

dr hab. inż. Krzysztof Siodła, prof. uczelni
Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Instytut Elektroenergetyki
Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych
ul. Piotrowo 3A
60-965 Poznań
e-mail: krzysztof.siodla@put.poznan.pl
tel.: 61-665 2279

Poznań, 24.07.2023

WPLYNĘŁO

2023 -07- 3 1

dn.....

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Molasa pt.:

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

1. Podstawa formalna wykonania recenzji

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Michała Molasa pod tytułem „**Pomiary i analiza trajektorii iskry długiej dla potrzeb modelowania fraktalnego**” została przeze mnie przygotowana na zlecenie zawarte w piśmie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego, z dnia 26 maja 2023 r. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Marcin Szewczyk, prof. uczelni. Pracę do recenzji otrzymałem w dniu 6 czerwca 2023r.

2. Ocena aktualności podjętej tematyki

Urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia, pracujące w systemie elektroenergetycznym, narażone są na działanie różnego rodzaju zakłóceń, jak na przykład napięć udarowych, zarówno łączeniowych jak i piorunowych. Dlatego urządzenia te powinny być poddane próbom napięciowym po procesie ich zaprojektowania i wykonania w formie prototypu przed wprowadzeniem do eksploatacji, jak i w trakcie użytkowania w ramach prób okresowych. Na etapie projektowania wykonuje się różnego rodzaju badania na modelach i fragmentach urządzenia, istotnych z punktu widzenia późniejszej eksploatacji. Badania modelowe są szczególnie przydatne w sytuacji, gdy wielkość rzeczywistego urządzenia elektroenergetycznego utrudnia, lub czasami wręcz uniemożliwia, wykonanie prób napięciowych na projektowanym obiekcie. Taka sytuacja występuje na przykład w przypadku

projektowania słupa linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć, gdy wymiary poszczególnych elementów słupa bardzo utrudniają wykonanie badań napięciowych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Dlatego tak istotnym zagadnieniem jest poznanie zjawisk występujących w trakcie prób napięciami probierczymi udarowymi piorunowymi i łączeniowymi. Wymiary odstępów izolacyjnych w tzw. oknie słupa oraz odległości pomiędzy linkami przewodów fazowych i elementami konstrukcyjnymi słupa, mają istotne znaczenie dla prawidłowego zaprojektowania konstrukcji wsporczej linii elektroenergetycznej. Ważnym zagadnieniem jest poznanie trajektorii rozwoju wyładowania elektrycznego rozwijającego się w formie łuku pod wpływem napięcia udarowego piorunowego lub łączeniowego. Wiedza taka pozwala na sprawdzenie poprawności wykonanego projektu oraz budowy danego urządzenia, z możliwością przewidywania miejsca wystąpienia i drogi rozwoju kanału wyładowania elektrycznego. Doktorant wykonał odpowiednie pomiary, przeprowadził symulacje i przeanalizował trajektorię iskry długiej na potrzeby modelowania fraktalnego pozwalającego przewidywać drogę rozwoju wyładowania elektrycznego powstającego pod wpływem napięć udarowych, zarówno piorunowych, jak i łączeniowych.

Uważam, że problematyka wytrzymałości elektrycznej urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia, jak i możliwość przewidywania drogi przeskoku przy narażeniu przepięciowym jest zagadnieniem bardzo ważnym i istotnym z punktu widzenia niezawodności i bezpieczeństwa pracy urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Dlatego bardzo dobrze się stało, że Doktorant w swojej działalności naukowej zajął się tak ważnym zagadnieniem. Podkreślić należy, że mając możliwość pracy w najlepiej wyposażonym w Polsce Laboratorium Wysokich Napięć Instytutu Energetyki, Doktorant wykonał badania przy bardzo wysokich napięciach udarowych, niedostępnych dla innych naukowców. Efektem tego jest praca doktorska będąca przedmiotem obrony. Reasumując, uważam, że tematyka rozprawy i jej cel obejmuje problemy aktualne i wymagające naukowego wyjaśnienia. **Uważam więc, że podjęcie przez Doktoranta tej tematyki jest trafne i uzasadnione, zarówno z naukowego jak i technicznego punktu widzenia.**

