

prof. dr hab. inż. Tomasz BOCZAR
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Katedra Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej

Luboszyce, 8 sierpnia 2024

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 14.08.2024

Zarejestrowano pod nr 510-4-7/24

Podpis dm

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Mikruta
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”

Podstawa formalna wykonania recenzji:

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne dra hab. inż. Ryszarda Sroki, zgodnie z uchwałą w/w Rady podjętą na posiedzeniu w dniu 4 lipca 2024 r.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Paweł Zydroń, prof. AGH, a jej promotorem pomocniczym jest dr inż. Józef Roehrich.

1. Ocena aktualności tematu, cel i zakres rozprawy

Warunki konkurencyjności, jakie obowiązują na rynku energii elektrycznej, wymuszają na jej użytkownikach coraz większe wymagania dotyczące niezawodności działania aparatów i urządzeń wchodzących w skład poszczególnych elementów składowych systemu elektroenergetycznego. Ich prawidłowa praca stanowi podstawowy warunek zapewniania ciągłości dostaw energii elektrycznej. Natomiast potencjalne awarie powodują wymierne straty finansowe wynikające zarówno z kosztów ewentualnej naprawy urządzeń ale również z konieczności wypłaty adekwatnych odszkodowań odbiorcom za starty wywołane przerwą w dostawie energii elektrycznej. Istotnym aspektem jest również zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa jej użytkownikom, poprzez zmniejszenie ryzyka narażenia na porażenie prądem elektrycznym. Obecnie jedną z głównych przyczyn awarii urządzeń elektrycznych są uszkodzenia ich układów izolacyjnych wynikające z występowania wyładowań niezupełnych (WNZ), które oddziałując w dłuższym okresie czasu, powodują mikro-i makroskopowe zmiany strukturalne materiału izolacyjnego, co w konsekwencji może spowodować generację wyładowania zupełnego i zwarcie izolacji. Jednym z podstawowych źródeł WNZ są defekty wewnętrzne układów izolacyjnych, które mogą powstać zarówno na etapie produkcji lub montażu urządzeń ale także podczas ich długoletniej eksploatacji, jako efekt zachodzących procesów starzeniowych. Dodatkowo, należy mieć na uwadze, że podczas pracy układów izolacyjnych poddawane są one negatywnemu oddziaływaniu szeregu

czynników o charakterze elektrycznym, cieplnym, mechanicznym, itp., czego efektem może być znaczne pogorszenie, a nawet utrata ich własności izolacyjnych.

Pomimo wieloletnich prac realizowanych przez liczne światowe ośrodki naukowe i instytucje badawcze, uzyskanie długoletniej i bezawaryjnej pracy tych układów stanowi nadal jeden z podstawowych wyzwań oraz problemów technicznych stawianych współcześnie do rozwiązania. Przy czym, prowadzone badania dotyczą zarówno możliwości zastosowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałów izolacyjnych, jak również związane są doskonaleniem metod diagnostycznych wykorzystywanych do wykrywania i rozpoznawania typu występujących w układach izolacyjnych defektów, w tym również takich, które związane są z generacją WNZ.

W ostatnich latach, wraz z rozwojem szeroko pojętej techniki komputerowej oraz technologii informatycznej, prace naukowe skupione dotychczas głównie na badaniach eksperymentalnych realizowanych w specjalistycznych laboratoriach wysokonapięciowych z wykorzystaniem wiedzy teoretycznej, są uzupełniane i coraz częściej zastępowane poprzez wykonywanie zaawansowanych analiz polowo-obwodowych z zastosowaniem modelowania numerycznego zaimplementowanego za pomocą specjalistycznych programów do obliczeń symulacyjnych. Wielu naukowców i zespołów badawczych podejmuje próby wykorzystania zaawansowanych narzędzi symulacyjnych do numerycznego modelowania zachodzących podczas generacji WNZ procesów, ze względu na złożoność i możliwość jednoczesnego występowania szeregu zjawisk fizycznych towarzyszących ich powstawaniu, mających wpływ na ich rozwój, a także ich stochastyczny charakter oraz możliwość równoczesnego występowania w rzeczywistych układach izolacyjnych różnych typów defektów, zarówno pojedynczych, jak również wielokrotnych. Przy dokładnym odwzorowaniu zachodzących procesów istnieje możliwość określenia warunków powstawania i rozwoju WNZ w różnego typu defektach, uwzględniając ich wzajemne konfiguracje, własności i zróżnicowaną aktywność. Ponadto, poprzez symulacyjne wyznaczenie spodziewanych wartości parametrów charakteryzujących WNZ można określić potencjalne zagrożenie analizowanej izolacji, zwiększając prawdopodobieństwo wykonania prawidłowej diagnozy rozpatrywanego układu izolacyjnego. Tym samym eliminuje to konieczność wykonywania adekwatnych czasochłonnych i kosztownych badań laboratoryjnych przy wykorzystaniu fizycznych obiektów modelowych, a także obliczenie parametrów opisujących WNZ, których wyznaczenie na drodze pomiarowej jest utrudnione, a w niektórych przypadkach niemożliwe.

