

Prof. dr hab. inż. Marek Florkowski  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki  
al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków

Kraków, 6 lipca 2023 r.

WPŁYNEŁO

dn..... 2023 -07- 17

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**mgr. inż. Michała Molasa**

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

wykonanej pod kierunkiem Promotora Pana dr. hab. inż. Marcina Szewczyka, prof. uczelni.

Dyscyplina naukowa: Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.  
Dziedzina nauk: Nauki Inżynieryjno - Techniczne.

Recenzje opracowano na zlecenie Prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, z dnia 26 maja 2023 r.

### **1. Tematyka i teza rozprawy**

Temat pracy doktorskiej należy do obszernej grupy problemów Techniki Wysokich Napięć i dotyczy elektroenergetycznych napowietrznych linii przesyłowych wysokiego napięcia, w szczególności narażeń przepięciowych występujących w warunkach wyładowań elektrycznych podczas ich eksploatacji. Formą wyładowania elektrycznego jest tzw. iskra długa, której mechanizm inicjowania i rozwoju jest przedmiotem analiz teoretycznych i prac eksperymentalnych. Tematyka ta jest aktualnym obszarem badawczym z uwagi na bardzo dynamiczny rozwój systemów przesyłu energii elektrycznej wysokich i ultra wysokich napięć. Przesył coraz większych mocy wymaga podnoszenia poziomów napięć znamionowych linii przesyłowych, które osiągają obecnie 1.2 MV. Głównymi obiektami badań iskry długiej są linie napowietrzne, konstrukcje izolatorów ze względu na występowanie wyładowań piorunowych oraz zjawisk przepięciowych w układach izolacyjnych tych obiektów. Odstępy izolacyjne w tego typu konstrukcjach mogą wynosić od kilku do kilkunastu metrów. Mechanizm rozwoju wyładowań w dużych odstępach powietrznych jest przedmiotem badań praktycznie od początku powstania układów przesyłowych energii elektrycznej. Wraz ze wzrastającymi poziomami napięć pojawiały się coraz większe wyzwania dotyczące układów izolacyjnych. Wyładowania iskrowe w dużych przerwach międzyelektrodowych szczególnie intensywnie były badane od lat 40. ubiegłego

wieku, kiedy to m.in. Raether, Loeb, Meek opublikowali pierwsze prace teoretyczne na temat mechanizmów wyładowań elektrycznych, w tym iskry długiej. Wprowadzono wówczas pojęcie wyładowania liderowego jako kanału plazmowego, powstającego w następstwie zjawisk strimerowych, którym towarzyszą efekty fotojonizacji przestrzennej. Należy tutaj wspomnieć też o ważnych badaniach w tematyce iskry długiej prowadzonych już w latach 70. ubiegłego wieku przez profesorów Romualda Kosztaluka i Ryszarda Malewskiego, zarówno w Polsce, jak i w instytucie IREQ w Kanadzie, który dysponował wówczas największym laboratorium wysokonapięciowym na świecie. Z kolei w tematyce związanej z modelowaniem fraktalnym wyładowań, pionierskie prace były opublikowane przez dr. Lutza Niemeyera w Physical Review Letters w roku 1984. Z uwagi na skomplikowane zjawiska fizyczne problematyka ta jest ciągle aktualna zarówno od strony teoretycznej, jak i badań laboratoryjnych, i wpisuje się również w obszar problemów koordynacji izolacji urządzeń w systemie elektroenergetycznym. Prace w dziedzinie badań wyładowań elektrycznych są intensywnie rozwijane w licznych ośrodkach zarówno badawczych, jak i przemysłowych, i prezentowane w publikacjach IEEE, Elsevier, IET, MDPI i innych.

Recenzowana praca doktorska odnosi się do powyższej grupy zagadnień. W rozprawie Autor skupił się na pomiarach i analizie trajektorii iskry długiej dla potrzeb modelowania fraktalnego, formułując aż trzy tezy pracy następująco:

*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, umożliwi 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 przez Doktoranta następujący cel pracy:

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

Zawarte w rozprawie badania były częściowo finansowane ze środków dotacji statutowej Instytutu Energetyki w Warszawie. W latach 2021-2022 Doktorant opublikował wybrane wyniki prac w trzech artykułach, dwa w Przeglądzie Elektrotechnicznym i jeden w MDPI Energies.

