnego $D_b(F)$

Na podstawie uzyskanych wyników można zatem stwierdzić, że wymiar fraktalny $D_b(F)$ obliczony przy założeniu, że wszystkie iskry wchodzące w skład danej populacji tworzą jeden obiekt, jest wielkością pozwalającą na skuteczniejszą klasyfikację rodzaju wyładowania, niż ma to miejsce w metodzie bazującej na wartości średniej $D_b(F)_{\text{mean}}$. Niezależnie od sposobu wyznaczania wymiaru fraktalnego, w przypadku wyładowań iskrowych wielkość ta nie pozwala jednak na określenie biegunowości wyładowania. Oznacza to, że w kontekście badań symulacyjnych wykorzystujących modelowanie fraktalne, stosowana dotychczas metoda doboru parametrów modelu, opierająca się wyłącznie o wartość wymiaru fraktalnego pojedynczych iskier i wyznaczanych na tej podstawie parametrów rozkładu, w przypadku wyładowań iskrowych może okazać się niewystraczająca, a większe możliwości w tym zakresie daje uzupełnienie tej metody o analizę innych parametrów opisujących trajektorię iskry długiej.

Dzięki wykonanym pomiarom udało się zrealizować następujące cele:

1. Wykazano możliwość zastosowania zaproponowanej przez autora nowej metody wyznaczania wymiaru fraktalnego do klasyfikacji rodzaju wyładowania;
2. Wykazano, że dotychczas stosowana metoda doboru parametrów modelu fraktalnego bazująca na średnim wymiarze fraktalnym może być niewystarczająca w przypadku modelowania wyładowań iskrowych i wymaga ona uzupełnienia o dodatkowe parametry opisujące trajektorię;

- Wykazano słuszność obserwacji wynikających z badań symulacyjnych, mówiących że wymiar fraktalny populacji iskier jest zależny od liczby wyładowań tworzących populację, a także że wpływ kolejnych iskier na wymiar fraktalny populacji maleje wraz wzrostem liczebności populacji.

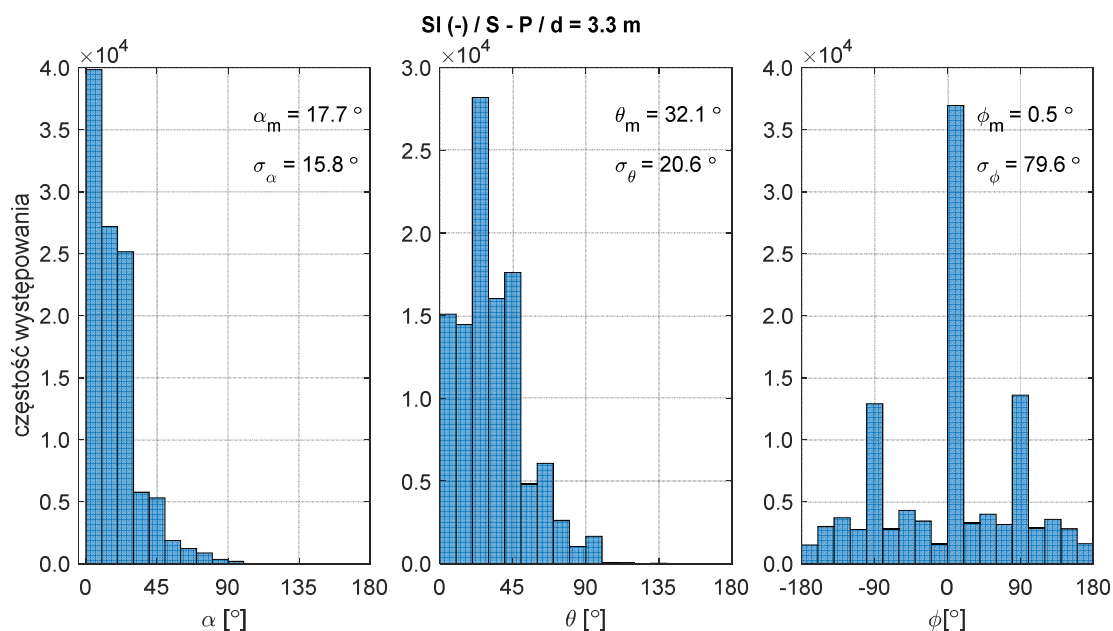
10.4. Kąty krętości

W Tab. 10.5 pokazano wyniki pomiaru kątów krętości dla wszystkich badanych konfiguracji układu probierczego. W kolejnych kolumnach tabeli podano średnie wartości dla poszczególnych kątów oraz odpowiadające im odchylenia standardowe rozkładu normalnego.

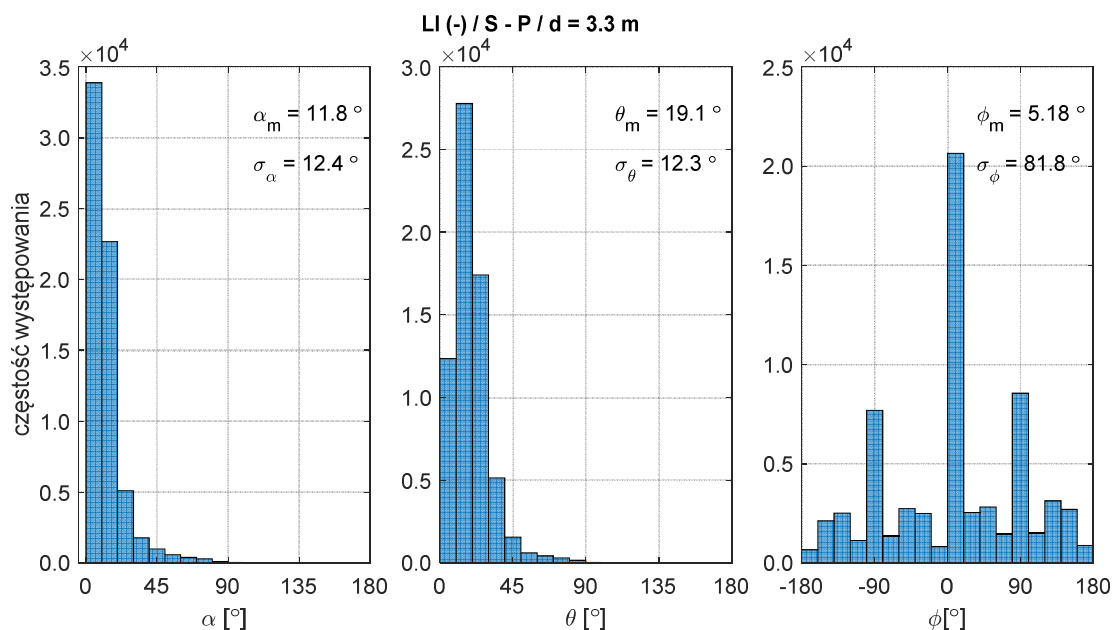
Tab. 10.5 Wyniki pomiarów kątów krętości

Rodzaj i biegunowość wyładowania	Układ elektrod	Długość przerwy iskrowej: d [m]	α_m [°]	σ_α [°]	θ_m [°]	σ_θ [°]	φ_m [°]	σ_φ [°]
SI (+)	S - P	3,3	21,7	19,3	32,8	23,4	-2,3	71,8
SI (-)	S - P	3,3	17,7	15,8	32,1	20,7	0,5	79,6
LI (+)	S - P	3,3	12,6	12,8	20,8	14,1	1,1	82,2
LI (-)	S - P	3,3	11,8	12,4	19,1	12,3	5,2	81,8
SI (+)	S - S	3,3	24,2	21,4	34,0	23,9	4,7	82,9
SI (-)	S - S	3,3	23,1	20,5	30,3	22,3	-8,6	85,6
LI (+)	S - S	3,3	20,3	19,9	24,1	19,6	0,3	84,5
LI (-)	S - S	3,3	19,7	19,8	22,2	18,9	-1,1	84,8
SI (+)	S - P	5,5	21,8	19,5	33,0	23,4	-6,1	70,9
LI (+)	S - P	5,5	17,0	17,1	22,0	16,7	-0,2	76,9
SI (+)	S - S	5,5	25,6	22,0	37,4	25,3	-6,6	79,1
LI (+)	S - S	5,5	20,0	19,6	22,6	18,7	2,7	82,3

W przypadku kątów opisujących krętość, ważna jest nie tylko wartość średnia, ale również sposób rozkładu kątów dla danej populacji. Jest tak dlatego, że obrazuje on zakres zmienności danego kąta i w kontekście modelowania fraktalnego pozwala na ocenę zakresu potencjalnych kierunków rozwoju wyładowania. Na Rys. 10.9 oraz Rys. 10.10 przedstawiono wykresy rozkładu częstości występowania poszczególnych kątów w populacji wyładowań będących wynikiem oddziaływania udarów łączeniowych oraz piorunowych biegunowości ujemnej. Na podstawie zaprezentowanych danych można zauważyć, że kąty krętości dla poszczególnych rodzajów wyładowań wyraźnie różnią się pomiędzy sobą nie tylko wartością średnią, ale również zakresem wartości występowania. Wyjątek stanowi kąt φ (Rys. 10.9 oraz Rys. 10.10), dla którego rodzaj i biegunowość wyładowania można uznać za niemal nie istotne, a kąty dla poszczególnych segmentów najczęściej przyjmują wartości zbliżone do 0°, -90° oraz 90°.



