

prof. dr hab. inż. Aleksandra Rakowska
Politechnika Poznańska
Instytut Elektroenergetyki
ul. Piotrowo 3A
60-965 Poznań
aleksandra.rakowska@put.poznan.pl
tel. kom 602 218 417

Poznań, 24.09.2024 r.

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 27.09.2024

Zarejestrowano pod nr 510-4-8/24

Podpis dm

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Mikruty
pt.: „Zastosowanie modelowania numerycznego dla analizy warunków
powstawania wylądowań niezupełnych w defektach układów izolacyjnych
wysokiego napięcia z uwzględnieniem wpływu wybranych czynników
fizykalnych i parametrów napięć probierczych”

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie – Pana dra hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH w Krakowie. Wykonanie recenzji powierzyła mi Rada Dyscypliny podjęta uchwałą na posiedzeniu w dniu 4 lipca 2024 r. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Paweł Zydróż, prof. AGH, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Józef Roehrich.

1. **Ogólna charakterystyka podjętej tematyki**

Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną prowadzi do coraz ostrzejszych wymogów stawianych dostawcom energii pod względem niezawodności i pewności zasilania. Wymagana jest jak najwyższa niezawodność działania wszystkich elementów systemu przesyłowego i dystrybucyjnego. Uszkodzenie elementu/elementów systemu przesyłowego lub dystrybucyjnego powoduje powstanie (nie przewidywanych wcześniej i nie zawsze uwzględnianych w kalkulacjach ekonomicznych) kosztów napraw realizowanych w trybie awaryjnym, a także kar z tytułu niedostarczonej odbiorcom energii elektrycznej. Coraz częściej używanym sformułowaniem wśród energetyków jest „bezpieczeństwo energetyczne”, które w szerszym znaczeniu obejmuje również niezawodne dostarczanie energii elektrycznej do odbiorców. Dlatego tak ważne, dla wszystkich urządzeń, aparatów i linii energetycznych jest zapewnienie właściwej technologii ich produkcji, prawidłowego doboru materiałów oraz prawidłowych procedur badań fabrycznych, odbiorczych i eksploatacyjnych dla zapewnienia długiego okresu niezawodnej eksploatacji wszelkich elementów, stanowiących nawet najdrobniejszą część systemu elektroenergetycznego. Ważne jest również przewidywanie i oszacowanie, gdzie mogą pojawić się najsłabsze punkty podczas eksploatacji tych urządzeń, aparatów czy linii elektroenergetycznych. Niestety jest to najczęściej

AR

ich układ izolacyjny. Zachodzące niekorzystne zjawiska czy występujące defekty w układzie izolacyjnym urządzeń, mogą wyraźnie skrócić czas życia tego układu – czyli w konsekwencji doprowadzić do awarii. Poza procesami starzeniowymi, związanymi z warunkami eksploatacyjnymi układu izolacyjnego, najczęstszą przyczyną powstawania uszkodzeń izolacji jest rozwój wyładowań niezupełnych. Długotrwałe ich działanie prowadzi do całkowitego uszkodzenia izolacji, w czasie krótszym lub dłuższym eksploatacji danego urządzenia – czasie zależnym od wielu czynników. Wyładowania niezupełne mogą rozwijać się na powierzchni danego układu izolacyjnego lub w jego wnętrzu. Wszelkie defekty we wnętrzu układu izolacyjnego w określonych warunkach prowadzą do inicjacji i rozwoju wyładowań niezupełnych, doprowadzając w konsekwencji do uszkodzenia izolacji.