Zagadnieniom tym poświęcona jest tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Mikruta. Jej głównym celem było wykonanie kompleksowej analizy warunków generacji i rozwoju WNZ w inkluzjach gazowych zlokalizowanych w dielektryku stałym przy zastosowaniu modelowania numerycznego, uwzględniając przy tym złożoność zjawisk fizycznych towarzyszących ich powstawaniu. Zakres zrealizowanych prac badawczych obejmował modelowanie sferycznych, elipsoidalnych i cylindrycznych inkluzji gazowych o różnych rozmiarach i lokalizacjach w układach izolacyjnych o jednorodnym oraz niejednorodnym rozkładzie pola elektrycznego, przy wykorzystaniu programu Comsol Multiphysics. Badania dotyczyły określenia wpływu wybranych parametrów fizycznych oraz wartości napięcia probierczego na generowane w rozpatrywanych defektach ciągi impulsów WNZ. Uzyskane wyniki symulacji numerycznych zostały zweryfikowane poprzez pomiary laboratoryjne wykonane na opracowanych i wykonanych modelach fizycznych warstwowych układów izolacyjnych z inkluzją gazową o określonej geometrii, zlokalizowanej w dielektryku stałym, umieszczonym w układzie płaskim elektrod, przy zasilaniu napięciem przemiennym. Zakres przeprowadzonych badań dotyczył również przeprowadzenia symulacji elektro-termicznych w celu określenia warunków generacji WNZ w defektach w postaci sferycznej wtrąciny gazowej w kablach napięcia stałego HVDC z izolacją XLPE. Na podstawie uzyskanych zależności, dla każdego z trzech analizowanych kabli, o różnych

wartościach napięć znamionowych, zostały oszacowane wartości krytyczne rozmiarów inkluzji gazowych, których przekroczenie powoduje powstanie w ich obszarze WNZ.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że prezentowane w rozprawie wyniki zostały również zaprezentowane w ośmiu artykułach naukowych i referatach konferencyjnych, w tym trzech indeksowanych w bazie Web of Science, których Doktorant jest współautorem.

Podsumowując, podjęta w rozprawie problematyka jest aktualna, ważna merytorycznie, ma duże znaczenie naukowe i poznawcze, a uzyskane rezultaty i opracowana metodyka modelowania numerycznego mają w mojej ocenie potencjalne możliwości technicznej implementacji w szeroko rozumianej diagnostyce układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych wykonywanej przy zastosowaniu metody elektrycznej

2. Charakterystyka rozprawy

Przedłożona rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Mikruta jest stosunkowo obszerna ponieważ liczy 224 strony zwartego tekstu. Składa się z ośmiu rozdziałów głównych obejmujących 165 stron, streszczeń w języku polskim i angielskim, wykazu wykorzystanych w pracy oznaczeń i skrótów, jednego załącznika oraz spisu literatury zawierającego 293 pozycje, w tym 8, których Doktorant jest współautorem (poz. 43, 77, 193-5, 291-3). Bibliografia jest usystematyzowana poprzez posortowanie alfabetyczne, jest aktualna, została przygotowana rzetelnie, zarówno pod względem merytorycznym, jak również redakcyjnym. Na podkreślenie zasługuje jednolity sposób opisu poszczególnych cytowań i ich przytaczania w tekście rozprawy.