Rys. 10.9 Przykładowe wyniki pomiaru kątów krętości - SI (-) / S - P / d = 3,3 m



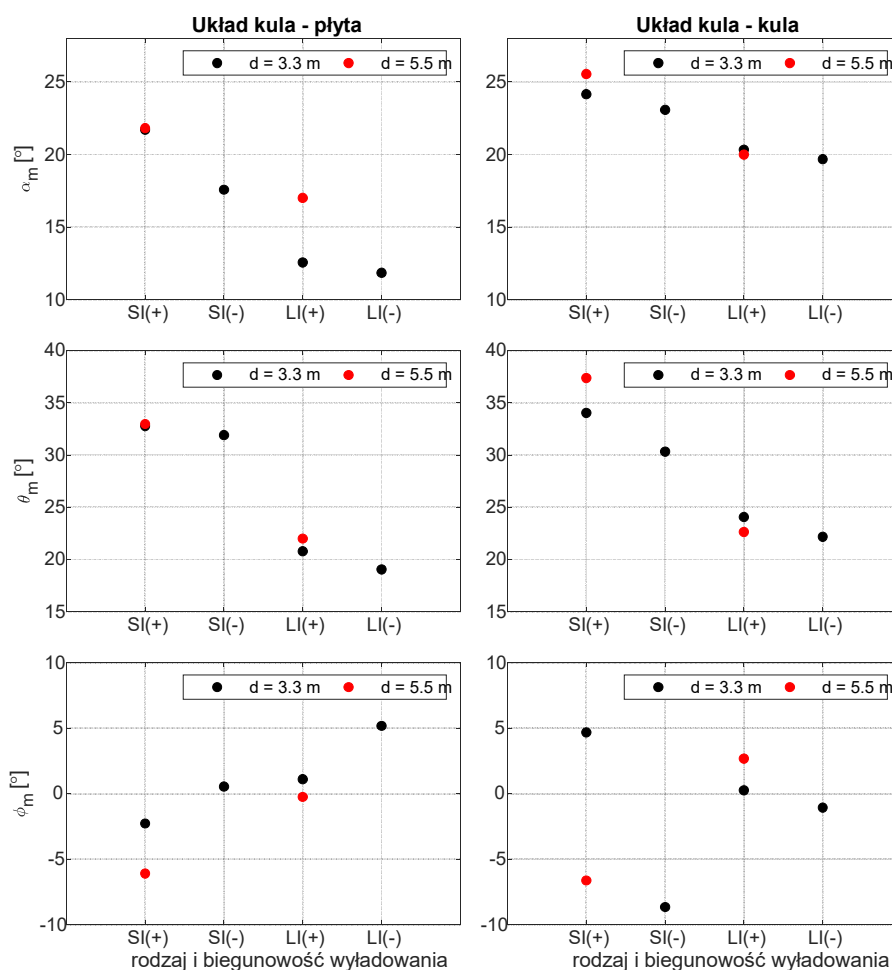
Rys. 10.10 Przykładowe wyniki pomiaru kątów krętości - LI (-) / S - P / d = 3,3 m

Wyniki zawarte w Tab. 10.5 przedstawiono w sposób graficzny na Rys. 10.11. Na podstawie wykonanych pomiarów można zauważyć, że w przypadku kątów α oraz θ :

1. Średnie wartości kątów niezależnie od biegunowości oraz rodzaju elektrod, są większe w przypadku wyładowań będących następstwem uderów łączeniowych;
2. Niezależnie od układu elektrod, w przypadku tego samego rodzaju wyładowania średnie wartości kątów są większe dla wyładowań o biegunowości dodatniej;

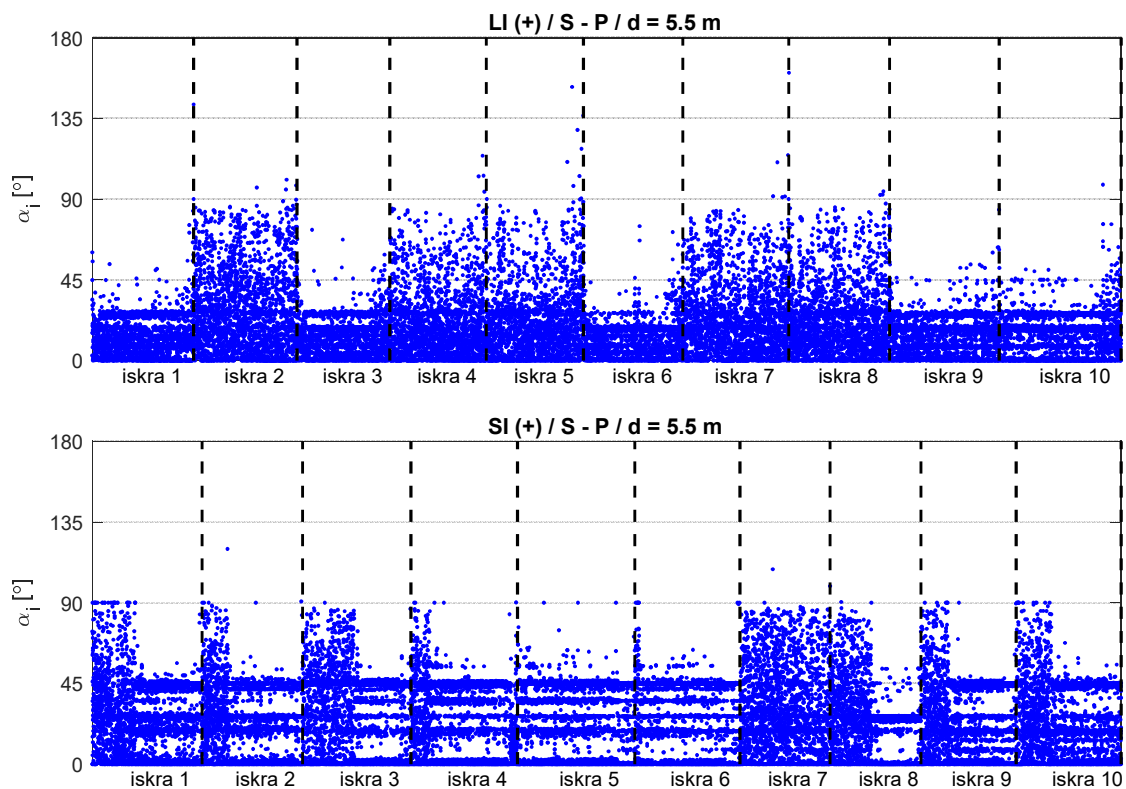
3. Niemal dla wszystkich rodzajów wyładowań (wyjątek stanowią udary łączeniowe o biegunowości ujemnej) średnie wartości kątów mierzone w układzie kula-kula są większe, niż w układzie kula-płyta;
4. Zwiększenie długości przerwy iskrowej nie ma większego wpływu na średnie wartości kątów, wyjątek stanowią udary łączeniowe o biegunowości ujemnej w układzie kula-płyta;
5. Rozrzut wartości kątów mierzony wartością odchylenia standardowego jest większy dla udarów łączeniowych i jest to niezależne od biegunowości wyładowania oraz układu elektrod.

W przypadku kąta φ_m , jego wartość nie jest zależna od rodzaju oraz ogólnej geometrii kanału wyładowania, co potwierdza jedną z przesłanek wynikających z badań symulacyjnych i opisanych w Rozdziale 6, zgodnie z którą, wartość φ_m nie jest jednoznacznie uzależniona o geometrii kanału wyładowania.



Rys. 10.11 Wyniki pomiarów kątów krętości

Na Rys. 10.12 przedstawiono przykładowe wykresy rozkładu wartości kąta α wzdłuż kanału wyładowani (dla większej czytelności, wykresy te sporządzono tylko dla pierwszych 10. iskier wybranych z populacji). Wykonane obliczenia w pewnym stopniu potwierdzają obserwacje wynikające z badań symulacyjnych (Rys. 6.20), zgodnie z którymi dla niektórych populacji wyładowań możliwe jest stwierdzenie występowania większej krętości na początkowym fragmencie kanału wyładowania. Zjawisko to nie dotyczy jednak wszystkich rodzajów wyładowań. Przykładem są wyładowania piorunowe o biegunowości dodatniej, gdzie, jak pokazano na Rys. 10.12, wartości kątów rozkładają się stosunkowo równomiernie wzdłuż całej długości kanału wyładowania. Dodatkowo nawet w przypadku wyładowań należących do tej samej populacji można zauważyć, że zaobserwowane zjawisko nie jest stałe. W tym przypadku przykładem może być iskra oznaczona numerem 7, która mimo że należy do populacji wyładowań łączeniowych o biegunowości dodatniej, nie wykazuje wzrostu wartości kąta w początkowym fragmencie kanału wyładowania.



Rys. 10.12 Rozkład wartości kąta α wzdłuż kanału wyładowania

W Tab. 10.6 przedstawiono porównanie wartości kątów krętości α_m i θ_m uzyskanych dla wykonanych pomiarów, z wartościami prezentowanymi w literaturze. Wyniki przedstawiono tylko dla wyładowań łączeniowych biegunowości dodatniej, gdyż dotychczas tylko dla tego rodzaju

wyładowań iskrowych wykonywano pomiary krętości. Na podstawie analizy wyników zawartych w Tab. 10.6, można zauważyć, że:

1. W przypadku danych dostępnych w literaturze występuje stosunkowo duży rozrzut wyników dotyczących wartości kąta α_m , nie pozwalający stwierdzić występowania zależności pomiędzy wartością kąta α_m , a długością przerwy iskrowej;
2. Brak zależności pomiędzy wartością kąta α_m , a długością przerwy iskrowej, został potwierdzony wynikami przeprowadzonych pomiarów, przy czym wyniki pomiarów wydają się niewrażliwe na zmiany długości d rozpatrywanego fragmentu iskry, podczas gdy w przypadku danych dostępnych w literaturze zależność pomiędzy α_m a d nie jest możliwa do określenia;
3. W przypadku kąta θ_m zarówno wyniki pomiarów jak i dane dostępne w literaturze wskazują na niewrażliwość kąta θ_m od zmiany długości przerwy iskrowej;
4. W przypadku obu kątów, α_m i θ_m , wyniki otrzymane z wykonanych pomiarów są wyraźnie większe od danych dostępnych w literaturze.