3. Cel, zakres i najważniejsze osiągnięcia rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska należy do grupy prac eksperymentalnych. Praca jest bardzo obszerna wydana została w formie broszury liczącej łącznie 150 stron. Składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim. Podzielona została na cztery części,

w ramach których jest dwanaście rozdziałów oraz spis literatury obejmujący 120 pozycji, w tym trzy pozycje, których Doktorant jest współautorem [10-12].

Swoją rozprawę Doktorant rozpoczął od krótkiego omówienia problematyki wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych wysokiego napięcia w aspekcie koordynacji izolacji projektowanych urządzeń elektroenergetycznych powstałej na bazie modeli fraktalnych opisujących mechanizm rozwoju wyładowania.

W rozdziale drugim Doktorant zawarł trzy tezy, cel i zakres swojej rozprawy doktorskiej. Tezami pracy jest dobór parametrów pozwalających na poprawne zobrazowanie trajektorii wyładowania elektrycznego. Tymi parametrami w modelowaniu fraktalnym iskry długiej jest krętość kanału wyładowania, wymiar fraktalny, potencjalna strefa rozwoju wyładowania oraz długość pojedynczego segmentu kanału przeskoku iskrowego. Celem wykonanej pracy była realizacja kompleksowych badań parametrów trajektorii wyładowań elektrycznych uzyskanych w wyniku modelowania, jak i badań laboratoryjnych. Zakres pracy obejmował opracowanie modelu symulacyjnego i wykonanie badań symulacyjnych wyładowania, wyznaczenie parametrów drogi przeskoku, wykonanie pomiarów laboratoryjnych napięcia przeskoku i wyznaczenie drogi iskry długiej pomiędzy elektrodami, a na ich podstawie przeprowadzono analizę trajektorii zarejestrowanych wyładowań. Opisano proces wyznaczania potencjalnego kierunku rozwoju wyładowania.

Doktorant przygotował laboratoryjne stanowisko badawcze i wykonał na nim pomiary oraz przeprowadził odpowiednie symulacje, które pozwoliły opisać trajektorię iskry długiej przy użyciu modelu fraktalnego. Opis wykonanych prac zawarty został w kolejnych rozdziałach rozprawy doktorskiej.

Ostatnia część rozprawy to podsumowanie wykonanych prac, bardzo obszerne wnioski końcowe oraz krótki opis możliwości kontynuowania dalszych badań.

Rozprawę doktorską kończy spis literatury wykorzystanej przez Autora w trakcie realizacji pracy, liczący 130 pozycji, w tym trzy pozycje [10-12], których Doktorant jest współautorem.

4. Ocena sposobu edycji pracy i uwagi formalne

Przedstawiona do recenzji praca doktorska przygotowana została w sposób bardzo poprawny i staranny, chociaż można w niej znaleźć drobne usterki typu edycyjnego. Zamieszczone zdjęcia, rysunki, wykresy i tablice są bardzo wyraźne, przejrzyste i wykonane z należyłą starannością. Praca napisana została poprawnie pod względem językowym. Usterki

edycyjne, interpunkcyjne i stylistyczne, które zaznaczyłem w otrzymanym egzemplarzu rozprawy doktorskiej, nie podważają pozytywnej oceny pracy.