Rozdział **pierwszy** stanowi ogólne wprowadzenie do zaproponowanej w rozprawie tematyki, w którym Doktorant przedstawił aktualne kierunki badań prowadzonych w obszarze szeroko rozumianej problematyki WNZ, jakie mogą występować w wysokonapięciowych układach izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. Ponadto w sposób syntetyczny uzasadnił wybór podjętej problematyki, a także przedstawił genezę i określił cel zrealizowanych w ramach rozprawy doktorskiej prac naukowo-badawczych. W oparciu o założony cel Doktorant w rozdz. 1.1 sformułował tezę swojej rozprawy, która jest następująca:

„Złożone modele polowe układów izolacyjnych z lokalnymi defektami pozwalają na odwzorowanie zjawisk i procesów fizykalnych zachodzących w inkluzjach gazowych, stanowiących źródła wyładowań niezupełnych 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 moim przekonaniu Doktorant prawidłowo i w sposób przemyślany sformułował tezę rozprawy, którą konsekwentnie, w logicznym ciągu pracy udowodnił.

Dyskusyjne pod kątem kryterialnym może być użycie sformułowania „złożone modele polowe”. Podobnie, jak rozróżnienie między zjawiskami i procesami fizykalnymi, w szczególności, że w drugiej części tezy Doktorant odnosi się tylko do „efektów zjawisk fizycznych”. Ponadto, w założonej tezie, jak również w teście rozprawy, brak jest konsekwencji w stosowaniu skrótów: „wyładowania niezupełne”, stosowany jest również skrót PD (ang. Partial Discharges). Uważam też, że mamy jednak do czynienia z jedną spójną pod względem logicznym tezą, a nie jak sugeruje tytuł rozdziału tezami. Chciałbym podkreślić, że moje uwagi nie wpływają na właściwy dla rozpraw doktorskich poziom naukowy założonej przez Doktoranta tezy.

W oparciu o przyjęty cel oraz sformułowaną tezę rozprawy w rozdz. 1.3 został określony zakres pracy, który przypisano do kolejnych rozdziałów rozprawy.

Rozdział **drugi** ma charakter teoretyczny i zawiera ogólną charakterystykę materiałów, jakie są współcześnie wykorzystywane w wysokonapięciowych układach izolacyjnych linii i urządzeń elektroenergetycznych. W oparciu o doniesienia literaturowe Doktorant dokonał syntetycznej klasyfikacji procesów starzeniowych i zmian degradacyjnych, które mogą wpływać na stan i parametry ich pracy. Ponadto, w rozdz. 2.3 zaprezentowano definicję, a następnie sklasyfikowano podstawowe formy WNZ, przypisując im rzeczywiste źródła generacji, odpowiednio w izolacji stałej, ciekłej i gazowej. Dodatkowo, przedstawiono typowe rodzaje defektów, sklasyfikowane w postaci macierzy defektów, które mogą potencjalnie występować w układach izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych, stanowiących bezpośrednią przyczynę powstawania WNZ. W tym zakresie główną uwagę poświęcono problematyce inkluzji gazowych, jako jednego z najczęściej występujących defektów w dielektrykach stałych wysokonapięciowych układów izolacyjnych. W szczególności rozważano defekty, jakie mogą powstawać w izolacji kabli elektroenergetycznych, zarówno na etapie procesu produkcyjnego, w wyniku ich niewłaściwej instalacji, jak również wywołanych zewnętrznymi czynnikami fizykochemicznymi występującymi podczas ich eksploatacji. Dodatkowo, w sposób syntetyczny zostały scharakteryzowane defekty, które mogą występować w układach izolacyjnych uzwojeń maszyn elektrycznych z uwzględnieniem wartości napięć znamionowych oraz w izolatorach wykonanych z materiałów ceramicznych.