Tab. 10.6 Porównanie wyników pomiaru krętości z wynikami dostępnymi w literaturze

	Wyniki przeprowadzonych pomiarów		Wyniki przedstawione w [59]	Wyniki przedstawione w [60]	Wyniki przedstawione w [61]
Układ elektrod	Kula-płyta	Kula-płyta	Ostrze-płyta	Ostrze-płyta	Ostrze-płyta
d	3,3 m	5,5 m	7,0-8,0 m	3 m	0,5 m
$\alpha_m \pm \sigma_\alpha$	$21,7^\circ \pm 19,3^\circ$	$21,8^\circ \pm 19,5^\circ$	$6,3^\circ \pm 5,8^\circ$	$13,3^\circ \pm 9,9^\circ$	$11,8^\circ \pm 1,4^\circ$
$\theta_m \pm \sigma_\theta$	$32,8^\circ \pm 23,4^\circ$	$33,0^\circ \pm 23,4^\circ$	$20,9^\circ \pm 20,9^\circ$	$23,9^\circ \pm 19^\circ$	-

Dzięki wykonanym pomiarom zrealizowano następujące cele:

1. Wyznaczono wartości kątów krętości dla dwóch rodzajów wyładowań oraz dla dwóch biegunowości. Dotychczas w literaturze nie zostały opublikowane takie dane. Tym samym wykonane pomiary dostarczyły znacząco bardziej kompletnych danych, których można użyć do oceny wyników symulacji wykorzystujących modelowanie fraktalne.
2. W kontekście wyładowań dodatnich wskazano na możliwość braku związku pomiędzy krętością a długością przerwy iskrowej, co może oznaczać możliwość wykorzystania wyników wykonanych pomiarów do analizy wyładowań dłuższych niż 5,5 m.

10.5. Długość segmentów

W Tab. 10.7 przedstawiono wyniki pomiarów długości segmentów l_{si} , liczby segmentów przypadających na jedną iskrę N oraz długości iskry dla wszystkich badanych konfiguracji. W kolejnych kolumnach tabeli podano wartości średnie oraz odpowiadające im odchylenia standardowe.

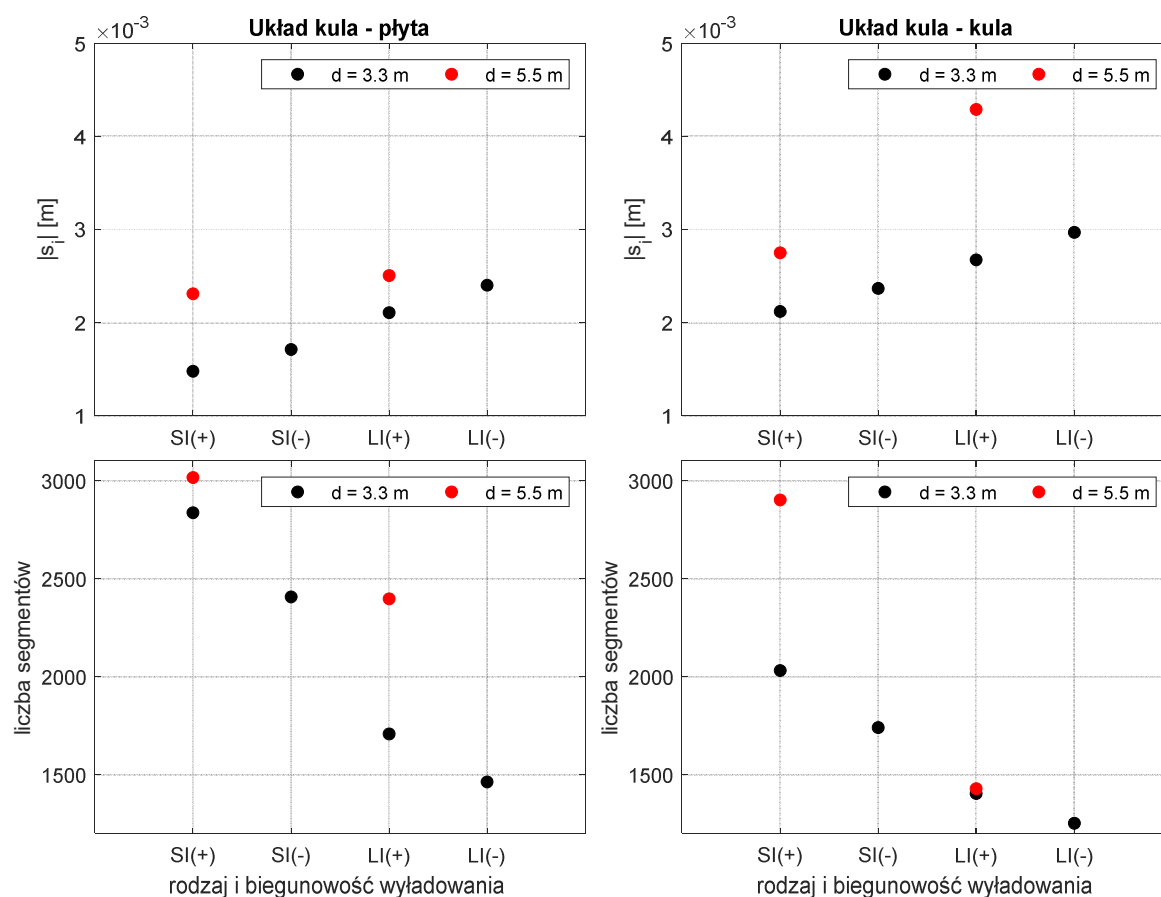
Tab. 10.7 Wyniki pomiarów długości i ilości segmentów oraz długości wyładowań

Rodzaj i biegunowość wyładowania	Układ elektrod	Długość przerwy iskrowej: d [m]	l_{si} [mm]	$\sigma_{l_{si}}$ [mm]	N [-]	σ_N [-]	L [m]	σ_L [m]	l_{si}/L [%]	$\sigma_{l_{si}/L}$ [%]
SI (+)	S - P	3,3	1,5	1,1	2821	273	4,2	0,2	0,035	0,028
SI (-)	S - P	3,3	1,7	1,2	2396	283	4,1	0,3	0,042	0,03
LI (+)	S - P	3,3	2,1	1,6	1706	188	3,6	0,1	0,059	0,045
LI (-)	S - P	3,3	2,4	1,9	1462	239	3,5	0,1	0,068	0,056
SI (+)	S - S	3,3	2,1	1,5	2025	187	4,3	0,4	0,049	0,035
SI (-)	S - S	3,3	2,4	1,6	1736	270	4,1	0,5	0,058	0,041
LI (+)	S - S	3,3	2,7	2,0	1402	75	3,8	0,1	0,071	0,053
LI (-)	S - S	3,3	3,0	2,3	1251	77	3,7	0,1	0,08	0,061
SI (+)	S - P	5,5	2,3	1,8	3006	367	7,0	0,3	0,033	0,026
LI (+)	S - P	5,5	2,5	1,9	2396	234	6,0	0,1	0,042	0,032
SI (+)	S - S	5,5	2,8	2,0	2881	743	8,0	1,5	0,035	0,026
LI (+)	S - S	5,5	4,3	3,2	1428	92	6,1	0,1	0,07	0,052

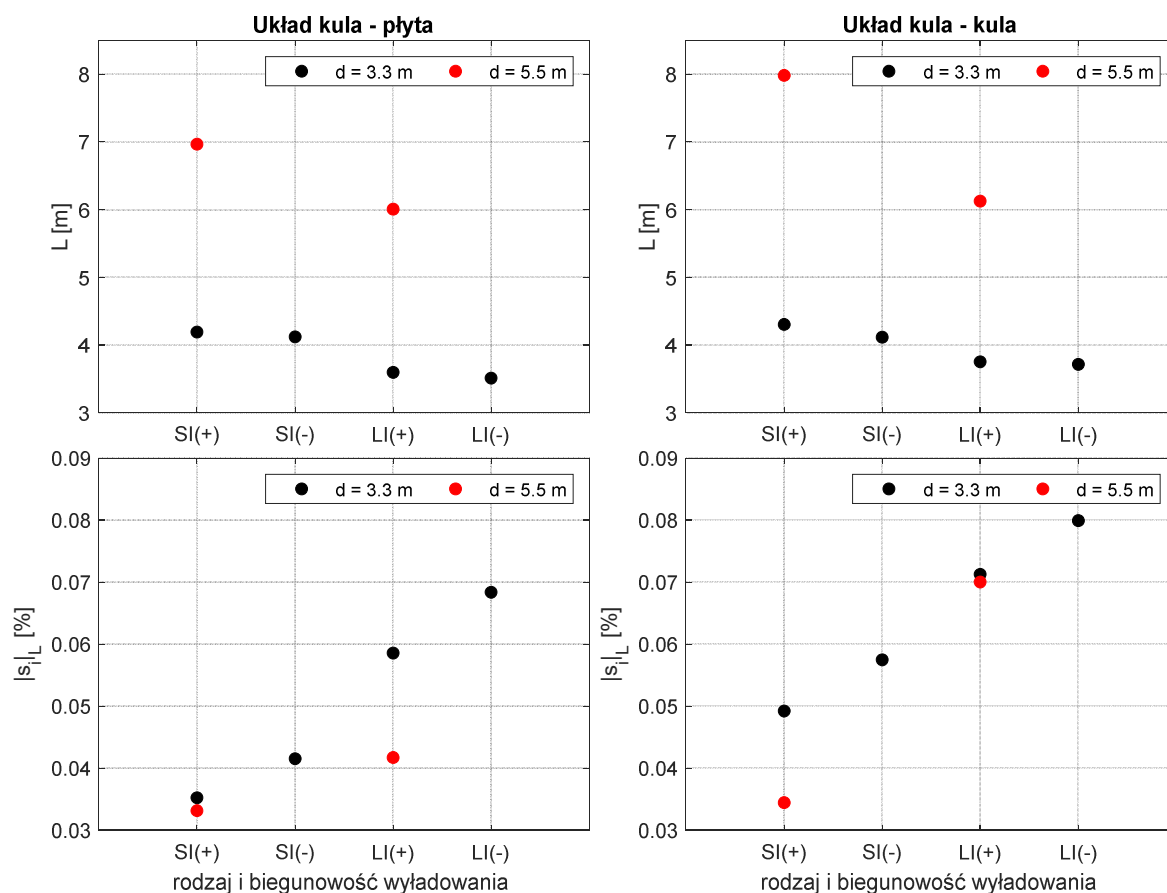
Wyniki zawarte w Tab. 10.7 przedstawiono na Rys. 10.13 oraz Rys. 10.14. Na podstawie wykonanych pomiarów można zauważyć, że:

1. Niezależnie od układu elektrod oraz biegunowości wyładowania, średnia długość segmentów dla iskier będących następstwem udarów łączeniowych jest mniejsza, niż dla udarów piorunowych;
2. Niezależnie od układu elektrod oraz rodzaju wyładowania, średnia długość segmentów jest dłuższa dla wyładowań o biegunowości ujemnej;
3. Niezależnie od układu elektrod oraz biegunowości wyładowania, średnia liczba segmentów dla iskier będących następstwem udarów łączeniowych jest większa, niż dla udarów piorunowych;
4. Niezależnie od układu elektrod oraz rodzaju wyładowania, średnia liczba segmentów jest mniejsza dla wyładowań o biegunowości ujemnej;

5. Niezależnie od układu elektrod oraz biegunowości wyładowania, średnia długość kanału wyładowania dla isker będących następstwem udarów łączeniowych jest większa niż dla udarów piorunowych;
6. Niezależnie od układu elektrod oraz rodzaju wyładowania, średnia długość kanału wyładowania jest mniejsza dla wyładowań o biegunowości ujemnej;
7. Długość kanałów wyładowania dla isker będących następstwem udarów piorunowych jest dłuższa od długości przerwy iskrowej o 6% do 15%, podczas gdy dla udarów łączeniowych jest to już 24% do 45% procent;
8. Długość segmentu jest związana z wartością kątów opisujących krętość α_m i θ_m ;
9. Porównując wyniki przedstawione na Rys. 10.11 i Rys. 10.13 można zauważyć, że im większa jest średnia długość segmentu, tym mniejsze są wartości kątów opisujących krętość.

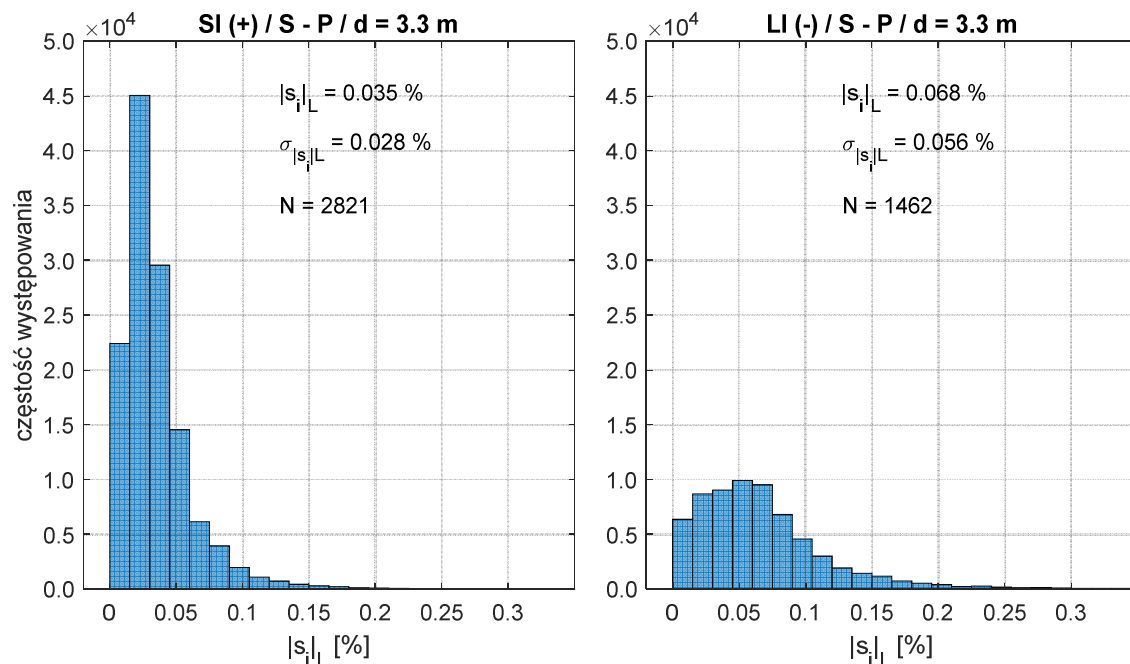


Rys. 10.13 Wyniki pomiaru długości oraz ilości segmentów



Rys. 10.14 Wyniki pomiaru długości iskier oraz względnej długości segmentów

Wykonane pomiary wykazały, że średnia względna długość segmentu zawiera się w granicach od 0,03% do 0,08% długości wyładowania lub od 0,04% do 0,09% długości przerwy iskrowej. Wartości te są znacznie mniejsze od tych, które były dotychczas prezentowane w literaturze i zawierały się w granicach od 0,25% do 0,84% długości przerwy iskrowej [59-61]. Dane prezentowane w literaturze dotyczyły jednak przypadków, w których przyjmowano, że długość segmentu jest stała na całej długości kanału wyładowania, podczas gdy zastosowana w niniejszej pracy metoda wyznaczania trajektorii pozwalała na wyznaczenie segmentów o zmiennej długości. Na Rys. 10.15 przedstawiono przykładowy rozkład częstości występowania względnej długości segmentów dla dwóch populacji wyładowań, dwukrotnie różniących się średnią liczbą segmentów tworzących iskłę.



Rys. 10.15 Rozkład częstość występowania względnej długości segmentów

W wyniku wykonanych pomiarów zrealizowano następujące cele:

1. Określono długości segmentów tworzących kanał wyładowania. Dotychczas literatura nie przedstawiała takich danych. Wyniki przedstawionych w niniejszej pracy pomiarów można wykorzystać do analizy krętości (dobór stałej długości segmentu w oparciu o zmierzoną wartość średnią) oraz do badań symulacyjnych wykorzystujących modelowanie fraktalne (dobór zakresu zmienności długości segmentu).
2. Wykazano występowanie zależności między długością segmentów, a rodzajem i biegunowością wyładowania, co może mieć zastosowanie w modelowaniu fraktalnym.
3. Wykazano występowanie zależności pomiędzy długością segmentu, a krętością.

10.6. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę wyników pomiarów wielkości wykorzystywanych do opisu trajektorii rozwoju iskry długiej. Wykorzystano dwa parametry, które są obecnie opisywane w literaturze, tj. średni wymiar fraktalny oraz kąty opisujące krętość. Dodatkowo wprowadzono trzy niestosowane dotychczas wielkości, jakimi są wymiar fraktalny populacji wyładowań, długość segmentów na jakie można podzielić kanał wyładowania oraz potencjalny obszar rozwoju wyładowania. Wykazano w ten sposób na możliwość opisu trajektorii wyładowania w sposób ilościowy.

Badane wyładowania były wytwarzane przy wykorzystaniu udarów piorunowych i łączeniowych obu biegunowości, co miało na celu analizę sposobu kształtowania się trajektorii iskry długiej w przypadku, gdy źródłem wyładowania są napięcia probiercze, które aktualnie wykorzystuje się do oceny wytrzymałości elektrycznej wysokonapięciowych napowietrznych układów izolacyjnych [70-71]. Pomiary wykonano w laboratoryjnych układach modelowych kula-kula i kula-płyta. Zastosowana długość przerwy iskrowej wynosiła 3,3 m oraz 5,5 m, co odpowiada odstępom izolacyjnym stosowanym w liniach napowietrznych 400 kV oraz 800 kV-1100 kV [70-71]. Analiza wyników pomiarów została przeprowadzona dla wyładowań rozpatrywanych jako obiekty przestrzenne, co, jak wskazuje literatura, korzystnie wpłynęło na dokładność uzyskiwanych wyników [59] i w przypadku wszystkich wymienionych wyżej badanych wielkości, za wyłączeniem kątów krętości, nie było dotychczas wykonywane dla wyładowań iskrowych.