Wyładowania niezupełne rozwijające się w różnych rodzajach izolacji elektrycznej od dziesiątek już lat są tematem bardzo wielu badań i nadal wiele ośrodków naukowo-badawczych na całym świecie zajmuje się tym tematem. Zachodzące niekorzystne zjawiska czy występujące defekty w układzie izolacyjnym urządzeń, a ogólnie elementów systemu elektroenergetycznego, mogą wyraźnie skrócić czas życia tego układu – czyli w konsekwencji doprowadzić do awarii. Potwierdza to, że jest to problem bardzo ważny i dlatego, tym bardziej, należy pokreślić wagę podjęcia przez Pawła Mikrutę nowego, ale bardzo ważnego tematu, dotyczącego oszacowania wpływu na wytrzymałość elektryczną określonych układów izolacyjnych zawierających różnego rodzaju wtrąciny gazowe, będące źródłem rozwoju wyładowań niezupełnych. Doktorant wykorzystał symulacje numeryczne i przeprowadził bardzo szeroką analizę warunków inicjacji i rozwoju wyładowań niezupełnych we wtrącinach gazowych w układach z dielektrykiem stałym, z uwzględnieniem kształtu, rozmiarów i lokalizacją tych wtrącin. Zbadał m.in. również wpływ różnych parametrów na rozwój ciągów impulsów wyładowań niezupełnych. Podkreślenia wymaga fakt, że wybrane modele układu izolacyjnego z wtrąciną gazową, analizowane w symulacji numerycznej Doktorant odtworzył również jako układy fizyczne i przeprowadził szerokie badania laboratoryjne w celu zweryfikowania otrzymanych wyników z symulacji. Nowatorskie analizy przeprowadzono także dla układów izolacji stałej eksploatowanej przy napięciu stałym, przyjmując jako obiekt symulacji numerycznej układ izolacji XLPE-DC elektroenergetycznego kabla HVDC dla różnych napięć znamionowych. Obiekt, dla którego przeprowadzono szerokie analizy, w układzie izolacyjnym także miał wtrąciny gazowe.

Wnikliwe odwzorowanie zjawisk i procesów fizycznych zachodzących we wtrącinach gazowych w badanych układach izolacyjnych przez Doktoranta jest osiągnięciem znaczącym i ważnym dla oszacowania wartości krytycznych rozmiarów wtrącin i jej położenia w izolacji stałej do powstania i rozwoju wyładowań niezupełnych w określonych warunkach.

Uwzględniając powyższe uważam, że podjęty przez Doktoranta temat rozprawy „Zastosowanie modelowania numerycznego dla analizy warunków powstawania wyładowań niepełnych w defektach układów izolacyjnych wysokiego napięcia z uwzględnieniem wpływu wybranych czynników fizykalnych i parametrów napięć probierczych” dotyczy aktualnych problemów i jest bardzo ważny ze względu na jego znaczenie poznawcze oraz w pełni naukowo-badawcze.

2. Zakres i najważniejsze osiągnięcia rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 224 strony, a w tym: 2 strony streszczenia (w j.polskim i j.angielskim), 2 strony spisu treści, 6 stron wykazu oznaczeń i skrótów, 167 stron tekstu zasadniczego, 26 stron załącznika (z wynikami symulacji oraz pomiarów wyładowań niepełnych przy napięciu AC) oraz 16 stron bibliografii. Praca składa się z siedmiu rozdziałów i rozdziału ósmego, stanowiącego podsumowanie całości oraz wnioski. Spis literatury to powołanie na 293 pozycji – w tym odnalazłam 8 pozycji, których współautorem jest Doktorant [43, 77, 193-195, 291-293].

Teza naukowa została sprecyzowana w rozdziale 1.2 na stronie 18 rozprawy i brzmi:

„Złożone modele polowe układów izolacyjnych z lokalnymi defektami pozwalają na odwzorowanie zjawisk i procesów fizykalnych zachodzących w inkluzjach gazowych, stanowiących źródła wyładowań niepełnych w dielektrykach stałych. Wykonane przy ich zastosowaniu symulacje numeryczne powstawania i rozwoju wnz mogą wspomagać interpretację wyników pomiaru wnz na modelach i obiektach fizycznych oraz zrozumienie przyczyn i efektów zjawisk fizycznych, zachodzących w ich źródłach.”

W rozprawie również sformułowano następujący cel rozprawy: *opracowanie i wdrożenie do celów badawczych zaawansowanego numerycznego modelu polowego, umożliwiającego wszechstronną analizę warunków powstawania i rozwoju wyładowań niepełnych w inkluzjach gazowych zlokalizowanych w dielektrykach stałych – modelu, który ma służyć jako narzędzie dla wspomagania analiz i interpretacji zjawisk zachodzących w defektach izolacji.*

Dla udowodnienia tezy oraz realizacji wymienionego celu Autor w rozprawie doktorskiej przeprowadził szeroki przegląd literatury tematycznej, a efekty własnej pracy naukowej przedstawił w kolejnych rozdziałach, a w rozdziale 8 zawarł podsumowanie swoich badań oraz sformułował wnioski.