Uwagi formalne dotyczące sposobu napisania rozprawy doktorskiej i jej treści są następujące:

1. Doktorant wprowadził w swej rozprawie osobną numerację podpisów dla rysunków i dla zdjęć. Wszystkie ilustracje powinny być raczej opisane jako rysunki (np. Rys. 1.1.) i wtedy nie dochodziłoby do takich nieścisłości, jak na przykład rysunek 8.9 podpisano jako rysunek, a są to cztery zdjęcia iskry wyładowania elektrycznego. Podobnie na rysunkach 9.12 i 9.14. Na rysunkach o numerach 6.5, 8.7, 9.1, 9.3, 9.4, 9.8 i 9.10 są i zdjęcia i grafiki (rysunki). Ponadto w tekście rozprawy nie powinno się używać wielkich liter w odwołaniach do rysunków i tablic – jak na przykład Doktorant napisał w swej rozprawie: „Na Rys. 4.1 ...”, czy też „W Tab. 5.1”. W przypadku pisania rozpraw i artykułów technicznych, dobrym wzorcem do stosowania są wymagania edytorskie Przeglądu Elektrotechnicznego, w którym Doktorant opublikował dwa artykuły.
2. U dołu strony numer 46 Doktorant odsyła czytelnika do rozdziału 4.4. W rozprawie nie ma rozdziału o takim numerze. Jaki numer powinien znaleźć się w tym miejscu – czy 6.4?
3. Wszystkie skróty stosowane przez Doktoranta zostały prawidłowo rozwinięte w miejscu ich pierwszego wystąpienia, za wyjątkiem skrótu dotyczącego dzielnika CRS (str. 74). Co oznacza ten skrót?
4. Doktorant w swej rozprawie nie ustrzegł się kilku dziwnych sformułowań stylistycznych, jak np. „ryzyko uderzenia wyładowania” (str. 31), „przedstawiono wykres przedstawiający” (str. 101), „duża ilość liczba” (str. 104), itp.
5. W kilku miejscach w rozprawie znaleźć można błędy edytorskie, jak na przykład „model metoda” (str. 21), „znajduje czoło” (str. 27), „odwirowującą” (str. 32), „na jako” (str. 58), „badania symulacje” (str. 64), „bark” (zamiast „brak” str. 71), „elektroda pływową” – zamiast „płytkowa” – czterokrotnie na str. 84-85, „wszyskie” (rysunki 9.7 i 9.9 na str. 95 i 96), „zastaw danych” (str. 113), „Elek-trotechniczny” ([11] str. 139), „Internatjonal” ([51] str. 143), itp.
6. Wiele pozycji w spisie literatury opisanych jest w sposób niepoprawny. Doktorant wpisywał na przykład pełne imię autora publikacji, zamiast tylko inicjału imienia [18, 23, 28, 32 itp.], albo inicjał imienia wpisano przed nazwiskiem, zamiast za [10, 11, 12, 13 itp.], czy też brak pozostałych współautorów (Zaengl W., Kuffel J.) w pozycji [64].

Ponadto powołując się na pozycje książkowe lub normy, należałoby odnieść się do najnowszych, aktualnych wydań. Na przykład książka prof. Z.Flisowskiego „Technika wysokich napięć” ukazywała się także w latach 2023, 2017, 2009 itp., a Doktorant powołuje się na wydanie z roku 2005. Książka prof. H.Rawy [73] ukazała się także w roku 2011. Norma IEC 60383-1 [94] ostatnie wydanie miała w roku 2023, a poprzednie w 2005. Norma IEC 60168 [96] ostatnie wydanie miała w roku 1999.

7. Inne drobne usterki edycyjne i stylistyczne zaznaczyłem bezpośrednio w tekście rozprawy doktorskiej, którą dostałem do recenzji i mogę ją udostępnić Doktorantowi do wglądu na jego życzenie.

5. Uwagi dyskusyjne

W trakcie recenzowania przedstawionej rozprawy doktorskiej, nasunęły mi się następujące uwagi, o wyjaśnienie których proszę Doktoranta.