Wykonane badania potwierdziły słuszność wniosków wynikających z zaprezentowanych w Części II rozprawy badań symulacyjnych, podczas których zauważono, że:

1. Nie istnieje wystarczająco silny związek pomiędzy kształtem kanału wyładowania, a średnim wymiarem fraktalnym, umożliwiający klasyfikację rodzaju oraz biegunowości iskry długiej na podstawie średniego wymiaru fraktalnego;
2. Związek pomiędzy wymiarem fraktalnym populacji wyładowań a jej liczebnością maleje wraz ze wzrostem liczebności populacji i dzieje się tak dlatego, że każde kolejne wyładowanie w coraz mniejszym stopniu zmienia kształt struktury tworzonej przez rozpatrywane wyładowania;
3. Krętość cechuje się większą wrażliwością na zmianę geometrii kanału wyładowania, niż wymiar fraktalny, co sprawia, że wielkość ta może być wykorzystana do oceny wyników badań symulacyjnych wykorzystujących model fraktalny.

Dodatkowo wykazano występowanie zależności pomiędzy rodzajem i biegunowością wyładowania, a długością segmentów, na które można podzielić kanał wyładowania, oraz rozmiarem potencjalnego obszaru rozwoju wyładowania, co podobnie jak krętość, może znaleźć zastosowanie podczas badań symulacyjnych.

Dzięki przeanalizowaniu ponad 1080 zdjęć iskieł, wykonanych dla różnych typów wyładowań wytworzonych w różnych układach elektrod oraz w różnych warunkach oświetleniowych, potwierdzono możliwość zastosowania, zaproponowanej przez autora niniejszej rozprawy,

metody wyznaczania trajektorii opartej na triangulacji wielokąta utworzonego przez granice kanału wyładowania.

Kolejnym rezultatem wykonanych pomiarów jest stworzenie bazy danych, zawierającej wyniki pomiaru trajektorii, które mogą być wykorzystane do dalszych badań jako kontynuacja niniejszej rozprawy.

Część IV

Podsumowanie

11. Wnioski

Rozwój modeli pozwalających na symulację wyładowań iskrowych jest istotnym zagadnieniem stanowiącym obszar zainteresowań wielu międzynarodowych grup badawczych. Modele te pozwalają na zwiększenie skuteczności metod koordynacji izolacji, stosowanych w celu ochrony przed wyładowaniami występującymi wewnątrz układów izolacyjnych linii napowietrznych. Szczególne znaczenie mają modele stochastyczne, których zastosowanie do symulacji wyładowań iskrowych może pozwolić na zwiększenie skuteczności metod ochrony odgromowej linii elektroenergetycznych wysokich napięć.

Tym co wyróżnia modele stochastyczne od modeli deterministycznych, takich jak model EGM (ang. *Electro-Geometric Model*) lub LPM (ang. *Leader Progression Model*), jest to, że poza oceną wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego, lub też wyznaczaniem punktu będącego potencjalnym miejscem trafienia wyładowania, modele stochastyczne pozwalają na określenie trajektorii rozwoju wyładowania. Dodatkowo, dzięki uwzględnieniu w tych modelach czynników losowych pozwalają one też na określenie prawdopodobieństwa wystąpienia wyładowania do różnych elementów stanowiących układ izolacyjny linii napowietrznej. Zdolność ta jest szczególnie istotna, gdyż pozwala szacować ryzyko wystąpienia niepożądanych wyładowań, mogących doprowadzić do awarii linii, a w konsekwencji do jej wyłączenia.

Zastosowanie modelu fraktalnego, będącego jednym z rodzajów modeli stochastycznych, do symulacji wyładowań iskrowych, wymaga wykonania badań symulacyjnych, umożliwiających ocenę tego, czy dany model pozwala we właściwy sposób odwzorować wyładowania iskrowe, będące następstwem oddziaływania udarów piorunowych i łączeniowych obu biegunowości. Aby było to możliwe, konieczne jest wykonanie pomiarów laboratoryjnych, umożliwiających zbadanie właściwości trajektorii rozpatrywanych wyładowań. Celem tych pomiarów jest zarówno weryfikacja wyników uzyskiwanych na drodze symulacji, jak i dostarczanie danych koniecznych do tworzenia modelu.

Niniejsza rozprawa obejmuje swym zakresem problematykę symulacji wyładowań iskrowych z wykorzystaniem modelu fraktalnego oraz pomiarów laboratoryjnych iskry długiej. Zarówno symulacje, jak i pomiary skupiają się na badaniu cech i wielkości związanych z trajektorią rozwoju wyładowania. Szczególny nacisk położono na wykazanie i ilościowy opis różnic pomiędzy trajektoriami wyładowań będących następstwem udarów piorunowych i łączeniowych obu biegunowości.

W rozprawie przedstawiono opis oraz analizę badań symulacyjnych, wykonanych przy użyciu opracowanego w ramach niniejszej rozprawy modelu fraktalnego wyładowań iskrowych. Wyniki przeprowadzonych prac modelowych i symulacyjnych zostały omówione w Części II rozprawy. Za najważniejsze wnioski uważa się, co następuje:

1. Istnieje możliwość zastosowania modelu fraktalnego do symulacji iskier długich różniących się pomiędzy sobą trajektorią rozwoju wyładowania.
2. Zastosowanie metod modelowania fraktalnego do symulacji iskry długiej wymaga wyeliminowania istniejącego powiązania pomiędzy krętością głównego kanału wyładowania, a liczbą i rozmiarem dołączonych do niego gałęzi.
3. Wymiar fraktalny, który był dotychczas stosowany do ilościowego opisu wyników symulacji wykorzystujących modele fraktalne, nie pozwala na wykazanie różnic pomiędzy iskrami długimi, pomimo tego, że iskry te cechują się znacznymi różnicami w trajektoriach rozwoju wyładowania. Oznacza to, że do ilościowego opisu wyładowań o różnych trajektoriach konieczne jest wprowadzenie dodatkowych parametrów, takich jak krętość kanału wyładowania oraz wymiar fraktalny populacji. Obserwacja ta dowodzi słuszności pierwszej tezy niniejszej rozprawy.

W rozprawie przedstawiono również wyniki wykonanych przez autora pomiarów laboratoryjnych oraz ich analizy. Metoda wykonywania pomiarów wraz ze zbudowanym na potrzeby pracy układem pomiarowym, jak również opis wyników wykonanych pomiarów iskry długiej dla różnych warunków probierczych, zostały omówione w Części III rozprawy. Za najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych pomiarów uważa się, co następuje:

1. Wprowadzenie dodatkowych parametrów, takich jak zaproponowane w niniejszej rozprawie w odniesieniu do analizy wyładowań iskrowych: wymiar fraktalny populacji, potencjalna strefa rozwoju wyładowania oraz rozkład długości segmentów tworzących kanał wyładowania – umożliwia obserwację w sposób ilościowy, nie obserwowanych wcześniej różnic w trajektorii wyładowań iskrowych inicjowanych udarami piorunowymi i łączeniowymi o różnych biegunowościach. Obserwacja ta dowodzi słuszności drugiej tezy niniejszej rozprawy.
2. Wyznaczenie trajektorii wyładowania metodą triangulacyjną pozwala na podział kanału wyładowania iskry długiej na segmenty, których długość oddaje naturalną zmienność kształtu kanału wyładowania. Obserwacja ta dowodzi słuszności trzeciej tezy niniejszej rozprawy.

3. Zastosowanie wprowadzonej w niniejszej rozprawie metody triangulacyjnej umożliwiło pomiar długości segmentów, na które można podzielić kanał wyładowania, co może stanowić wkład w prace standaryzujące metody analizy wyników wysokonapięciowych pomiarów laboratoryjnych oraz sposobu wykonywania symulacji wykorzystujących model fraktalny.

Za najważniejsze osiągnięcia niniejszej rozprawy, umożliwiające sformułowanie wyżej opisanych wniosków, autor uważa:

1. Opracowanie modyfikacji modelu fraktalnego ukierunkowanej na symulację iskry długiej w celu analizy trajektorii rozwoju wyładowania;
2. Wykonanie badań symulacyjnych przy wykorzystaniu zmodyfikowanego modelu oraz analiza wyników symulacji w oparciu o parametry dotychczas stosowane tylko w odniesieniu do danych uzyskanych na podstawie pomiarów laboratoryjnych;
3. Opracowanie metody wyznaczania trajektorii iskry długiej, pozwalającej na podział kanału wyładowania na segmenty oddające naturalną zmienność kierunku rozwoju wyładowania, a także umożliwiającą analizę danych pomiarowych nie w oparciu o arbitralny dobór długości segmentów;
4. Wykonanie pomiarów laboratoryjnych trajektorii iskry długiej wytworzonej przy wykorzystaniu dwóch znormalizowanych rodzajów udarów napięciowych, piorunowego i łączeniowego, obu biegunowości.

Do oryginalnego wkładu naukowego w rozwój dziedziny obejmującej swym zakresem niniejszą rozprawę, można również zaliczyć fakt pozyskania kompleksowych danych pomiarowych zawierających informacje o przestrzennej trajektorii rozwoju wyładowań iskrowych. Wyniki te obejmują wyładowania będące następstwem udarów piorunowych i łączeniowych obu biegunowości, powstałe w układach o różnym stopniu jednorodności rozkładu pierwotnego pola elektrycznego i długości przerwy iskrowej korespondującej z długościami przerw izolacyjnych, jakie można spotkać w stosowanych obecnie napowietrznych liniach przesyłanych. Oznacza to możliwość wykorzystania uzyskanych wyników do innych prac związanych m.in. z koordynacją izolacji.