## 2. Dane bibliograficzne rozprawy

Rozprawa, opracowana w języku polskim, zawiera 150 stron. Składa się z 12 rozdziałów pogrupowanych w cztery części, oraz spisu literatury. Wykaz literatury obejmuje 130 pozycji. Praca doktorska posiada logiczny układ rozdziałów, liczny materiał ilustracyjny w postaci zdjęć, rysunków, wyników symulacji i tabel. Należy podkreślić staranną stronę edytorską pracy. Stosowane w rozprawie jednostki należą do systemu SI. Studiowanie rozprawy ułatwiłby wykaz symboli, oznaczeń i skrótów.

## 3. Charakterystyka rozprawy i oceny częściowe

Problematyka rozprawy doktorskiej obejmuje pomiary i analizy trajektorii iskry długiej dla potrzeb modelowania fraktalnego. W pierwszej części pracy (rozdziały 1-3) Autor przedstawił tematykę, tezy i cel rozprawy, formułując 6 zadań określających zakres pracy. Część druga (rozdziały 4-6) poświęcona jest modelowaniu fraktalnemu i symulacjom iskry długiej. Opisane zostało zastosowanie modelu fraktalnego do symulacji wyładowań elektrycznych, w szczególności wyładowań powierzchniowych, drzewiastych, piorunowych i iskry długiej. Następnie przedstawiono opis trajektorii iskry długiej przy użyciu modelu fraktalnego wraz z symulacjami. Z kolei badania eksperymentalne zawarte są w części trzeciej (rozdziały 7-10), zawierającej przegląd pomiarów iskry długiej, opis systemów pomiarowych i metod rejestracji oraz autorskie wyniki badań laboratoryjnych iskry długiej. W części czwartej (rozdziały 11-12) przedstawiono wnioski oraz kierunki dalszych badań.

Celem prezentowanej rozprawy jest rozszerzenie wiedzy w zakresie modelowania fraktalnego trajektorii iskry długiej. Dla uzyskania danych bazowych przeprowadzono rejestracje laboratoryjną udarów piorunowych i łączeniowych obu biegunowości o wartościach szczytowych do 4 MV w układach modelowych kula-kula i kula-płyta.

Pewien niedosyt odnosi się do części wstępnej dotyczącej wprowadzenia w tematykę wyładowań liderowych, brak jest przedstawienia stanu techniki w zakresie mechanizmów fizycznych związanych z propagacją iskry długiej, jak i obecnych możliwości pomiarowych. Autor po przedstawieniu tezy, celu i zakresu rozprawy przechodzi bezpośrednio do modelowania fraktalnego. Dodatkowy, nawet pobieżny opis modeli przeskoku iskrowego (wg Loeb, Lemke, Gallimberti etc.), a także rozwijanych modeli stochastycznych, byłby merytorycznie bardzo pożądanym i ubogacającym pracę. W tym kontekście sformułowanie w rozdziale pierwszym dotyczące początku badań trajektorii kanału wyładowań - „...badania opublikowane już w latach 70 XX w. przez Les Renardieres...” - jest niezbyt trafne, gdyż intensywne badania prowadzono już w latach 40-tych XX wieku.

Również w rozdziale 7 prezentującym przegląd badań eksperymentalnych iskry długiej, część pokazująca stan techniki jest bardzo skąpa, a jest to niezmiernie ciekawy kierunek związany z niewiarygodnym wręcz postępowaniem w rozwoju ultra szybkich systemów obrazowania, pozwalających na uzyskanie obecnie nawet

subnanosekundowych czasów między klatkami rejestrowanej sekwencji. Zaprezentowane w pracy referencyjne wyniki najnowszych badań w zakresie pomiarów wymiaru fraktalnego iskry długiej (rozdział 7.2, pozycje [62, 74]) odnoszą się do roku 2015 i 2016, czyli ponad 7 lat temu, stąd pytanie czy nie pojawiły się jakieś ciekawe wyniki w ostatnich latach.

Znaczna część pracy poświęcona jest symulacjom iskry długiej. Główny element rozprawy koncentruje się wokół modelowania fraktalnego, szczególnie skupiając się na dwóch parametrach opisujących geometrię kanału wyładowania tj. krętość i wymiar fraktalny, pozwalających w sposób ilościowy zobrazować różnice pomiędzy trajektoriami różnych rodzajów wyładowań iskrowych. Ta część pracy jest bardzo ciekawa, zawiera też interesujące propozycje merytoryczne Doktoranta. Mankamentem jest natomiast brak bardziej szczegółowego przedstawienia zastosowanych i opracowanych algorytmów. Myślę, że bardzo korzystnym byłoby przedstawienie np. pseudo kodu, który pokazywałby główne idee i rozwiązania. Dla przykładu w rozdziale 5.4 opisany jest wymiar fraktalny obliczany metodą pudełkową, a w następnym rozdziale 5.5 przedstawiano już ocenę jakościową wyników symulacji, nie opisując wcześniej algorytmów i etapów symulacji.