We wstępie, czyli w rozdziale pierwszym, Doktorant wskazał dlaczego temat jest ważny i aktualny, a także jaka była motywacja podjęcia tego tematu oraz sformułował tezę i cel opracowania rozprawy oraz skrótowo opisał jej zakres. Drugi rozdział mgr inż. Paweł Mikrut poświęcił źródłom wyładowań niepełnych w układach elektroizolacyjnych różnych urządzeń oraz

linii elektroenergetycznych. Opisał również procesy starzeniowe i degradację układów izolacyjnych oraz efekty działania różnych czynników na stan i parametry tych układów. Skupił się również na przedstawieniu źródeł powstawania i rozwoju wyładowań niezupełnych (wnz), których źródłem są różnego rodzaju defekty w układzie izolacyjnym. Wśród różnych źródeł powstawania wnz szczególną uwagę skupiono w rozprawie na gazowych wtrącinach w izolacji stałej. Wtrąciny gazowe mogą powstawać na różnych „etapach życia” układu izolacyjnego – np. podczas procesu technologicznego przy produkcji danego urządzenia wysokiego napięcia (transformatorów, kabli itd.), w trakcie nieprawidłowych warunków podczas ich instalowania oraz w wyniku oddziaływania różnych czynników wywołujących rozwój procesów starzeniowych w izolacji. Defekty w izolacji kabli elektroenergetycznych – ich źródło i rozwój zostały przeanalizowane w tym rozdziale i omówione w szerszym zakresie.

Kolejny, trzeci rozdział poświęcono zjawiskom fizycznym zachodzącym podczas powstawania i rozwoju wyładowań niezupełnych w dielektrykach. Doktorant wnikliwie omówił takie zagadnienia jak: formy wyładowań niezupełnych, parametry charakteryzujące wnz (napięcie inicjacji i gaśnięcia wnz, tworzenie ładunku powierzchniowego, generacja elektronów inicjujących wyładowanie, prawdopodobieństwo wystąpienia wnz itp.). Opisano bardziej szczegółowo m.in. mechanizm jonizacji objętościowej we wtrącinach gazowych w dielektrykach stałych oraz wpływ różnych czynników na rozwój wnz w zależności od miejsca lokalizacji wtrąciny gazowej.

W rozdziale czwartym, który kończy wnikliwą, autorską analizę literatury tematycznej, Doktorant opisał kilka podstawowych rodzajów modelowania wyładowań niezupełnych, w tym model obwodowy, model dipolowy, numeryczne modele polowe, model przepływu plazmy oraz modele dla układów izolacyjnych napięcia stałego, ponieważ w ostatnich latach ta technologia do przesyłu energii elektrycznej jest coraz szerzej wykorzystywana.

W ocenianej rozprawie doktorskiej rozdział piąty rozpoczyna najważniejszą jej część, bo dotyczy już tylko autorskich wyników symulacji i analiz przeprowadzonych przez Doktoranta. W rozdziale tym przedstawiono rezultaty symulacji numerycznych rozkładu natężenia pola elektrycznego w układach modelowych. Analizowano jakie warunki prowadzą do rozwoju wnz we wtrącinie gazowej. W tym celu wyznaczono rozkłady potencjałów i natężenia pola dla różnych kształtów wtrąciny, jej rozmiarów i miejsca jej zlokalizowania w układzie izolacyjnym. Rozpatrywano zarówno przypadki pola jednorodnego w układzie izolacyjnym z elektrodami płaskimi, jaki i pola niejednorodnego. Jako obiekt w tym drugim przypadku, analizowano zjawiska mogące zachodzić we wtrącinie gazowej w układzie izolacyjnym wysokonapięciowego kabla z izolacją z polietylenu usieciowanego. W początkowym etapie realizacji rozprawy Doktorant zastosował do obliczeń numerycznych metodę elementów skończonych (MES) w programie