Zdaniem autora efekty badań wykonanych w celu rozwiązania zagadnienia badawczego będącego przedmiotem niniejszej rozprawy mogą przyczynić się również do rozwoju metod symulacji wyładowań iskrowych oraz sposobu analizy wyników pomiarów laboratoryjnych.

12. Możliwości dalszych badań

W trakcie prowadzenia prac nad realizacją celu przedstawionego w niniejszej rozprawie, dokonano obserwacji, które zdaniem autora mogą stanowić przedmiot dalszych badań.

1. W odniesieniu do badań symulacyjnych, rozważa się rozbudowę modelu fraktalnego w oparciu o elementy związane z sieciami sztucznej inteligencji i algorytmami uczenia maszynowego. Rozwój modelu mógłby polegać na dalszej modyfikacji funkcji $p(P_i \rightarrow P_{i,j})$, patrz wzór (4.1), który mógłby zostać zastąpiony wytrenowanym blokiem obliczeniowym, który na podstawie wyznaczonego rozkładu pola elektrycznego, umożliwiłby określenie zarówno kierunku rozwoju wyładowania, jak i długość kolejnego segmentu. Wykonanie tego rodzaju prac planowane jest przez autora jako kontynuacja zaprezentowanych tu badań. Do opracowania bloku obliczeniowego w oparciu o algorytmy uczenia maszynowego planowane jest wykorzystanie danych pomiarowych zgromadzonych dzięki pomiarom wykonanym w ramach niniejszej pracy. Zakładając, że tylko jedno wyładowanie składa się z około 2000 segmentów, można przyjąć, że dysponując wszystkimi zmierzonymi wyładowaniami, możliwe jest zbudowanie zbioru danych uczących, zawierającego około 1,1 miliona próbek, co wydaje się być liczbą wystarczającą do odpowiednio skutecznego wytrenowania bloku obliczeniowego. Jako dane weryfikacyjne służące sprawdzeniu poprawności działania modelu, wykorzystane zostałyby wówczas dane pozyskane w dodatkowych pomiarach, wykonanych w układach wieloelektrodowych składających się z większej niż dotychczas liczby elektrod, ustawionych w różnych konfiguracjach geometrycznych.
2. Zaprezentowane w niniejszej rozprawie badania dotyczyły wyładowań rozwijających się w stosunkowo jednorodnej przestrzeni, w której jedynym ośrodkiem izolacyjnym było powietrze. Analiza wyników badań opisanych w literaturze, zwłaszcza dotyczących wyładowań drzewiastych, pozwala przypuszczać, że model fraktalny może być również wykorzystany do badania wyładowań rozwijających się w przestrzeni o zmiennej przenikalności elektrycznej. W kontekście linii napowietrznych środowiskiem takim jest obszar graniczny znajdujący się w otoczeniu łańcuchów izolatorowych. Doświadczenie autora w tym zakresie wskazuje, że w przypadku wyładowań będących następstwem udarów łączeniowych o biegunowości ujemnej, wprowadzenie do przerwy iskrowej izolacji stałej w postaci np. szkło-epoksydowego rdzenia, w znacznym stopniu zmienia sposób, w jaki rozwija się wyładowanie [130]. Zjawisko to jednak nie dotyczy

udarów łączeniowych o biegunowości dodatniej. Warte wydaje się zatem sprawdzenie możliwości zastosowania modelu fraktalnego do badań w tym właśnie zakresie.

Tym samym, w zakończeniu niniejszej rozprawy można powtórzyć wniosek wypływający z jej wstępu, stanowiący niejako podsumowanie wykonanych prac, mówiący, że rozwój metod symulacji jest nierozzerwalnie związany z badaniami rzeczywistych zjawisk występujących w przyrodzie.

Bibliografia

- [1] CIGRE WG C4.306, "Insulation Coordination for UHV AC Systems", Technical Brochure 542, June 2013.
- [2] Praca zbiorowa (red. R. Kosztaluk) Technika badań wysokonapięciowych. Tom I i II. WNT, Warszawa 1985.
- [3] CIGRE WG C4.26, "Evaluation of lightning shielding analysis methods for EHV and UHV DC and AC transmission lines," Technical Brochure 704, Oct. 2017.
- [4] CIGRE SC B2, "Overhead Lines" CIGRE Green Books, 2017.
- [5] Les Renardières Group, "Research on Long Air Gap Discharges at Les Renardières: 1973 results," *Electra*, Vol. 35, pp. 49–156, 1974.
- [6] Les Renardières Group, "Positive discharges in long air gaps at Les Renardières: 1975 results and conclusions," *Electra*, Vol. 53, pp. 31-153, 1977.
- [7] Les Renardières Group, "Double impulse tests of long airgaps. Part 1: Engineering problems and physical processes: the basis of recent tests," *IEE Proc. A Phys. Sci. Meas. Instrumentation, Manag. Educ. Rev.*, Vol. 133, No. 7, pp. 395–409, 1986.
- [8] Dellera L., and E. Garbagnati. 1990. Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. *IEEE Trans. Power Del.* 5(4): 2009-2029.
- [9] Cooray V., and M. Becerra. 2010. Attractive radius and the volume of protection of vertical and horizontal conductors evaluated using a selfconsistent leader inception and propagation model – SLIM. *Proc. of 30th Int'l. Conf. Lightning Protection*, Cagliari, Italy, paper No. 1062.
- [10] M. Molas, M. Szewczyk. "Experimental Evaluation of 3D Tortuosity of Long Laboratory Spark Trajectory for Sphere-Sphere and Sphere-Plane Discharges under Lightning and Switching Impulse Voltages." *Energies* 14.21 (2021): 7409.
- [11] M. Molas, M. Szewczyk, „Przegląd aktualnych kierunków badań w zakresie zastosowań modelu fraktalnego w symulacjach wyładowań elektrycznych,” *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 98 NR 10/2022, pp. 275-279.
- [12] M. Molas, M. Szewczyk, "Pomiary trajektorii iskry długiej w przestrzeni trójwymiarowej," *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 98 NR 10/2022, pp. 181-184.
- [13] L. Niemeyer, L. Pietronero, H. J. Wiesmann: "Fractal dimension of dielectric breakdown," *Physical Review Letters* 52.12 (1984): 1033

- [14] N. Femia, L. Niemeyer, V. Tucci: "Fractal characteristics of electrical discharges: experiments and simulation," *Journal of Physics D: Applied Physics* 26.4 (1993): 619.
- [15] H. J. Wiesmann, H. R. Zeller: "A fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics," *Journal of applied physics* 60.5 (1986): 1770-1773.
- [16] A. A. Tsonis, J. B. Elsner: "Fractal characterization and simulation of lightning," *Beiträge zur Physik der Atmosphäre* 60 (1987): 187-192.
- [17] Kono, M., Kawamura, H., Matsusaka, S., Itoh, S., & Hidai, H. (2023). In-situ observation and evaluation of silver precipitation behavior in borosilicate glass. *Precision Engineering*.
- [18] Ghaffarpour, Reza, and Saeid Zamanian. "Fractal-based lightning model for investigation of lightning direct strokes to the communication towers." *Electrical Engineering* 104.4 (2022): 2543-2551.
- [19] K. Wu, Y. Suzuoki, H. Xie, "Sub-fractal structure of single partial discharge in an electrical tree," *Journal of Physics D: Applied Physics* 33.22 (2000): 2954.
- [20] Hao-jiang, Wan, Wei Guang-hui, and Chen Qiang. "Estimation on lightning protection performance using a fractal approach." 2010 International Conference On Computer Design and Applications. Vol. 4. IEEE, 2010.
- [21] Ding, Y., Yao, X., Ge, X., & Zhang, Z. (2019, September). Impulse test and simulation analysis of 2m rod-plane long air gap. In *2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC)* (pp. 1912-1917). IEEE.
- [22] Rahiminejad, Abolfazl, and Behrooz Vahidi. "An Application of Fractal-Based Lightning for SFR Calculation of High Voltage Substations." *Indian Journal of Science and Technology* 10.15 (2017).
- [23] Falconer, Kenneth. *Fractal geometry: mathematical foundations and applications*. John Wiley & Sons, 2004.
- [24] Ioannidis, A. I., et al. "Development of a fractal-based model for simulating streamer flashover of insulating surfaces." 2021 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). IEEE, 2021.
- [25] Kudo, K. "Fractal analysis of electrical trees." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 5.5 (1998): 713-727.
- [26] Wu, Kai, Yasuo Suzuoki, and Hengkun Xie. "Sub-fractal structure of single partial discharge in an electrical tree." *Journal of Physics D: Applied Physics* 33.22 (2000): 2954.

