

Łódź, 08.08.2023 r.

dr hab. inż. Paweł Różga, prof. uczelni  
Politechnika Łódzka  
Instytut Elektroenergetyki  
pawel.rozga@p.lodz.pl

WPŁYNEŁO

dn.....2023-09-04.....

## Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Michała Molasa

pt. „*Pomiary i analiza trajektorii iskry długiej dla potrzeb modelowania fraktalnego*”

### 1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego, zgodnie z Uchwałą z dnia 23 maja 2023 roku.

### 2. Ocena tematyki i tez rozprawy

Modelowanie i symulacja zjawisk wyładowczych w powietrzu nie są tematem nowym, jednakże cały czas rozwijanym. Prace w tym obszarze prowadzone są od wielu lat, a pierwsze modele tworzone były już w II połowie XX wieku. Ich celem było przede wszystkim uzupełnienie oraz rozszerzenie wiedzy pochodzącej z eksperymentów wykonywanych w warunkach laboratoryjnych w zakresie oceny wpływu różnego rodzaju czynników na rozwój wyładowań atmosferycznych w powietrzu, a także wpływu samych wyładowań na pracę sieci elektroenergetycznych, głównie wysokich napięć. W tym obszarze niezwykle istotnymi badaniami były te dotyczące ochrony przed przepięciami pochodzenia atmosferycznego elementów infrastruktury elektroenergetycznej zainstalowanej w sieci, jak również możliwym oddziaływaniem wyładowań na pracę urządzeń telekomunikacyjnych czy generalnie urządzeń naziemnych przeznaczonych do transmisji danych. Należy pamiętać jednak, że w wyniku wyładowań atmosferycznych na przepięcia od nich pochodzące narażone są nie tylko elementy systemów naziemnych; również statki powietrzne czy startujące statki kosmiczne (np. te wynoszące na orbitę okołoziemską satelity) mogą być poddawane oddziaływaniom wyładowań atmosferycznych. Wyniki prace w tym polu także stanowią obszerną bazę danych.

W badaniach zjawisk wyładowczych pochodzenia atmosferycznego niezwykle ważne jest eksperymentalne podejście do określenia ich charakterystycznych parametrów. Jakkolwiek, praktyka inżynierska ogranicza się właściwie tylko do określenia parametrów napięciowych

badanego układu tj. napięcia przeskoku wyznaczonego w określonych warunkach probierczych, w których istotną rolę odgrywa rozkład pola elektrycznego, a ściślej poziom nierównomierności tego rozkładu. Z poznawczego punktu widzenia, szczególnie w dużych przerwach powietrznych, obok wspomnianego napięcia przeskoku ważne są również inne, pozanapięciowe właściwości wyładowań, jak na przykład kierunek jego rozwoju, który zmienia się z biegunowością i wspomnianym wyżej rozkładem pola elektrycznego.

Wraz z rozwojem technik numerycznych oraz zwiększającymi się możliwościami obliczeniowymi komputerów w coraz większym zakresie badania wyładowań elektrycznych pochodzenia atmosferycznego zaczęto kierować na obszar badań modelowych, które, szczególnie w ostatnich latach, rozwijane i dostosowywane są do co raz to wyższych wartości napięć znamionowych sieci przesyłowych wysokiego napięcia. Obecnie, sieci elektroenergetyczne wysokiego napięcia pracują już przy napięciach przekraczających 1000 kV w systemach prądu przemiennego i 800 kV w systemach prądu stałego. Niesie to za sobą konieczność analizowania stanów przepięciowych mogących wystąpić w sieciach pracujących właśnie przy takich napięciach. Ponieważ przepięcia generowane w takich przypadkach osiągają wartości przekraczające znacznie 1 MV wartości szczytowej napięcia udarowego, ich eksperymentalna analiza jest mocno utrudniona, m.in. poprzez ograniczenia aparaturowe, tj. konieczność posiadania generatora udarów napięciowych o napięciu znamionowym przekraczającym pokaźnie wymagane MV-ty napięcia szczytowego generowanej fali napięciowej. Ponadto, szczególnie w przypadku napięć udarowych łączeniowych, nieprzewidywalność kierunku rozwoju wyładowania iskrowego przy dużych odstępach powietrznych i głównie dodatkowo biegunowości napięcia, a także złożoności układu izolacyjnego, skłania ku głębszemu przyjrzeniu się problemowi analizy trajektorii rozwoju iskry przy narażeniu układu napięciem udarowym. Stąd, badania modelowe, stają się znakomitym rozwiązaniem i alternatywą, bądź, jak w przypadku pracy doktoranta, uzupełnieniem kosztownych badań eksperymentalnych, szczególnie w odniesieniu do analiz związanych z ochroną odgromową czy koordynacją izolacji. Opracowanie nowych modeli obliczeniowych, rozszerzających modele obecnie wykorzystywane w analizie wyładowań elektrycznych w dużych odstępach powietrznych, jest również wyzwaniem z punktu widzenia możliwości zaaplikowania modelu do rozważań przerw powietrznych odpowiadających odległościom izolacyjnym występującym w układach linii napowietrznych najwyższych napięć, czyli EHV (Extra High Voltage) i UHV (Ultra High Voltage). **Wobec powyższego, zaproponowany przez autora rozprawy rozwinięty model fraktalny umożliwiający ocenę trajektorii iskry długiej przy wykorzystaniu nowych wielkości charakterystycznych pozwalających na ocenę ilościową iskry, wpisuje się doskonale w trendy badań z obszaru szeroko pojętej Inżynierii Wysokich Napięć, a więc obszaru dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.**