FEMM wersji 4.2. Autor rozprawy oszacował jednak ograniczenia tego programu, bardzo przydatnego do podstawowej analizy wpływu różnych czynników fizycznych na parametry wyładowań niezupełnych. Dlatego w dalszej części prowadzonych symulacji i analiz polowych Doktorant wykorzystywał program COMSOL Multiphysics w wersji 6.0. Natomiast do uzyskiwania obrazów fazowo-rozdzielczych wnz zastosował procedury realizowane w środowisku programu MATLAB R2021b, co było także zastosowane do przetwarzania i wizualizacji wyników symulacji. Doktorant analizował układ izolacyjny z defektem w postaci wewnętrznej inkluzji gazowej w jednorodnym polu elektrycznym, oceniając m.in. wpływ wartości napięcia probierczego na wartość natężenia pola elektrycznego we wnętrzu modelowej wtrąciny gazowej sferycznej, wpływ rozmiaru wtrąciny gazowej jej położenia w układzie izolacyjnym oraz wpływ przenikalności elektrycznej dielektryka stałego analizowanego układu izolacyjnego. Z analiz opracowanych przez Doktoranta wynika, że występuje charakterystyczny spadek wartości pola zarówno we wtrącinie, jak i w dielektryku, w obrębie górnej i dolnej powierzchni granicznej pomiędzy ośrodkami. Z kolei na ściankach bocznych można zauważyć wzrost wartości natężenia również w obu ośrodkach granicznych. Dla stosunkowo niewielkich wtrącin, rozkład natężenia pola w ich wnętrzu jest praktycznie równomierny. Z przeprowadzonych analiz rezultatów symulacji numerycznych wynika, że umiejscowienie wtrąciny pomiędzy elektrodami probierczymi w polu jednorodnym nie ma wpływu na wartość natężenia pola w jej wnętrzu, pod warunkiem, że wtrącina nie znajduje się w pobliżu jednej z elektrod. Analizowano także kształt wtrąciny i stwierdzono m.in., że wraz z rozciąganiem wtrąciny gazowej w kierunku zgodnym z liniami wytworzonego pola elektrycznego, natężenie pole w jej wnętrzu maleje. Natomiast w przypadku wtrąciny elipsoidalnej, której jedna z osi jest rozciągana w kierunku do elektrod, a jej rozmiar zbliża się do odległości pomiędzy elektrodami, natężenie pola w jej objętości jest bardziej równomierne, w stosunku do podobnej wielkości wtrącin sferycznych. Doktorant opisał także wyniki przeprowadzonych symulacji dla przypadków, gdy wtrącina gazowa znajduje się w układzie izolacyjnym w polu niejednorodnym – np. w układzie izolacyjnym kabla elektroenergetycznego napięcia przemiennego. Jako obiekt modelu przyjęto w tym przypadku jednofazowy kabel 64/110 kV o izolacji z polietylenu usieciowanego z żyłą roboczą o przekroju 150 mm^2 i przekroju żyły powrotnej 95 mm^2 (ekranu metalicznego). Dla przypadku pola niejednorodnego również oceniano wpływ wielkości wtrąciny i jej położenia, a także jej kształtu dla różnych kształtów i wymiarów elektrod. Warto dodać, że Doktorant wykonał również symulacje numeryczne dla 6 układów elektrod opisanych w normach IEC i ASTM, które to układy elektrod są zalecane do wykonywania badań wytrzymałości elektrycznej materiałów izolacyjnych. Celem tej części analiz wyników symulacji numerycznej w programie COMSOL Multiphysics było wyznaczenia maksymalnego wzmocnienia pola

elektrycznego, gdy wtrącinę gazowe znajdują się na krawędziach elektrod. Stwierdzono, że w takich przypadkach wtrącinę mogą być źródłem wnz przy napięciach znacznie niższych, jak wykazały wcześniejsze symulacje, niż gdy defekty typu wtrącinę gazowe są zlokalizowane wewnątrz próbki podanej działaniu jednorodnego pola elektrycznego.

Treść rozdziału szóstego rozprawy mgr inż. Pawła Mikruta uważam za szczególnie wartościową. W rozdziale tym opisano szczegółowo zaproponowany numeryczny model wyładowań niezupełnych w wewnętrznych wtrącinach gazowych, a do badań wybrano zdefiniowane geometrycznie i materiałowo modelowe układy izolacyjne, w których znajdują się defekty w postaci wtrącin gazowych, które w określonych warunkach stanowią źródło wnz.