1. Dlaczego – jeżeli celem wykonanych badań laboratoryjnych i symulacji – było wywołanie przeskoku iskry długiej w powietrzu, Doktorant nie zastosował układu elektrod ostrze-płyta, lub ostrze-ostrze, co znacząco ułatwiłoby wywołanie (powstanie) przeskoku? Co prawda na stronach 32-33 Doktorant napisał, dlaczego wybrał do badań układ kula-kula i kula-płaszczyzna, ale na stronie 124 porównywał uzyskane przez siebie wyniki badań do tych, które uzyskali inni naukowcy [59-61], ale oni w swoich badaniach wykorzystywali układ ostrze-płyta. Podobnie, na stronie 111, Doktorant stwierdza, że celem badań jest uzyskanie „najdłuższych przerw iskrowych”, a to można łatwiej otrzymać w układzie elektrod o polu silnie niejednorodnym, czyli ostrze-ostrze. Proszę o komentarz.
2. U dołu strony numer 27 napisano, że współczynnik „ μ ” we wzorze 4.4 zależy od biegunowości i może przyjmować trzy wartości, mianowicie: 5, 7,5 lub 10. Jak to należy rozumieć, bo skoro biegunowości mogą być tylko dwie, tzn. „+” lub „-”, to jaką wartość może przyjąć każda z nich, skoro do wyboru są trzy wyżej wymienione wartości?
3. Na stronie 32 Doktorant napisał, że „Zarówno w badaniach symulacyjnych, jak i modelowych, ostrza są często zastępowane kulami o odpowiednio dobranej średnicy (np. [10]). Takie podejście pozawala uniknąć problemów związanych z prawidłową definicją geometrii ostrza.”. Stwierdzić należy, że od promienia ostrza rzeczywiście mocno zależy rozwój zjawisk przedprzeskokowych, a co za tym idzie wartość napięcia przeskoku, ale jest to bardzo istotne przy niewielkich odległościach międzyelektrodowych, rzędu milimetrów i pojedynczych centymetrów. Przeskok rozwija

się wtedy według mechanizmu opisanego w 1897 roku przez Johna Townsenda. Natomiast przy odległościach międzyelektrodowych rzędu metrów, wyładowanie elektryczne rozwija się według mechanizmu kanałowego strimerowego, a nawet kanałowego strimerowo-liderowego, zaproponowanego w 1940r. przez L.B.Loeba, J.M.Meeka i H.Raethera.

4. Na stronie 34 u góry Doktorant napisał, że „... zalecana minimalna długość odstępu izolacyjnego powinna wynosić 5,6 m (zgodnie z tabelą A.2 normy [70]).”, czyli normy IEC 60071-2:2018 „*Insulation coordination*”. Jest to prawda, ale dla układu elektrod pręt-konstrukcja wsporcza. Natomiast dla układu spotykanego w rzeczywistej linii napowietrznej, czyli dla układu przewód-konstrukcja, odległość ta wynosi 4,2 m.
5. Na stronie 34 Doktorant napisał także, że założył, iż w przestrzeni międzyelektrodowej nie znajdują się wolne ładunki elektryczne. Jest to daleko idące uproszczenie, ponieważ w wyniku dotychczasowych badań fizycznych stwierdzono, że w 1 cm³ powietrza w warunkach normalnych (ciśnienia i temperatury), znajduje się około 2,7·10¹⁹ cząstek, w tym około 10³ par ładunków dodatnich i ujemnych. Myślę jednak, że nie powinno to mieć wielkiego wpływu na wartość wyliczanego potencjału.
6. Na stronie 89, rysunek 9.1b) – na prawym wykresie oś pozioma (odciętych) powinna być oznaczona jako „y” a nie „x” – podobnie jak to przedstawiono na rysunku 9.2 w układzie współrzędnych przestrzennych xyz.
7. Na stronie 91 Doktorant tłumaczy słowo „gałązka” jako „spur”. Angielskie „spur” to po polsku „ostroga”, a „gałązka” to po angielsku raczej „branch”, „limb” lub „stick”.
8. Na stronie 110 Doktorant napisał: „Podczas pomiaru pięćdziesięcioprocentowego napięcia przeskoku U_{50} dla udarów łączeniowych, jak również w obliczeniach, brano pod uwagę tylko te wyładowania, które nie wywoływały przeskoku.”. Jak należy rozumieć to stwierdzenie, skoro w metodzie „góra-dół”, zwanej też metodą Dixona-Mooda, do wyliczenia wartości pięćdziesięcioprocentowego napięcia przeskoku U_{50} , bierze się przecież pod uwagę zarówno udary, które wywoływały przeskok, jak i te, które przeskoku nie spowodowały? Proszę o komentarz.
9. Na stronie 111, na rysunku 10.1 niepoprawnie (może – mało precyzyjnie) oznaczono zarówno początek, jak i koniec czasu do ucięcia T_c udaru piorunowego uciętego na grzbiecie. W normie IEC 60060-1:2010 „*High-voltage test techniques – Part 1*”, na rysunku 11 (Figure 11) znajdującym się na stronie 32 tej normy, dokładnie zaznaczono sposób wyznaczenia tzw. wirtualnego zera, od którego należy rozpocząć pomiar czasu trwania czoła udaru T_f oraz czasu do ucięcia T_c . Czasy te wyznacza sieczna AB