- [27] Hariharan, M., and Sharanya Srinivas. "Stochastic Modelling of Electrical Tree Progression in Modern High Voltage Power Cables." *International Journal of Computer Applications* 149.7 (2016).
- [28] Rodríguez-Serna, Johnatan M., Ricardo Albarracín-Sánchez, and Isabel Carrillo. "An improved physical-stochastic model for simulating electrical tree propagation in solid polymeric dielectrics." *Polymers* 12.8 (2020): 1768.
- [29] Bahder, G., et al. "Physical model of electric aging and breakdown of extruded polymeric insulated power cables." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 6 (1982): 1379-1390.
- [30] Bahder, G.; Garrity, T.; Sosnowski, M.; Eaton, R.; Katz, C. Physical Model of Electric Aging and Breakdown of Extruded Polymeric Insulated Power Cables. *IEEE Trans. Power App. Syst.* 1982, PAS-101, 1379–1390.
- [31] Li, Jianbiao, et al. "A new estimation model of the lightning shielding performance of transmission lines using a fractal approach." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 18.5 (2011): 1712-1723.
- [32] Rahiminejad, Abolfazl, and Behrooz Vahidi. "Fractal-based lightning model for shielding failure rate calculation of transmission lines." *IET Science, Measurement & Technology* 12.6 (2018): 719-725.
- [33] Datsios, Zacharias G., et al. "A parametric study on the critical lightning currents causing flashover to the overhead lines of a±533 kV HVDC transmission system." 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). IEEE, 2020.
- [34] Datsios, Zacharias G., et al. "A Stochastic Model for Evaluating the Lightning Performance of a– 400 kV HVDC Overhead Line." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 63.5 (2021): 1433-1443.
- [35] Ioannidis, Alexios I., et al. "Accelerating Stochastic Lightning Attachment Simulations for the Estimation of Lightning Incidence to Overhead Lines." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* (2023).
- [36] Ioannidis, Alexios I., and Thomas E. Tsovilis. "Fractal-based approach for evaluating the shielding design of high voltage substations against direct lightning strikes." 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE, 2020

- [37] Guo, Jun, et al. "A three-dimensional direct lightning strike model for lightning protection of the substation." *IET Generation, Transmission & Distribution* 15.19 (2021): 2760-2772.
- [38] Ioannidis, Alexios I., and Thomas E. Tsovilis. "Shielding Failure of High-Voltage Substations: A Fractal-Based Approach for Negative and Positive Lightning." *IEEE Transactions on Industry Applications* 57.3 (2021): 2317-2325.
- [39] Yu, Wanshui, et al. "Numerical simulation of the lightning leader development and upward leader initiation for rotating wind turbine." *Machines* 10.2 (2022): 115.
- [40] Bian, X., Wu, Y., Zhou, Q., Jiang, R., Zhang, Y., Chen, L., Qi, Q., Lyu, W.: Quantitative characteristics of the striking distance to wind turbine blades based on an improved stochastic lightning model. *IET Gener. Transm. Distrib.* 00, 1– 14 (2023).
- [41] Petrov, N. I., G. N. Petrova, and F. D'alessandro. "Quantification of the probability of lightning strikes to structures using a fractal approach." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 10.4 (2003): 641-654.
- [42] Rioussset, Jeremy A., et al. "Three-dimensional fractal modeling of intracloud lightning discharge in a New Mexico thunderstorm and comparison with lightning mapping observations." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 112.D15 (2007).
- [43] Pasko, Victor P., and Jeremy J. George. "Three-dimensional modeling of blue jets and blue starters." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 107.A12 (2002): SIA-12.
- [44] Nguyen, D. T., Grant Deegan, and Franco D'Alessandro. "Fractal nature of probabilistic model of lightning discharge." *Proceedings of IEEE Region 10 International Conference on Electrical and Electronic Technology. TENCON 2001* (Cat. No. 01CH37239). Vol. 2. IEEE, 2001.
- [45] Zhang, Xuewei, et al. "Study on the effectiveness of single lightning rods by a fractal approach." *Journal of Lightning Research* 1.1 (2009).
- [46] Rahiminejad, Abolfazl, Behrooz Vahidi, and Jinliang He. "A fractal-based stepped downward leader model including branched channel charge distribution and branch fading." *Electric Power Systems Research* 176 (2019): 105940.
- [47] Syssoev, A. A., et al. "Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 125.7 (2020): e2019JD031360.

- [48] Ioannidis, A. I., Mikropoulos, P. N., Tsovilis, T. E., & Kokkinos, N. D. (2021, October). Lightning protection of the Parthenon: A fractal-based approach. In *2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)* (pp. 1-5). IEEE.
- [49] Ioannidis, Alexios I., et al. "A fractal-based approach to lightning protection of historical buildings and monuments: The Parthenon case study." *IEEE Industry Applications Magazine* 28.4 (2022): 20-28.
- [50] Eriksson, A. J. "An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis." *IEEE Transactions on Power Delivery* 2.3 (1987): 871-886.
- [51] "IEC 60060-1:2010 High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements", International Electrotechnical Commission, wrzesień 2010
- [52] Ioannidis, A. I., et al. "Fractal-Based Approach for Modelling Electric Breakdown of Air Gaps: An Application to a 75 cm Positive Rod-Plane Gap." *The International Symposium on High Voltage Engineering*. Springer, Cham, 2019.
- [53] Wu, D., Kumar, A., Berglund, M. G., Organero, E., Stenestam, B. O., & Gustavsson, D. G. (2018). Challenges in bringing UHVDC from ± 800 kV to higher voltages. In *CIGRE Session* (pp. B4-116).
- [54] 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
- [55] S. Ilhan and A. Ozdemir, "380 kV corona ring optimization for AC voltages," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 2, pp. 408-417, April 2011
- [56] Wang, Q., Liang, X., Shen, Y., Liu, S., Zuo, Z., & Gao, Y. (2022). Lightning flashover characteristics of a full-scale AC 500 kV transmission tower with composite cross arms. *Engineering*.
- [57] Huo, F., Liu, Y., Li, L., Ma, W., & Nan, J. (2022, September). Research on Tower Air-gaps Flashover Characteristics of UHV AC Double-circuit Transmission Line. In *2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE)* (pp. 1-4). IEEE.
- [58] Yao, X., Wang, S., Tian, L., Jiang, L., & Ding, Y. (2022, April). Experiment Study of 330kV Transmission Line Tower Gaps at 4300m Altitude. In *2022 5th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)* (pp. 131-136). IEEE.

- [59] O. Diaz, P. Hettiarachchi, M. Rahman, V. Cooray, S. P. A. Vayanganie, "Experimental study of leader tortuosity and velocity in long rod-plane air discharges", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 2, pp. 806-812, Apr. 2016.
- [60] S. Gu, N. Xiang, J. Chen, W. Chen, S. Xie, and J. He, "3D Channel tortuosity of long air gap discharge," in *7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*, pp. 784–787, 2011.
- [61] D. Amarasinghe, U. Sonnadara, M. Berg, V. Cooray, Channel tortuosity of long laboratory sparks, *Electrostatics* 65 (8) (2007) 521-526.
- [62] D. Amarasinghe, U. Sonnadara, M. Berg, V. Cooray, "Fractal dimension of long electrical discharges," *Journal of Electrostatics*, Vol. 73, 2015, pp. 33-37
- [63] Flisowski, Zdobysław. *Technika wysokich napięć*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2005.
- [64] E. Kuffel, „High Voltage Engineering Fundamentals,” Elsevier Ltd., Oxford; Edycja 2., 17 lipca 2000.
- [65] Jianghai, G. E. N. G., et al. "Dynamic development model for long gap discharge streamer-leader system based on fractal theory." *Plasma Science and Technology* 24.9 (2022): 095402.
- [66] Liao, M., Zhao, X., Jia, L., Liu, G., Qu, L., Feng, R., & Fan, W. (2021, May). Observation of a suspected positive space leader in long air gaps. In *2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)* (pp. 1-4). IEEE.
- [67] He, H., He, J., Zhao, X., & Chen, W. (2016, September). On the positive upward leader in response to downward stepped leader in a 10m rod-to-rod long air gap. In *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)* (pp. 1-7). IEEE.
- [68] Wu, S., Wang, L., Gao, J., Xie, C., Song, B., Peng, Y., ... & Liu, Y. (2022). Breakdown voltage characteristics of combined air gaps under negative lightning impulse. *Energy Reports*, 8, 1230-1236.
- [69] Gao, J., Wang, L., Wu, S., Xie, C., Tan, Q., Ma, G., ... & Song, B. (2021). Effect of a floating conductor on discharge characteristics of a long air gap under switching impulse. *Journal of Electrostatics*, 114, 103629.
- [70] "IEC 60071-2:2018 Insulation co-ordination - Part 2: Application guidelines", International Electrotechnical Commission, marzec 2018

- [71] "IEEE Recommended Practice for Overvoltage and Insulation Coordination of Transmission Systems at 1000 kV AC and Above," in IEEE Std 1862-2014 , vol., no., pp.1-68, 18 July 2014,
- [72] Hector, L. G., and H. L. Schultz. "The dielectric constant of air at radiofrequencies." *Physics* 7.4 (1936): 133-136.
- [73] Rawa, Henryk. Podstawy elektromagnetyzmu. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.
- [74] Vayanganie, Amila, et al. "Fractal Analysis of Long Laboratory Sparks of high Speed Video Recordings." ICLP, 2016.
- [75] Wu, Jiaxin, et al. "An effective method to compute the box-counting dimension based on the mathematical definition and intervals." *Results in Engineering* 6 (2020): 100106.
- [76] Pilgrim, Ian, and Richard P. Taylor. "Fractal analysis of time-series data sets: Methods and challenges." *Fractal analysis* (2018): 5-30.
- [77] Buła, Rafał. *Implikacje teorii rynku fraktalnego dla oceny ryzyka inwestycji finansowych*. Urząd Komisji Nadzoru Finansowego, 2019.
- [78] Łabędź, P. "Algorytmy fraktalne w cyfrowej analizie obiektów przestrzennych." Praca doktorska napisana pod kierunkiem T. Burczyńskiego i A. Ozimek, obroniona w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Instytut Informatyki, Wydział Fizyki, Matematyki i Informatyki Politechniki Krakowskiej, Kraków (2016): 13-14.
- [79] Błachowski, A., and K. Ruebenbauer. "Roughness method to estimate fractal dimension." *Acta Physica Polonica A* 115.3 (2009): 636-640.
- [80] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics Version 4.2 User's Manual, January 2018. [Online]. Available: <http://www.femm.info>
- [81] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics: OctaveFEMM User's Manual, January 30, 2018. [Online]. Available: <http://www.femm.info>
- [82] Hu, Yuanchao, et al. "Laboratory study on negative spark inception direction and breakdown characteristics in rod-rod air gaps." *Electric Power Systems Research* 201 (2021): 107498.
- [83] Geng, J., Chen, Y., Lv, F., Wang, P., & Ding, Y. (2020). Photo electric properties during streamer-to-leader transition in a long positive sphere-plane gap. *Physics of Plasmas*, 27(8), 083509.