Układy modelowe zostały zaimplementowane numerycznie w programie COMSOL Multiphysics, a co najważniejsze, zbudowano również ich dokładne odpowiedniki fizyczne, które poddane zostały badaniom laboratoryjnym. W tej części rozprawy szczegółowo przedstawiono przygotowanie modelu symulacyjnego, opisując dokonany wybór podstawowych parametrów jego środowiska numerycznego, jak i parametry symulacji oraz przyjętą geometrię układu modelowego. Określono także parametry dielektryczne materiałów i zdefiniowano warunki brzegowe dla elementów modelu i przedstawiono warunki sterowania procesem symulacji. Oczywiście określono także podstawowe parametry symulacji do modelowania wyładowań niezupełnych przy napięciu przemiennym. Znaczącą część tego rozdziału stanowią wyniki pomiarów na opracowanych przez Doktoranta modelach rzeczywistych układów izolacyjnych z wtrąciną gazową. Były to warstwowe układy izolacyjne, zawierające defekty w postaci płaskich i okrągłych wtrącin gazowych, o różnych średnicach i grubościach. Podkreślić należy opracowanie autorskie algorytmu, umożliwiającego symulację wyładowań niezupełnych we wtrącinie oraz uzyskanie obrazów fazowych i określenie podstawowych parametrów charakterystycznych dla danego modelu. Dokonano także fizycznego pomiaru parametrów charakteryzujących materiały użyte w badanych laboratoryjnie układach izolacyjnych i omówiono sposób rejestracji wnz. Obrazowo zaprezentowano wyniki zarówno symulacji, jak i pomiarów laboratoryjnych, a także porównanie tych wyników. W sposób bardzo czytelny zestawiono wyniki symulacji i pomiarów – nie tylko w postaci danych w tabelach, ale i w sposób graficzny. Porównano również m.in. przebiegi tego natężenia we wtrącinie w czasie, wielkość ładunku pozornego wyładowań oraz temperatury. Pełne wyniki symulacji oraz pomiarów wnz wraz z przetworzonymi lub zarejestrowanymi obrazami fazowo-rozdzielczymi zamieszczono w *Załączniku A*. Obszerna część rozdziału szóstego to szczegółowe porównanie wyników symulacji numerycznej z wynikami badań laboratoryjnych dla jednakowych modeli układu izolacyjnego z wtrąciną gazową. Porównaniu poddano wiele parametrów charakterystycznych dla badanych układów (przy napięciu o częstotliwości 20, 50 i 400 Hz): natężenie zapłonu wyładowań

niezpełnych, natężenie pola we wtrącinie, napięcie początkowe wyładowań, całkowity oraz średni i maksymalny ładunek pozorny wyładowań dla wtrąciny o różnych wymiarach, liczbę dodatnich i ujemnych oraz liczbę całkowitą impulsów dla różnych poziomów napięć i różnej częstotliwości, zakres fazowy oraz fazę początkową wyładowań.