Realizacja pracy doktorskiej zmierzała do udowodnienia następujących trzech tez:

*Teza nr 1: Istnieją układy i warunki wyladowań, w których stosowany obecnie w modelowaniu fraktalnym sposób klasyfikacji wyladowań elektrycznych bazujący na wartości wymiaru fraktalnego pojedynczych wyladowań, nie pozwala na zobrazowanie różnic w trajektorii rozwoju iskiei długich pod względem biegunowości oraz rodzaju napięcia będącego ich źródłem. Zastosowanie w tych układach dodatkowych parametrów, takich jak krętość kanału wyladowania oraz wymiar fraktalny populacji wyladowań, pozwala w sposób ilościowy zobrazować różnice pomiędzy trajektoriami różnych rodzajów wyladowań 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 wyladowania, oraz rozkład długości segmentów wyladowania, umożliwi rozwój modelu fraktalnego i jego walidację poprzez analizę różnic między trajektoriami wyladowań piorunowych i łączeniowych o różnych biegunowościach i w różnych układach elektrod.*

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

**Tezy, mimo, że rozbudowane, są zrozumiałe i jasno wskazują kierunek prac, jakie doktorant zamierzał zrealizować w ramach pracy doktorskiej. Należy dodatkowo zaznaczyć, że tezy zawierają również jednoznaczne wskazanie obszarów, które są nowatorskie w zakresie tematyki badań podjętych przez doktoranta. Pozwala to na określenie przyjętego kierunku badań jako spełniającego wymagania stawiane pracom doktorskim z obszaru Elektrotechniki, a więc obszaru wpisującego się w zakres dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.**

Aby udowodnić tezę doktorant zaplanował wykonanie szerokiego spektrum prac badawczych dotyczących oszacowania parametrów trajektorii iskry długiej, łącząc ze sobą wyniki prac symulacyjnych (modelowych) oraz pomiarów wykonanych w laboratorium wysokich napięć.

Prace badawcze zawierały w szczególności:

- opracowanie modelu symulacyjnego iskry długiej z wykorzystaniem metody fraktalnej,
- przeprowadzenie modelowania iskry długiej dla różnych parametrów opisujących stworzony model symulacyjny,
- oszacowanie parametrów opisujących trajektorię iskry długiej na bazie wykonanych symulacji,
- opracowanie metody wyznaczania trajektorii iskry długiej na podstawie pomiarów laboratoryjnych,

- przeprowadzenie pomiarów trajektorii iskry długiej w wybranych układach elektrod przy uwzględnieniu dwóch typów narażeń napięciowych tj. napięcia udarowego piorunowego i napięcia udarowego łączeniowego oraz dwóch biegunowości napięcia probierczego,

- wykonanie analizy zarejestrowanych eksperymentalnie trajektorii wyładowań na podstawie przyjętych parametrów iskry długiej w odniesieniu do jej właściwości wynikających z wykorzystania modelowania fraktalnego tj. średniego wymiaru fraktalnego, wymiaru fraktalnego populacji wyładowań, kątów krętości kanału wyładowania, potencjalnego obszaru rozwoju wyładowania oraz długości segmentów na jakie podzielono kanał wyładowania.