(poprowadzona przez punkty odpowiadające wartościom $0,3U$ i $0,9U$) na czole udaru przecinająca się z osią czasu oraz sieczna CD ($0,1a$ i $0,7a$) na uciętym grzbiecie.

10. Strona 113, tablica 10.3 – w jaki sposób wyliczono wartości współczynnika korekcyjnego, oznaczonego w ostatniej kolumnie jako „ K_t ”? Na przykład – w wierszu trzecim i czwartym wartości temperatury ($\vartheta = 7,2^\circ\text{C}$), wilgotności względnej ($w = 86\%$) i ciśnienia ($p = 999$ hPa) są takie same, a wartości współczynnika korekcyjnego K_t są różne. Nawet jeżeli przy wyliczeniu napięcia przeskoku U_p uwzględniono (oprócz temperatury ϑ i ciśnienia p) wilgotność względną w (wyrażoną w [%]), to biorąc pod uwagę współczynnik k_w równy 0,01 dla napięcia udarowego dodatniego i k_w równy 0,009 dla napięcia ujemnego, otrzymane wyniki współczynników K_t dla LI(+) i LI(-) powinny pozostawać w stosunku do siebie w relacji równej 1,111 (ponieważ $0,01/0,009 = 1,11(1)$). Podobnie – w wierszach siedem i osiem. Proszę o komentarz.
11. Otrzymana przeze mnie rozprawa doktorska, wydrukowana w formie broszury „papierowej”, nie jest odpowiednikiem wersji elektronicznej przesłanej mi przez Pana Michała Molasa (e-mail z dnia 31.05.2023). Przesłany plik .pdf ma tylko 134 strony i 65 pozycji literaturowych, podczas gdy broszura liczy 150 stron i 130 pozycji literaturowych. Swoją recenzję wykonałem opierając się na wersji „papierowej” przesłanej mi przez prof. T.Stareckiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny AEEiTK Politechniki Warszawskiej.

Przedstawione uwagi dyskusyjne i wskazane usterki edytorskie w najmniejszym stopniu nie umniejszają pozytywnej oceny pracy jako całości. W przedłożonej rozprawie doktorskiej Doktorant przedstawił swój dorobek naukowy, wykazał się znacznym zasobem wiedzy na omawiany temat, umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, logicznego przedstawienia wyników swoich badań oraz naukowego wnioskowania. Bardzo pozytywnym aspektem rozprawy doktorskiej jest połączenie prac symulacyjnych z badaniami laboratoryjnymi, co umożliwiło sprawdzenie poprawności założeń teoretycznych. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a jej część, w której zawarto teoretyczny opis zagadnienia wykazuje, że Doktorant posiada odpowiednią wiedzę w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Zagadnienia naukowe opisane przez Pana mgr inż. Michała Molasa, oraz wykonane przez Niego badania z wyraźnym nadmiarem zaliczają się do wyżej wymienionej dyscypliny.