Problemem analizowanym oraz opisanym przez mgr inż. Pawła Mikrutę w rozdziale siódmym rozprawy jest modelowanie w symulacji numerycznej wyładowań niezpełnych we wtrącinach gazowych w układach izolacyjnych napięcia stałego. Analizie poddano modele numeryczne trzech konstrukcji elektroenergetycznych kabli HVDC o izolacji XLPE-DC i napięciach znamionowych 150, 320 i 500 kV. Wiadomo, że w przypadku kabli prądu stałego rozkład natężenia pola elektrycznego w izolacji jest inny niż w przypadku kabli prądu przemiennego. Rozkład natężenia pola elektrycznego w kablach napięcia stałego jest zależny od przewodności materiału izolacyjnego oraz zmian temperatury powiązanej ze zmianą obciążalności kabla. Doktorant zaprezentował modele numeryczne do wyznaczania rozkładu pola elektrycznego oraz sekwencji czasowych wyładowań niezpełnych w kablach napięcia stałego. Symulację numeryczną przeprowadził za pomocą metody elementów skończonych, z wykorzystaniem środowiska COMSOL Multiphysics 6.0, co pozwoliło uwzględnić obecność pola elektrycznego, modyfikowanego wpływem pola temperatury w kablowej izolacji z polietylenu usieciowanego dla kabla nieobciążonego i obciążonego. Analizę przeprowadzono dla układu izolacyjnego bez defektów. Następnie porównano wyniki symulacji dla trzech modeli kabli – oceniając rozkład temperatury dla różnych temperatur żyły (odwzorowujących zmienność obciążalności kabla), zmianę przewodności elektrycznej oraz rozkład natężenia pola elektrycznego. W kolejnym etapie przeprowadzonych symulacji numerycznych założono zlokalizowanie dwóch wtrącin gazowych znajdujących się w pobliżu żyły kabla i w pobliżu uziemionego ekranu na izolacji. Pozwoliło to na przedstawienie wyników analizy wpływu położenia wewnętrznej wtrąciny gazowej w izolacji kabla na warunki powstawania wyładowań niezpełnych i sekwencji ich generacji. Symulację wykonano dla 5 różnych wartości temperatury żyły roboczej kabli wyznaczając natężenia pola elektrycznego we wtrącinach gazowych, średni ładunek wyładowań niezpełnych, średni czas pomiędzy impulsami wyładowań oraz natężenie zapłonu wnz dla określonej wtrąciny. Doktorant dodatkowo, wykorzystując Matlab oraz COMSOL, określił dla rozpatrywanych modeli kabli HVDC także sekwencje czasowe impulsów wnz. Do tej części analiz przyjęto podział przestrzeni izolacji na dwie strefy (bliżej żyły roboczej Strefa I i bliżej ekranu zewnętrznego Strefa II). Podsumowanie tej części analiz zostało przedstawione w sposób usystematyzowany w tabeli kończącej opisywany rozdział rozprawy. Zestawione w tabeli najważniejsze wnioski i zależności dotyczą warunków powstawania wyładowań niezpełnych we wtrącinach gazowych zlokalizowanych w izolacji kabla oraz odnoszą

się do charakterystyk generowanych sekwencji czasowych impulsów wznz w obu wyróżnionych strefach izolacji XLPE-DC kabla napięcia stałego.

W ósmym, ostatnim rozdziale rozprawy mgr inż. Paweł Mikruta zamieścił podsumowanie i wnioski, które potwierdzają, że postawiona przez Doktoranta teza została w pełni potwierdzona wynikami przeprowadzonych szerokich i wnikliwych symulacji numerycznych, które dla części badań zostały także potwierdzone wynikami badań laboratoryjnych. Ważną częścią tego rozdziału jest także wskazanie kierunków planowanych dalszych badań, w mojej opinii – wskazanych bardzo trafnie i konsekwentnie, w odniesieniu do szerokich badań i analiz dotychczas prowadzonych przez Doktoranta.

3. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

Uwagi dyskusyjne i szczegółowe przedstawiono poniżej.

1. W rozprawie odnoszono się do wpływu wartości przenikalności elektrycznej dielektryka stałego na kształtowanie natężenia pola elektrycznego we wtrącinie gazowej (Rozdział 5.2.2). Przepraszam, ale pozostaję przy tematyce kablowej: czy zastanawiano się jaka będzie wartość przenikalności gazu we wtrącinie – w zależności od tego jakie będzie źródło powstania tej wtrąciny (np. produkty uboczne procesu sieciowania, mechaniczne nadwyrężenie izolacji i spowodowanie pęknięć/rozwarstwień izolacji przy wadliwym instalowaniu kabla, rozkład materiału izolacyjnego w wyniku zjawisk starzeniowych, rozkład syciwa w izolacji papier+syciwo itp.). Czy można spodziewać się różnej wartości wytrzymałości elektrycznej w takiej wtrącinie gazowej czyli różnej odporności na inicjację wyładowań niezupełnych?
2. Zrozumiałe, że w rozprawie w rozdziale 5.3 przyjęto pewne uproszczenia w przyjętym obiekcie w symulacji numerycznej. W standardowej konstrukcji kabli elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć stosuje się bariery przeciwwilgociowe. Taśma blokująca wodę, umieszczona na ekranie półprzewodzącym, wytłoczonym na izolacji kabla, która z drugiej strony sąsiaduje z ekranem metalicznym (często nazywanym też żyłą powrotną) – musi charakteryzować się właściwościami półprzewodzącymi. Dodatkowo, jeżeli w konstrukcji kabla jest także uszczelnienie promieniowe w postaci obwoju np. folii aluminiowej, to pod nim musi znajdować się kolejna warstwa taśmy półprzewodzącej blokującej wodę. Czy obecność tych kolejnych warstw może w jakiś sposób wpływać na zjawiska zachodzące w analizowanym układzie izolacyjnym z wtrąciną gazową?