Rozdział **trzeci** stanowi teoretyczne wprowadzenie do zagadnień związanych z opisem zjawisk fizycznych warunkujących proces powstawania i rozwoju WNZ w dielektrykach. W kolejnych podrozdziałach scharakteryzowano warunki oraz związane z nimi kryteria i zależności fizyczne niezbędne do zainicjowania oraz odpowiednio wygaszania WNZ, zwracając przy tym uwagę na stochastyczny charakter analizowanych zjawisk. Ponadto, Doktorant opisał mechanizm oraz metody modelowania procesu relokacji ładunku powierzchniowego po wtrącenie gazowej zamkniętej w dielektryku stałym bezpośrednio po wystąpieniu WNZ. Wskazano również czynniki, które mogą mieć wpływ na wartość natężenia pola elektrycznego, jakie występuje podczas tego procesu.

Rozdział **czwarty** ma charakter przeglądowy, w którym Doktorant w sposób ogólny przedstawił wykorzystywane obecnie metody umożliwiające modelowanie zjawisk zachodzących podczas generacji WNZ w wewnętrznych inkluzjach gazowych zlokalizowanych w dielektryku. W szczególności zostało opisanych pięć modeli, jakie stosuje się do analiz związanych z powstawaniem tego typu WNZ. Zwrócono przy tym uwagę na różnice w modelowaniu wyładowań przy napięciu stałym i przemiennym.

Rozdziały od **drugiego** do **czwartego**, które stanowią teoretyczne wprowadzenie do problematyki podjętej w rozprawie doktorskiej obejmują 43 strony zwartego testu, co stanowi 19% procent jej objętości.

W rozdziale **piątym** przedstawiono rezultaty przeprowadzonych symulacji numerycznych rozkładu potencjału i natężenia pola elektrycznego w wybranych przez Doktoranta modelach układów izolacyjnych z wewnętrznym defektem w postaci wtrąciny gazowej umieszczonej we wnętrzu jednorodnego dielektryka. Zakres przeprowadzonych badań obejmował określenie wpływu zmian wartości napięcia probierczego (rozdz. 5.2.1), a także przenikalności elektrycznej izolacji (rozdz. 5.2.2) na wartość natężenia pola elektrycznego, zarówno w rozpatrywanym defekcie, jak również w dielektryku stałym otaczającym inkluzję gazową. Ponadto, w ramach przeprowadzonych symulacji zbadano, dla układu izolacyjnego o polu jednorodnym (płaski układ elektrod), wpływ zmian średnicy sferycznej inkluzji gazowej (rozdz. 5.2.3) oraz jej położenia względem elektrod (rozdz. 5.2.4), a także kształtu defektu, tj. wtrącina elipsoidalna odpowiednio o wydłużonej (rozdz. 5.2.5) i

spłaszczonym kształcie (rozdz. 5.2.6), na wartość i rozkład natężenia pola elektrycznego. Analogiczne symulacje numeryczne zostały wykonane dla układu izolacyjnego z niejednorodnym polem elektrycznym. W tym przypadku do analiz wybrano pole koncentryczne, wytworzone w układzie izolacyjnym kabla elektroenergetycznego napięcia przemiennego. Przy czym, wykonano uproszczony model numeryczny rzeczywistego 1-fazowego kabla elektroenergetycznego XRUHAKXS $1 \times 150/95 \text{ mm}^2$, 110/64 kV (TELEFONIKA Kable S.A.). W pierwszym kroku wyznaczono rozkład potencjału elektrycznego dla rozpatrywanego modelu z gazową wtrąciną sferyczną (rozdz. 5.3). Następnie zaprezentowano wyniki analiz wpływu zmian średnicy inkluzji sferycznej umieszczonej centralnie w izolacji kabla (rozdz. 5.3.1) oraz zmieniając jej położenie wzdłuż osi x na promieniu jego izolacji (rozdz. 5.3.2), na wartość i rozkład natężenia pola elektrycznego. W tym zakresie analizowano także zmiany kształtu defektu, tj. wtrącina elipsoidalna (rozdz. 5.3.3). Dodatkowo, w rozdz. 5.3 Doktorant przeprowadził symulacje numeryczne w celu wyznaczenia wartości i rozkładu natężenia pola elektrycznego dla sześciu układów elektrod opisanych w normach IEC oraz ASTM, które są dedykowane do badań wytrzymałości elektrycznej materiałów izolacyjnych. Przy czym, szczególną uwagę zwrócono na efekt wzmocnienia natężenia pola elektrycznego na krawędziach rozpatrywanych elektrod i jego wpływ na badane układy izolacyjne z modelowanymi defektami.