**Podsumowując, podjęta przez doktoranta tematyka, przyjęte tezy rozprawy, a także ambitny charakter prac zaplanowanych do realizacji, które w sposób spójny łączą ze sobą badania modelowe z laboratoryjnymi pracami eksperymentalnymi, posiadają bezsprzecznie walory pracy naukowej. Doktorant zaproponował oryginalne podejście do analizy wyładowań iskrowych rozwijających się w powietrzu przy wysokim napięciu udarowym, co jest niewątpliwie ważnym zagadnieniem z punktu widzenia rozważań z obszaru teorii przepięć w sieciach elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Należy więc stwierdzić, że praca doktorska mgr Molasa ma walory pracy naukowej z obszaru dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, jak również posiada walory praktyczne dla obszaru nauk inżynieryjno-technicznych.**

### **3. Charakterystyka i ocena zawartości merytoryczne rozprawy**

Rozprawa opracowana została w języku polskim i zawiera łącznie 150 stron. Podzielona jest na cztery zasadnicze części poprzedzone streszczeniami w języku polskim i angielskim, a zakończone obszernym spisem literatury zawierającym 130 pozycji.

Pierwsza część pracy obejmuje omówione już wyżej wprowadzenie, w którym doktorant zawarł opis ogólnej problematyki rozprawy, przedstawił tezy, cel i zakres pracy oraz dokonał krótkiego przeglądu zawartości rozprawy. Kolejne trzy części obejmują autorskie rozważania, w których doktorant przedstawia wyniki swoich prac w następujących obszarach:

- Modelowanie fraktalne i badania symulacyjne iskry długiej,
- Pomiary laboratoryjne iskry długiej,
- Podsumowanie zawierające wnioski i kierunki dalszych badań.

Generalnie w pracy brak jest typowej części teoretycznej obejmującej opis aktualnego stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki badawczej. **Należy jednak zaznaczyć, że obie części obejmujące wyniki autorskich prac doktoranta posiadają odniesienia do pozycji literatury krajowej i światowej w poszczególnych zakresach wraz z krytyczną opinią autora na ich**

**temat. Odniesienia te wskazują, że doktorant posiada ugruntowaną wiedzę teoretyczną z zakresu tematyki rozprawy, jak również przygotowany jest do realizacji części praktycznej.**

Jak wspomniano wyżej autorski wkład doktoranta obejmuje badania symulacyjne oraz eksperymenty laboratoryjne. Część dotycząca badań symulacyjnych otwiera opis celu opracowania modelu fraktalnego do analizy iskry długiej w powietrzu. Autor skupił się tu na udowodnieniu swoich racji w kontekście ogólnej możliwości wykorzystania modelowania fraktalnego do wyznaczania trajektorii wyładowania przy zachowaniu wszelkich właściwości iskry tj. zarówno jej cech geometrycznych (zarówno w przestrzeni 2D jak i 3D) jak i cech o naturze statystycznej (możliwość rozwoju wyładowania zupełnego lub niezupełnego; możliwość rozwoju wyładowania w kierunku, który nie jest determinowany najwyższą wartością natężenia pola elektrycznego). Rozważania doktoranta w przedstawionym zakresie udowodniły, że modelowanie fraktalne jest możliwe do zastosowania w analizie iskry długiej spełniając wszystkie założone kryteria. Ponadto doktorant opracował metodę oceny dokładności wyznaczania wymiaru fraktalnego, zarówno w przestrzeni 2D jak i 3D, jako zbiór dyskretnych punktów określających współrzędne przestrzenne. Tak więc, na bazie rozdziałów 4 i 5, można stwierdzić, że doktorant przygotował sobie solidną bazę do realizacji zasadniczej części prac symulacyjnych, które opisał w rozdziale 6 części II. W rozdziale tym autor dokonuje już szczegółowej interpretacji uzyskanych w ramach symulacji wyników patrząc na nie z różnych perspektyw. Doktorant rozpatruje następujące parametry:

- średni wymiar fraktalny iskry długiej,
- wymiar fraktalny populacji wyładowań,
- krętość,
- długość segmentu.