Doktorant przedstawił ciekawe możliwości obrazowania przestrzennego iskry długiej, wykorzystując w części pomiarowej zsynchronizowane aparaty fotograficzne, rejestrujące wysokonapięciowe udary piorunowe (do 4MV!) w dwóch płaszczyznach. Należy podkreślić profesjonalne przygotowanie eksperymentalne mgr. inż. Michała Molasa w bardzo trudnym obszarze generowania i rejestracji przebiegów wysokonapięciowych, opracowania programu eksperymentów oraz posługiwania się aparaturą w Laboratorium Wysokich Napięć. Oprócz strony technicznej i odpowiedniego zabezpieczenia aparatury pomiarowej trzeba podkreślić także najważniejszy element dotyczący bezpieczeństwa personelu wykonującego tego typu eksperymenty.

W kolejnym kroku szczególnie interesująca wydaje się być rekonstrukcja przestrzenna kanału wyładowania zaprezentowana w pracy. Do wyznaczenia linii centralnej kanału wyładowania Doktorant zastosował różne techniki przetwarzania obrazów i porównał ich efektywność, ze szczególnym naciskiem na filtrowanie gałęzi bocznych odchodzących od kanału głównego. Poglądowo i efektownie zostały przedstawione trajektorie populacji wyładowań (rozdział 10.2), których źródłem były udary piorunowe i łączeniowe biegunowości dodatniej i ujemnej w konfiguracji elektrod kula-kula oraz kula-płyta. Wartościowym przyczynkiem jest wyznaczenie potencjalnego obszaru rozwoju wyładowania, definiowanego jako średnia odległość pomiędzy osią przerwy iskrowej, a najdalej położonymi punktami trajektorii poszczególnych wyładowań. Zestawienie przedstawione na rys.10.6 uwypukla różnice między wyładowaniami będącymi następstwem udarów łączeniowych i piorunowych, jednocześnie pokazując podobny charakter przebiegów w obydwu zastosowanych konfiguracjach elektrod.

Do głównych osiągnięć Doktoranta należy moim zadaniem zaliczyć:

- zaproponowanie i opracowanie modyfikacji modelu fraktalnego iskry długiej,
- krytyczna analiza krętości iskry i długości segmentu, oraz uwagi wzbogacające możliwości modelu fraktalnego,
- zastosowanie w opisie trajektorii rozwoju iskry długiej wymiaru fraktalnego populacji oraz potencjalnej strefy rozwoju wyładowania dla rozróżnienia pomiędzy trajektoriami wyładowań piorunowych i łączeniowych o różnych biegunowościach.

- zaprojektowanie i zestawienie wysokonapięciowego układu pomiarowego trajektorii wyładowań przy uderzeniach piorunowych, w zakresie wartości szczytowych napięcia do 4 MV,
- Autorska metoda wyznaczania trajektorii wyładowania w oparciu o triangulację wielokąta utworzonego przez granice kanału wyładowania oraz metoda wyznaczania długości segmentów.

Wartość naukową rozprawy stanowią nowe propozycje Autora wynikające z przeprowadzonych badań własnych, rozszerzenia analizy i wizualizacji trajektorii iskry długiej. Szczególnie warto podkreślić jest bardzo duże doświadczenie zawodowe Autora, który posiada wieloletnie doświadczenia praktyczne w pomiarach wysokonapięciowych nabyte w ramach pracy w Instytucie Energetyki w Warszawie. Elementem godnym podkreślenia jest połączenie praktyki inżynierskiej i badań naukowych.

Poniżej zebrano uwagi i pytania recenzenta do rozprawy doktorskiej, natomiast w dalszej części zestawiono wybrane uwagi szczegółowe.