3. Czy w dalszych pracach badawczych będą rozpatrywane także oddziaływania wtrącin gazowych w formie szczelini, jakie tworzyć się mogą w kablowej izolacji warstwowej. Wiele obecnie transgranicznych morskich linii kablowych układanych jest nadal kablami z izolacją warstwową papier+syciwo. Są również przykłady kilku lądowych linii najwyższych napięć ułożonych kablami o izolacji warstwowej papier-folia polipropylenowa-papier we współpracy z olejem kablowym. Szczególnie przy niezachowaniu wszystkich wymagań obowiązujących przy układaniu takich kablów, a także w wynikach zachodzących zjawisk starzeniowych jest prawdopodobne postawienie tego typu szczelinowych wtrącin gazowych.
4. W rozprawie w układach modelowych rozpatrywano przypadki istnienia jednej lub dwóch wtrącin gazowych w danym układzie izolacyjnym. Pozostając przy kablach elektroenergetycznych, wydaje się, że technologia produkcji elektroenergetycznych kablów o izolacji wytłaczanej (a takie kable są instalowane od wielu już lat) i obligatoryjne badania fabryczne stosowane przez renomowane fabryki kablów powinny zapewniać spełnienie wymogów dotyczących uzyskania najwyższej jakości układu izolacyjnego produkowanych kablów. Gorzej jest np. z osprzętem kablowym, którego elementy wykonywane są podczas budowy linii kablowej w terenie, gdzie odtwarzanie układu izolacyjnego (np. w mufach kablowych przy łączeniu odcinków kabla) wykonuje się bezpośrednio podczas układania linii kablowej. Niestety, w izolacji wtrącin gazowych w promieniowym przekroju układu izolacyjnego, np. mufy, może być znacznie więcej – jak pokazały przykładowo wykonywane badania uszkodzonego osprzętu kablowego 110 kV. Czy Doktorant planuje w przyszłości podjąć się oceny elementów osprzętu kablowego – w częściowym zakresie jaki zastosowano w rozprawie?
5. Komentarz dyskusyjny: przyjęto w rozprawie do symulacji numerycznej w rozdziale 5.3 jako model rzeczywisty kabel 100 kV o przekroju żyły roboczej 150 mm². Trochę żałuję, że nie poddano ocenie model z kablem o żyły np. 1000 mm², bo w ostatnich latach zgodnie z wiadomościami o nowych liniach 110 kV z kablami o izolacji XLPE najczęściej stosowane są właśnie kable z takimi żyłami (TeleFonika Kable oferuje je już od 2004 roku).

Lista moich uwag dotyczących strony edycyjnej rozprawy jest bardzo krótka – przedstawiam je poniżej:

- lista przyjętych oznaczeń (co jest zrozumiałe) jest bardzo długa, może by warto było podzielić symbole na grupy i ustawić w kolejności alfabetycznej w tych przyjętych grupach tematycznych, co by znacznie ułatwiło poszukiwanie niektórych z nich;

- str. 151 – zakłócona została kolejność numeracji powoływania na poszczególne pozycje bibliografii.

Przedstawione w recenzji uwagi dyskusyjne w żadnym stopniu nie umniejszają mojej bardzo pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej, a zostały sformułowane jedynie w celu, aby je ewentualnie uwzględnić przy publikowaniu elementów rozprawy. Strona edycyjna opiniowanej rozprawy w mojej opinii jest poprawna. Stwierdzam, że rozprawa jest kompletna i nie wymaga jakichkolwiek zmian i uzupełnień.