- [84] Liu, X., Zhao, X., Liao, M., Liao, Y., Du, Y., & He, J. (2022, September). Observation of Stem Branching in Long Laboratory Sparks under Positive Switching Impulses. In *2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE)* (pp. 1-6). IEEE.
- [85] Liu, X., Zhao, X., He, J., & Xiao, P. (2021, May). Evolution of the Stem During the Dark Period in Long Air Gaps. In *2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)* (pp. 1-4). IEEE.
- [86] Xie, C., Wang, L., Gao, J., Peng, Y., Wu, S., Wu, S., ... & Liu, Y. (2022). Experimental Investigation of Discharge Path Selectivity of a Long Air Gap Containing a Floating Conductor. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 64(5), 1278-1287.
- [87] Wang, Xi, et al. "Influence of ground wire on the initiation of upward leader from 110 to 1000 kV AC phase line." *Electric Power Systems Research* 130 (2016): 103-112.
- [88] Zhang, Yaqi, et al. "Flashover performance test with lightning impulse and simulation analysis of different insulators in a 110 kV double-circuit transmission tower." *Energies* 11.3 (2018): 659.
- [89] Ding, Yujian, et al. "Influence of front time on positive switching impulse discharge characteristics of UHVDC tower gaps." *Electric Power Systems Research* 172 (2019): 32-37.
- [90] Li, Lei, et al. "Study on Shock Wave Characteristics During Insulation Recovery of Long Air Gap Discharge Channels." *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. IEEE, 2020.
- [91] W. J. Carey and J. R. Mayes, "Marx generator design and performance", Proc. Conf. Rec. 25th Int. Power Modulator Symp. High-Voltage Workshop, pp. 625-628, Jun. 2003.
- [92] Haefely Impulse Test Equipment Rev. 10/2021, October 2018. [Online]. Available: <https://hvtechnologies.com/>
- [93] Strauss, Werner. "Digital Recorder for Impulse Voltage Tests." ISH 2003, The XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Delft The Netherlands, August 25-29, 2003
- [94] IEC 60383-1:1993 Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V - Part 1: Ceramic or glass insulator units for a.c. systems - Definitions, test methods and acceptance criteria", International Electrotechnical Commission, kwiecień 1993

- [95] "IEC 60383-2:1993 Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V - Part 2: Insulator strings and insulator sets for a.c. systems - Definitions, test methods and acceptance criteria", International Electrotechnical Commission, kwiecień 1993
- [96] "IEC 60168:1994 Tests on indoor and outdoor post insulators of ceramic material or glass for systems with nominal voltages greater than 1000 V", International Electrotechnical Commission, listopad 1994
- [97] Rakov, Vladimir A., M. A. Uman, and K. J. Rambo. "A review of ten years of triggered-lightning experiments at Camp Blanding, Florida." *Atmospheric Research* 76.1-4 (2005): 503-517.
- [98] Bogatov, N. A., Kostinskiy, A. Y., Syssoev, V. S., Andreev, M. G., Bulatov, M. U., Sukharevsky, D. I., Mareev, E. A., & Rakov, V. A. (2020). Experimental investigation of the streamer zone of long-spark positive leader using high-speed photography and microwave probing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, e2019JD031826.
- [99] Yuri V. Shcherbakov, Vitaly B. Lebedev, Vladimir A. Rakov, Grigori G. Feldman, Boris N. Gorin, Vladimir S. Syssoev, and Maksim A. Karpov "High-speed optical studies of the long sparks in very transient stages", *Proc. SPIE 6279*, 27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, 62795D (29 January 2007);
- [100] Li, C., Yin, Y., Wu, P., & Wu, W. (2019). Skeleton line extraction method in areas with dense junctions considering stroke features. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(7), 303.
- [101] Sintunata, V., & Aoki, T. (2016, December). Skeleton extraction in cluttered image based on Delaunay triangulation. In *2016 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)* (pp. 365-366). IEEE.
- [102] Schaefer, E. I., & Pelletier, J. D. (2020). An algorithm to reduce a river network or other graph-like polygon to a set of lines. *Computers & Geosciences*, 145, 104554.
- [103] Ogniewicz, R. L., & Ilg, M. (1992, June). Voronoi skeletons: theory and applications. In *CVPR* (Vol. 92, pp. 63-69).
- [104] Shen, Yilang, Tinghua Ai, and Min Yang. "Extracting centerlines from dual-line roads using superpixel segmentation." *IEEE Access* 7 (2019): 15967-15979.
- [105] Hou, Qian, et al. "Straight skeleton based automatic generation of hierarchical topological map in indoor environment." *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. IEEE, 2021.

- [106] Younas, Sohail, and Chase R. Figley. "Development, implementation and validation of an automatic centerline extraction algorithm for complex 3D objects." *Journal of Medical and Biological Engineering* 39 (2019): 184-204.
- [107] Arachchige, A. S., Samarabandu, J., Knoll, J., Khan, W., & Rogan, P. (2010, September). An image processing algorithm for accurate extraction of the centerline from human metaphase chromosomes. In *2010 IEEE International Conference on Image Processing* (pp. 3613-3616). IEEE.
- [108] Yan, Zengqiang, Xin Yang, and Kwang-Ting Cheng. "A three-stage deep learning model for accurate retinal vessel segmentation." *IEEE journal of Biomedical and Health Informatics* 23.4 (2018): 1427-1436.
- [109] Bataineh, Bilal. "An iterative thinning algorithm for binary images based on sequential and parallel approaches." *Pattern recognition and image analysis* 28 (2018): 34-43.
- [110] Shao, Zhenfeng, et al. "MRENet: Simultaneous extraction of road surface and road centerline in complex urban scenes from very high-resolution images." *Remote Sensing* 13.2 (2021): 239.
- [111] Tobón-Marín, Alejandro, and Julio Canon Barriga. "Analysis of changes in rivers planforms using google earth engine." *International Journal of Remote Sensing* 41.22 (2020): 8654-8681.
- [112] Widyaningrum, E. (2021). Automatic Object Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds for Digital Base Map Production.
- [113] Saeed, Khalid, et al. "K3M: A universal algorithm for image skeletonization and a review of thinning techniques." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 20.2 (2010): 317-335.
- [114] Lam, Louisa, Seong-Whan Lee, and Ching Y. Suen. "Thinning methodologies-a comprehensive survey." *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence* 14.09 (1992): 869-885.
- [115] Aurenhammer, F., Klein, R., & Lee, D. T. (2013). *Voronoi diagrams and Delaunay triangulations*. World Scientific Publishing Company.
- [116] Lu, W., & Ai, T. (2018). Center Point of Simple Area Feature Based on Triangulation Skeleton Graph (Short Paper). In *10th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2018)*. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik.
- [117] Aigner, W., Aurenhammer, F., & Jüttler, B. (2015). On triangulation axes of polygons. *Information Processing Letters*, 115(1), 45-51.

- [118] Lewandowicz, Elżbieta, and Paweł Flisek. "Base point split algorithm for generating polygon skeleton lines on the example of lakes." *ISPRS international journal of geo-information* 9.11 (2020): 680.
- [119] Franz Aurenhammer, Michael Steinkogler, Rolf Klein, Partially walking a polygon, *Computational Geometry*, Volume 84, 2019, Pages 3-11, ISSN 0925-7721,
- [120] Golly, Antonius, and Jens M. Turowski. "Deriving principal channel metrics from bank and long-profile geometry with the R package cmgo." *Earth Surface Dynamics* 5.3 (2017): 557-570.
- [121] Lewandowicz, Elżbieta, and Paweł Flisek. "A Method for Generating the Centerline of an Elongated Polygon on the Example of a Watercourse." *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9.5 (2020): 304.
- [122] Wang, Zhendong, et al. "A method of road extraction from high resolution remote image based on delaunay algorithms." *2018 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS)*. IEEE, 2018.
- [123] S. Ilhan and A. Ozdemir, "380 kV corona ring optimization for AC voltages," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 2, pp. 408-417, April 2011
- [124] Amarasinghe, Dulan, et al. "Correlation between brightness and channel currents of electrical discharges." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 14.5 (2007): 1154-1160.
- [125] "IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing," in *ANSI/IEEE Std 4-1978* , vol., no., pp.0_1-, 1978,
- [126] Hauschild, Wolfgang, and Eberhard Lemke. *High-voltage test and measuring techniques*. Vol. 1. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2014.
- [127] PP-EWNL 05 - „Szacowanie niepewności pomiaru”; procedura pomiarowa Laboratorium Wysokich Napięć Instytutu Energetyki, wydanie z dnia 01.05.2022
- [128] Jcgm, J. C. G. M. "Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement." *Int. Organ. Stand. Geneva* ISBN 50 (2008): 134.
- [129] "IEC 60060-2:2010 High-voltage test techniques - Part 2: Measuring systems", International Electrotechnical Commission, listopad 2010

- [130] Zhao, X., Lee, J., Liu, L., Sun, B., Tang, L., & He, J. (2020, September). Experimental Study on Flashover Performance of Hot Sticks under Switching Impulses. In *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)* (pp. 1-4). IEEE.