#### Uwagi i pytania:

1. W pracy zastosowano uproszczony model iskry długiej, przyjmując głównie kryterium polowe. Jak inne mechanizmy fizyczne propagacji lidera np. fotojonizacji, parametry ośrodka (np. gęstość gazu, temperatura, wilgotność) wpływają na dokładność modelu fraktalnego i wyznaczenie trajektorii?
2. Istotnym parametrem wyznaczania punktów węzłowych i segmentów kanału wyładowania jest porównanie prawdopodobieństwa rozwoju wyładowania  $p(P_i \rightarrow P_{i,j})$  z losowo wybraną liczbą  $r$ . Niestety w pracy brak opisu metodyki generowania tej liczby.
3. Na rys. 5.5. przedstawiono trzy scenariusze wyników symulacji. Przypadek drugi zilustrowany na rys. 5.5b zakwalifikowany jest jako wyładowanie w układzie elektrod kula-kula. Jednak patrząc na wizualizację, wyładowanie nie dochodzi do uziemionej elektrody kulistej?
4. Bardzo istotnym parametrem w modelowaniu fraktalnym wyładowań elektrycznych jest parametr  $\eta$ , występujący w wykładniku potęgowym natężenia pola elektrycznego. Wartość tego parametru ma istotny wpływ na przestrzenną propagację oraz rozgałęzienia wyładowania. Jaka wartość tego parametru jest rekomendowana przez Doktoranta oraz jak wpływa rozkład przestrzenny elektrod w rzeczywistych układach izolacyjnych, a zatem przestrzenny rozkład natężenia pola elektrycznego (odmienny od modelowego) na dobór wartości tego współczynnika?
5. W przyjętych symulacjach przeprowadzonych przez Autora przyjęta została stała długość segmentu w trakcie całego wyładowania. Jak dobór adaptacyjnie zmiennej długości segmentów wpłynie na modelowanie kanału wyładowania ?
6. Przeprowadzone pomiary laboratoryjne były wykonywane dla uderzeń biegunowości dodatniej i ujemnej. Czy ten fakt był uwzględniany i ma wpływ na modelowanie fraktalne?
7. Jak kształt przebiegu wysokiego napięcia (np. stromość uderzenia) może być odwzorowany w modelu fraktalnym wyładowania?
8. W rozdziale 6. przedstawione są wyniki symulacji trajektorii kilku kolejnych wyładowań. W rzeczywistości jest wiele uwarunkowań wpływających na propagację następujących po sobie wyładowań, jak na przykład jonizacja kanału. Jak - zdaniem Doktoranta - ten aspekt „pamięciowy” może być rozwiązany w modelu fraktalnym?

### Wybrane uwagi szczegółowe

1. str. 24: odniesienie do rysunku jest rys. 4.1 - powinno być rys. 4.2,
2. str. 35: wzór 5.1, wymiar fraktalny zdefiniowano jako  $D_b(F)$ , przy czym  $F$  nie występuje we wzorze ?
3. na rysunkach, np. rys. 6.5, 9.10 brak opisu osi x i y,
4. rys. 6.4 – brak skali i wartości na osi x,
5. str. 46: odniesienie do rozdziału jest 4.4 – powinno być 6.4,
6. na fotografiach rzeczywistych wyładowań z pomiarów laboratoryjnych ułatwiająca interpretację byłaby skala pokazująca odległość międzyelektrową,
7. str. 52: sformułowanie „wyładowanie trafia w uziemioną kulę, a część w podłogę”. Zamiast „podłogę” właściwe jest określenie „uziemioną płytę”.

## 4. Ocena ogólna rozprawy i wniosek końcowy

Doktorant przedstawił autorskie i wartościowe wyniki pracy w zakresie modelowania fraktalnego trajektorii iskry długiej. Należy podkreślić umiejętności doktoranta prowadzenia badań eksperymentalnych, co jest ważnym elementem w pracy naukowej. Godna uwagi jest też szeroka wiedza Kandydata w zakresie miernictwa wysokonapięciowego. Rozprawa stanowi istotny przyczynek do modelowania fraktalnego wyładowań elektrycznych wyrażony w tezach pracy doktorskiej. Realizując pracę doktorską Autor wykazał się dużą wiedzą pomiarową z zakresu techniki wysokich napięć oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Reasumując, rozprawa wnosi oryginalny wkład naukowy w problematykę mechanizmów wyładowań elektrycznych. Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Molasa - przygotowana pod kierunkiem Promotora dr. hab. inż. Marcina Szewczyka, prof. uczelni – w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne stanowi ciekawe opracowanie aktualnego zagadnienia naukowo-technicznego i dowodzi dobrego opanowania przez Doktoranta prowadzenia badań naukowych, z którymi jest związana.

Przedłożona rozprawa doktorska spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 ze zm.). Wnoszę, zatem o dopuszczenie Autora rozprawy mgr. inż. Michała Molasa do publicznej obrony pracy doktorskiej.

Dodatkowo, uwzględniając oryginalność rozprawy, połączenie analiz teoretycznych, symulacji oraz przeprowadzenie skomplikowanych eksperymentów wysokonapięciowych, wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej pracy doktorskiej.