Zmiany poszczególnych parametrów przedstawiane są głównie w odniesieniu do współczynnika  $\eta$  (wskaźnika prawdopodobieństwa rozwoju wyładowania). W przypadku każdego z parametrów doktorant przeprowadza dyskusję tak, aby wskazać przesłanki do konieczności wykonania badań laboratoryjnych. Innymi słowy, doktorant wskazuje pewne wątpliwości, których rozwianie będzie, jego zdaniem, możliwe dzięki przeprowadzeniu badań eksperymentalnych z wykorzystaniem generatora udarowego. Opis wykonanych prac symulacyjnych nie oddaje, zdaniem recenzenta, ogromu pracy włożonej przez doktoranta w ich przygotowanie. Wydaje się, że doktorant dosyć skrótowo potraktował niektóre obszary analizy. Dla recenzenta, potraktowanym ogólnie jest przede wszystkim parametr wymiaru fraktalnego populacji wyładowań. Przykładowo z rys. 6.15 nie wynika jaka liczba iskier jest uwzględniana do wyznaczania wymiaru fraktalnego populacji (brak jasnego wskazania tego faktu w tekście). Niedostatecznie dokładnie opisane są też wyniki zaprezentowane na rys. 6.16. W tym zakresie kilka pytań pojawi się więc w dalszej części recenzji. Niemniej, część symulacyjna udowodniła możliwości wyodrębnienia nowych cech

charakterystycznych opisujących iskrę długą na podstawie modelowania fraktalnego, co było założeniem prac symulacyjnych. Autor wskazał, że wymiar fraktalny populacji wyładowań, kąty krętości oraz długość segmentu to właśnie te nowe charakterystyczne cechy. W kolejnym rozdziale (8) doktorant przechodzi do prezentacji założeń metodologii prac laboratoryjnych. W pierwszej kolejności przedstawia budowę układu pomiarowego oraz problematykę związaną z wykonywaniem pomiaru. Część informacji, mimo iż poznawczo interesująca, mogłaby zostać, zdaniem recenzenta, pominięta w rozprawie. Chodzi przede wszystkim o opis związany z ustaleniem miejsca usytuowania dzielnika napięciowego czy kwestie ustalenia pozycji układu elektrod w hali WN. Poruszane w tym obszarze zagadnienia mają naturę rozważań raczej inżynierskich niż naukowych i bezpośrednio nie mają związku z tematyką doktoratu. W rozdziale 9 natomiast doktorant udowadnia, poprzez porównanie ze sobą trzech metod, możliwość zastosowania metody triangulacyjnej, jako najdokładniejszej w analizie trajektorii iskry długiej. Metoda ta, zgodnie z wynikami rozważań doktoranta, sprawdza się najlepiej w wyznaczaniu linii centralnej głównego kanału niezależnie od stopnia skomplikowania iskry wynikającego z liczby, rozmiaru gałęzi czy zastosowanego układu elektrod. Dla metody triangulacyjnej doktorant uzyskał najkorzystniejsze wartości procentowe odchylenia linii centralnej ze wszystkich trzech analizowanych metod i dla wszystkich rodzajów wyładowań. Finalnie, w rozdziale 10, doktorant przedstawia wyniki wykonanych pomiarów laboratoryjnych. Wyniki te poprzedza skrupulatnym opisem sposobu wyboru napięć probierczych, przy których realizował pomiary dla konkretnego typu udaru i jego biegunowości. Wybór 95%-owego napięcia przeskoku wyznaczonego z wcześniej oszacowanego eksperymentalnie 50%-owego napięcia przeskoku jest słuszny i nie podlega dyskusji. Zbiór danych, tj. 1080 fotografii przedstawiających 540 wyładowania, należy uznać za wystarczający do zaplanowanego zakresu analizy. Ta, pozwoliła doktorantowi potwierdzić słuszność przypuszczeń sformułowanych na bazie symulacji, z których jako główne wymienić należy możliwość zastosowania nowych wskaźników ilościowych do oceny trajektorii iskry długiej rozwijającej się przy napięciu udarowym piorunowym i łączeniowym, a mianowicie wymiar fraktalny populacji, długość segmentów, na jakie można podzielić kanał wyładowania oraz potencjalny obszar rozwoju wyładowania.