4. Ocena rozprawy doktorskiej i dorobku naukowego Doktoranta

Stwierdzam, że mgr inż. Paweł Mikrut w swojej pracy wykazał pełne osiągnięcie założonego celu i **potwierdzenie postawionej tezy rozprawy**. Na wysokie uznanie zasługuje bardzo dobra umiejętność i łatwość posługiwania się przez Niego metodami symulacji numerycznej i opracowanie modeli do jej prowadzenia oraz opracowanie metodologii badań fizycznych modeli analizowanych układów izolacyjnych, przygotowanie stanowiska badawczego i przeprowadzenie czasochłonnych badań laboratoryjnych, potrzebnych do zweryfikowania przeprowadzonych symulacji numerycznych. Doktorant wykazał się także bardzo szerokim zasobem wiedzy z zakresu przedmiotu rozprawy i udowodnił, że potrafi poprawnie rozwiązywać problemy naukowe oraz logicznie, w sposób jasny i czytelny przedstawiać wyniki swoich badań – zarówno opisowo, jak i graficznie. Szczególnie treść zawarta w rozdziałach 5-7 w pełni potwierdza, że zaplanowane oraz wykonane tam założone zdania badawcze zostały w pełni zrealizowane, a ich wyniki potwierdzają ważne osiągnięcie naukowe Doktoranta. Wysoko oceniam także kilka tematów sformułowanych w rozdziale ósmym, które Doktorant planuje prowadzić w dalszych swoich badaniach naukowych z wykorzystaniem metod symulacyjnych do analizy powstawania i rozwoju wylądowań niezupełnych. Planowanie realizacji tych tematów, w mojej opinii, potwierdzają wysoki poziom wiedzy mgr inż. Pawła Mikruty dotyczącej tematyki wnz.

W związku z powyższym, z pełnym przekonaniem stwierdzam, że osiągnięcia naukowe mgr inż. Pawła Mikruta potwierdzają Jego kompetencje naukowo-badawcze oraz opanowanie szerokiej wiedzy w wymaganym zakresie i upoważniają do uzyskania stopnia naukowego doktora.

5. Wniosek końcowy

Recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Mikruta wykonano z uwzględnieniem spełnienia warunków stawianych rozprawom doktorskim, a określonych w *Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity ustawy Dz.U.2023 poz. 742 z 10 marca 2023)*, wg której: *Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych* – co zostało w opiniowanej rozprawie w pełni spełnione. Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska jest kompletna i nie wymaga żadnych zmian ani uzupełnień.

Uważam, że cel rozprawy pt. „**Zastosowanie modelowania numerycznego dla analizy warunków powstawania wyładowań niezupełnych w defektach układów izolacyjnych wysokiego napięcia z uwzględnieniem wpływu wybranych czynników fizykalnych i parametrów napięć probierczych**” został w pełni osiągnięty, a w trakcie realizacji rozprawy doktorskiej mgr inż. Paweł Mikrut wykazał się szerokim i głębokim zasobem wiedzy w wymaganym zakresie. Jak wykazano w rozprawie: **przyjęta teza została potwierdzona.**

Doktorant w pełni potwierdził umiejętność samodzielnego rozwiązywania problemów i udowodnił, że posiada pełne kwalifikacje do prowadzenia badań oraz analiz naukowych, a zagadnienia naukowe będące tematem rozprawy zrealizował w sposób oryginalny oraz przedstawił w sposób logiczny i jasny. Osiągnięciem naukowym mgr inż. Pawła Mikruty jest opracowanie oryginalnej metody oszacowania wpływu wtrącin gazowych i ich parametrów oraz lokalizacji na inicjację i rozwój wyładowań niezupełnych w różnych układach izolacyjnych z dielektrykiem stałym.

Zgodnie z dokonaną pozytywną i wysoką oceną recenzowanej rozprawy **stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Pawła Mikruta do publicznej obrony rozprawy doktorskiej w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.**

Dodatkowo, mając na uwadze wysoki poziom merytoryczny rozprawy, szeroki zakres przeprowadzonych badań symulacyjnych i pomiarów je weryfikujących, a także oryginalność uzyskanych zależności i sformułowanych na ich podstawie wniosków oraz fakt, że Doktorant jest także współautorem 8 publikacji wymienionych w rozprawie i autorem kilku wystąpień na konferencjach i sympozjach – wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.