Odpowiadając na pytania zawarte w piśmie Pana prof. dra hab. inż. Tomasza Stareckiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, stwierdzić mogę, że:

1. Cel i teza rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Molasa zostały jasno sformułowane, co opisałem powyżej, w punkcie 3 mojej recenzji.
2. W swojej rozprawie Doktorant w sposób właściwy, poprawny i wyczerpujący przeprowadził analizę źródeł literaturowych, zarówno tych o zasięgu przede wszystkim międzynarodowym, jak i krajowym.
3. Doktorant poprawnie rozwiązał postawione zagadnienia używając do tego celu właściwych metod badawczych.
4. Oryginalność rozprawy oraz samodzielny dorobek Doktoranta polega na znaczącym rozwinięciu modeli pozwalających na symulację wyładowań elektrycznych w formie iskry długiej i wzbogaceniu ich o parametry przez siebie opracowane – krętość, odpowiedni wymiar fraktalny, określenie potencjalnej strefy rozwoju wyładowania i długość segmentu modelowanego kanału wyładowania. Pozwala to na realizację skutecznej ochrony przeciwprzebieciowej w rzeczywistych układach izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia, takich jak przesyłowe i rozdzielcze linie elektroenergetyczne. Opracowane przez Doktoranta modele fraktalne opisujące trajektorię iskry długiej i możliwość określenia prawdopodobieństwa wystąpienia wyładowania do różnych elementów konstrukcyjnych linii elektroenergetycznej, pozwala na poprawne zaprojektowanie słupa linii z uwzględnieniem warunków prawidłowej koordynacji izolacji. Jest to istotne osiągnięcie Doktoranta w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki opisywanej w literaturze światowej.
5. Doktorant wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników – w sposób jasny, zwięzły i poprawny redakcyjnie przedstawił efekty swojej pracy, zarówno tej eksperymentalnej, jak i symulacyjnej.
6. Z punktu widzenia nauk inżynierijno-technicznych przydatność rozprawy jest wysoka, co opisałem powyżej w punkcie 4.

Biorąc pod uwagę możliwe do wskazania kategorie, do których można zaliczyć rozprawę doktorską mgr inż. Michała Molasa, wskazuję kategorię d – spełnia wymagania z wyraźnym nadmiarem. Doktorant ma w swoim dorobku trzy publikacje w czasopismach technicznych, w tym jedną z nich w czasopiśmie MDPI Energies notowanym na liście Web of Science, o współczynniku JCR IF = 3,252 w 2021r. Ponadto Doktorant uzyskał pierwsze miejsce w

konkursie młodych doktorantów za najlepszą prezentację swojej pracy w trakcie XV Ogólnopolskiego Sympozjum „Inżynieria wysokich napięć”, które odbyło się w dniach 18-20.05.2022 w Będlewie koło Poznania.

6. Wniosek końcowy

Uważam, że założony przez Doktoranta cel rozprawy doktorskiej został osiągnięty, a w trakcie realizacji pracy Pan mgr inż. Michał Molas wykazał się znaczną wiedzą w zakresie tematyki poruszanej w rozprawie. Wykazał się także umiejętnością rozwiązywania problemów naukowych oraz prowadzenia samodzielnych badań.

Uważam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Michała Molasa pt.: **„Pomiary i analiza trajektorii iskry długiej dla potrzeb modelowania fraktalnego”** spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dziennik Ustaw z 2018r., poz. 1668 z późn. zm.). Tryb i warunki przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim określa Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. (Dz.U. poz. 261 z 30.01.2018r.). Wnoszę **o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Molasa do publicznej obrony.**


Krzysztof Siodła