Na podstawie opisu wykonanych analiz, przedstawionych wyników badań symulacyjnych oraz laboratoryjnych, jak również dyskusji materiału badawczego przedstawionego w podsumowaniu można przytoczyć najważniejsze osiągnięcia doktoranta stanowiące jednocześnie oryginalny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne:

- opracowanie nowego, oryginalnego rozwiązania modelu fraktalnego iskry długiej rozwijającej się w środowisku powietrznym, mającego na celu opisanie trajektorii rozwoju tej iskry przy napięciu udarowym piorunowym i łączeniowym;

- wykonanie badań symulacyjnych z wykorzystaniem stworzonego modelu fraktalnego ze wskazaniem nowych cech charakterystycznych iskry długiej, które mogą zostać wykorzystane w ocenie ilościowej iskry tj. wymiaru fraktalnego populacji i kątów krętości kanału wyładowania;

- zebranie obszernej bazy danych fotografii iskier długich przy napięciu udarowym piorunowym i łączeniowym obu biegunowości i dwóch konfiguracjach elektrod oraz dwóch odległościach międzyelektrodowych, które następnie mogły zostać poddane szczegółowej analizie;

- wykorzystanie nowych parametrów w zakresie opisu iskry długiej (wymiar fraktalny populacji wyładowań, rozkład segmentów tworzących kanał wyładowań, potencjalna strefa rozwoju wyładowań), które nie były do tej pory stosowane do jej opisu i udowodnienie, poprzez złożoną analizę danych pozyskanych z pomiarów laboratoryjnych, że ich użycie umożliwia dokładniejszy opis ilościowy iskry długiej;

- udowodnienie, że zastosowanie metody triangulacyjnej do wyznaczania trajektorii wyładowania pozwala na podział kanału na segmenty, których długość definiuje naturalną zmienność kształtu kanału wyładowania.

Podsumowując, przedstawione w dysertacji rozważania wskazują, że **doktorant posiada wiedzę i umiejętności z zakresu poruszanej w pracy tematyki modelowania fraktalnego wyładowań w długich przerwach powietrznych rozwijających się przy napięciu udarowym piorunowym i łączeniowym obu biegunowości. Jednocześnie należy stwierdzić, że doktorant potrafi zaplanować i wykonać skomplikowane badania eksperymentalne przy poziomach napięć rzędu MV, co jest umiejętnością szczególnie cenioną przy pracy z generatorami wysokiego napięcia udarowego. Na podkreślenie zasługują także umiejętności doktoranta w łączeniu badań symulacyjnych z laboratoryjnymi badaniami eksperymentalnymi, które, jako spójna całość, umożliwiają wnioskowanie o zjawiskach wyładowczych, które rozważane są m.in. podczas koordynacji izolacji linii najwyższych napięć. Ponadto, należy zaznaczyć, że doktorant w swojej pracy umiejętnie połączył wiedzę z zakresu wysokonapięciowej techniki probierczej z problematyką modelowania zjawisk fizycznych. Dzięki realizacji założonego zakresu prac doktorant udowodnił postawione w pracy tezy.**

#### **4. Ocena redakcji tekstu pracy**

Recenzowana praca jest bardzo dobrze zredagowana, z niewielką ilością błędów redakcyjnych czy też błędów natury stylistyczno-gramatycznej. Kilka takich nieścisłości przytoczono poniżej:



- str. 21: „...i do tego czasu model metoda ta znalazła...” – wydaje się, że słowo „model” jest tu niepotrzebne;

- str. 21: jest „przekładowo”, powinno być „przykładowo”;

- str. 31: jest „...ono miejscach...”, powinno być „...ono w miejscach...”;

- str. 41: jest „...takie związku...”, powinno być „...takiego związku...”;

oraz inne pojawiające się w dalszej części pracy.

Pewnym niuanssem redakcyjnym, który jest dyskusyjny dla recenzenta, jest sposób podziału treści pracy na rozdziały. Rozprawa jest podzielona na IV części numerowane cyframi rzymskimi, a jednocześnie na rozdziały, które mają numerację ciągłą bez uwzględniania tych głównych części. Wprowadza to pewien chaos, kiedy np. część II rozpoczyna się od rozdziału 4. Pozostaje jednak zaakceptować taki podział, który oczywiście nie ma wpływu na merytoryczną zawartość pracy. Jakkolwiek uwaga w tym zakresie musiała zostać tu odnotowana.

Ponadto, doktorant zastosował w pracy dwojakie nazewnictwo dla zamieszczanych w pracy obrazów: „Rys.” i „Fot.”. Wydaje się, że to drugie jest niepotrzebnie zastosowane i można by w całej pracy, także dla zdjęć, zastosować nazewnictwo jak dla rysunków. Tym bardziej, że np. na str. 99 do przytoczonych zdjęć doktorant stosuje nazewnictwo typu „Rys.”, a do niemal identycznych zdjęć ze str. 94 „Fot.”.

Powyższe uwagi nie mają jednak wpływu na bardzo dobrą ocenę sposobu zredagowania pracy.

## 5. Pytania i zagadnienia dyskusyjne

Poniżej przedstawione zostały pytania dotyczące treści merytorycznych zawartych w pracy, które wzbudziły pewne wątpliwości u recenzenta w trakcie zapoznawania się jej tekstem. Są to zarówno pytania dotyczące części teoretycznej jak i pytania problematyczne związane z wykonanymi przez doktoranta pracami badawczymi.

- 1) Autor od początku pracy operuje pojęciem „iskra długa” nie definiując jednak jednoznacznie tego pojęcia. Czy „iskra długa”, jako zjawisko, może być stricte zdefiniowanym pojęciem? Wydaje się, że warto podczas obrony pracy poświęcić jeden slajd na, przynajmniej przybliżoną, definicję tego zjawiska.
- 2) Doktorant pisze w pracy, że dla udarów piorunowych i łączeniowych obserwuje się znaczne różnice w krętości kanału wyładowczego. Recenzent nie znalazł jednak w tekście rozprawy wyjaśnienia powodu tych różnic. Czy mógłby doktorant krótko wyjaśnić co leży u podstawy tych różnic?
- 3) Jedna z teorii rozwoju wyładowań elektrycznych w cieczach mówi, że wyładowanie w cieczy rozwija się podobnie jak wyładowanie w dużych odstępach powietrznych,



oczywiście z zachowaniem odpowiedniego efektu skali i uwzględnieniu różnych środowisk, w których zachodzą procesy fizyczne determinujące rozwój kanału wyładowczego. Czy doktorant spotkał się podczas analizy literatury z analizą fraktalną wyładowań w przerwach olejowych? Jeśli tak, to czy można znaleźć jakieś cechy wspólne pomiędzy modelowaniem wyładowań w oleju i w powietrzu? Jeśli nie, to czy doktorant widzi możliwość zaaplikowania swojego modelu właśnie w obszarze analizy rozwoju wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych?

- 4) W jakim środowisku prowadzono symulacje? W rozdz. 5 nie podane są dane w tym zakresie. Informacja o użyciu pakietu COMSOL Multiphysics w połączeniu z pakietem MATLAB pojawia dopiero na str. 48, ale w kontekście symulacji w przestrzeni 3D. Dalej w pracy pojawia się też porównanie czasu symulacji dla pakietów COMDOL i FEMM. Czy doktorant mógłby podać więcej szczegółów w kontekście całości wykonanych prac symulacyjnych/modelowych?
- 5) W zakresie wspomnianych już w uwadze 3 wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych należy przypomnieć, że wyładowania te, inicjowane udarem napięciowym piorunowym biegunowości ujemnej, rozwijają się w sposób zbliżony do rys. 5.5 (z bocznymi rozgałęzieniami towarzyszącymi kanałowi głównemu), choć taki dokładny obraz wyładowania jest możliwy do rejestracji tylko przy zastosowaniu wysokoczułych technik fotograficznych, np. fotografii cieniowej. Przy rejestracji metodą ultraszybką kamery boczne kanały są „wycinane” ze względu na niższą rozdzielczość przestrzenną zdjęć wykonanych taką kamerą. Czy doktorant nie zakładał, że być może rzeczywistemu rozwojowi iskry długiej nie towarzyszą jednak mikrorozgałęzienia, które nie są jednak widoczne gdy rejestrowane są techniką fotografii statycznej? Czy doktorant próbował wykonywać fotografie przy całkowicie zaciemnionym pomieszczeniu (hali WN)?
- 6) Jaka liczba iskier długich została uwzględniona do określenia wymiaru fraktalnego populacji wyładowań (rys. 6.15 a i b)?
- 7) Rys. 6.16 prezentuje zależność pomiędzy wymiarem fraktalnym a liczebnością populacji. Czy wartości na osi x oznaczają, że wymiar fraktalny liczony był odpowiednio dla 1, 2, 3, 4 itd. iskier generowanych w symulacji? Czy oznacza to, że dla liczby iskier  $> 10$  wymiar ten „stabilizuje się” na określonym poziomie?
- 8) Czy należy założyć, że wymiar fraktalny populacji wyładowań będzie zmieniał się identycznie jak średni wymiar fraktalny w zależności od wartości współczynnika  $\eta$ ? Informacja w tym zakresie nie wynika jednoznacznie z tekstu pracy.
- 9) Rozdział 8.2 doktorant rozpoczyna stwierdzeniem, że „Na rys. 8.1 przedstawiono schemat układu pomiarowego zbudowanego na potrzeby pomiarów parametrów opisujących

trajektorię iskry długiej” i dalej opisuje szczegółowo generator udarowy wykorzystany w pomiarach z podaniem parametrów pojemności i rezystancji jego elementów. Taki opis sugeruje, że doktorant samodzielnie zestawiał generator w celu uzyskania odpowiednich parametrów czasowych generowanych udarów. Proszę o wyjaśnienie tego faktu.

- 10) Czy w kontekście znalezienia optymalnej pozycji dla układu elektrod względem pozostałych elementów hali WN, w tym jej ścian, doktorant nie rozważał wyznaczenia rozkładu pola elektrycznego w analizowanym obszarze, aby sprawdzić potencjalne „słabe obszary” o zwiększonym natężeniu pola elektrycznego, mogące mieć wpływ na ewentualny rozwój wyładowania właśnie w kierunku tego obszaru? Czy takie podejście, zdaniem doktoranta, jest wskazane przy rozważanych odległościach pomiędzy elementami znajdującymi się pod potencjałem WN i elementami uziemionymi?
- 11) Zgodnie z informacjami z rozdziału 10 doktorant rejestrował kształt fali napięciowej (udaru) podczas rejestracji isker? Czy autor rozważał analizę korelacji pomiędzy trajektorią iskry a wartością napięcia probierczego i czasem do przeskoku (np. różnice pomiędzy przeskokiem na czole udaru i na jego grzbiecie)? Być może nie jest to clue pracy, ale wydaje się, że takie korelacje mogą dać interesujące wyniki w kontekście obserwacji poczynionych przez doktoranta.
- 12) W nawiązaniu do uwagi 11 nasuwa się pytanie czy doktorant rozważał przyłożenie napięć znacznie przekraczających udarowe napięcia przeskoku np. tak, by do przeskoku zawsze dochodziło na czole udaru? Czy takie wartości szczytowe udarów mogłyby wpłynąć np. na cechy charakterystyczne iskry jak wymiar fraktalny populacji czy krętość. Czy takie badania zdaniem doktoranta mają sens z punktu widzenia koordynacji izolacji linii napowietrznych najwyższych napięć?

## 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowaną rozprawę doktorską oceniam jak najbardziej pozytywnie. Założenia pracy zostały zrealizowane a jej cel osiągnięty. Doktorant udowodnił postawione tezy wypracowując oryginalne wnioski, które, co należy podkreślić, mają także charakter praktyczny. Praca jest spójna metodologicznie i nie zawiera błędów w tym zakresie. Wskazane powyżej uwagi i pytania dyskusyjne w żadnym stopniu nie umniejszają wartości dysertacji, a są jedynie przyczynkiem do głębszej dyskusji wybranych aspektów poruszonych w pracy. **Praca bez wątpienia wpisuje się w zakres dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne i spełnia z nadmiarem wymagania stawiane pracom doktorskim.**

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Michała Molasa pt. „Pomiary i trajektoria iskry długiej dla potrzeb modelowania fraktalnego **może być dopuszczona do dalszego procedowania, w tym do publicznej obrony.**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Janet Kozłowski". The signature is fluid and cursive, with a large initial 'J' and 'K'.