W rozdziale **szóstym** przedstawiono wyniki badań porównawczych WNZ generowanych w inkluzjach gazowych w dielektryku stałym, przy napięciu przemiennym, uzyskane w zamodelowanych układach izolacyjnych, podczas pomiarów przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych, z rezultatami otrzymanymi jako efekt symulacji numerycznych zrealizowanych przy zastosowaniu programów COMSOL Multiphysics i Matlab R2021b. Do weryfikacji eksperymentalnej rezultatów modelowania wybrano układ izolacyjny złożony z sześciu warstw folii polietylenowej, wewnątrz których zlokalizowano płaską okrągłą wtrącinę gazową, które następnie wprowadzono między dwoma szklanymi płytami. Tak wykonany model izolacyjny został umieszczony w jednorodnym polu elektrycznym wytworzonym przez płaski układ elektrod. Doktorant przygotował sześć fizycznych próbek modelujących defekt układu izolacyjnego o trzech różnych średnicach i dwóch grubościach inkluzji gazowej. W rozdz. 6.2 został zaprezentowany sposób przygotowania modelu numerycznego WNZ generowanych w wtrącinie gazowej, który został wykorzystany podczas symulacji. Ponadto, przedstawiono opracowany przez Doktoranta algorytm umożliwiający symulację WNZ w dziedzinie czasu, który pozwala na wyznaczenie ich obrazów fazowo-rozdzielczych ϕ -q-n oraz parametrów charakterystycznych, które zostały wykorzystane do analizy porównawczej z adekwatnymi wynikami otrzymanymi podczas badań laboratoryjnych. Przy czym, dla potrzeb tworzonego modelu numerycznego, a w szczególności konieczności zadeklarowania wartości parametrów dielektrycznych zastosowanych materiałów, Doktorant wykonał pomiary względnej przenikalności elektrycznej, współczynnika strat dielektrycznych oraz rezystywności skróśnej wykorzystanych w układzie fizycznym dielektryków stałych (rozdz. 6.2.4). W rozdz. 6.3 scharakteryzowano kolejno: sposób rejestracji impulsów WNZ i tworzenia ich obrazów fazowo-rozdzielczych, zastosowany podczas badań laboratoryjnych układ pomiarowy oraz wykonane modele warstwowych układów izolacyjnych z defektem w postaci inkluzji gazowej o różnych średnicach i grubościach. W rozdz. 6.4 przedstawiono wyniki uzyskane dla modelu numerycznego, prezentując obliczone rozkłady natężenia pola elektrycznego dla sześciu badanych przypadków, a także przebiegi czasowe: natężenia pola we wtrącinie, ładunku pozornego wyładowania oraz temperatury w zadeklarowanej inkluzji, które zostały uzyskane dla WNZ przykładowo dla jednego wybranego układu modelowego. Dodatkowo, zilustrowano rozkłady natężenia pola elektrycznego, gęstości ładunku w obszarze powierzchni granicznych oraz temperatury, oddzielnie dla chwili przed i odpowiednio

bezpośrednio po wybranym impulsie WNZ, dla jednego przypadku modelowanej wtrąciny gazowej. Rozdz. 6.5 zawiera rezultaty analizy porównawczej wyników przeprowadzonych symulacji numerycznych i pomiarów laboratoryjnych, którą przeprowadzono w oparciu o wybrane parametry charakteryzujące wyładowania, wyznaczone na podstawie otrzymanych obrazów fazowo-rozdzielczych. Przy czym, w rozdziale tym przedstawiono wybrane, reprezentatywne rezultaty natomiast pełne zestawienie dla pozostałych rozpatrywanych przypadków zostało zaprezentowane w Załączniku A. W oparciu o uzyskane zależności Doktorant sformułował wnioski dotyczące wpływu wielkości powierzchni inkluzji gazowej na przebieg procesów powstawania WNZ oraz liczbę i analizowane parametry rejestrowanych impulsów.

W rozdziale **siódmym** zestawiono wyniki badań symulacyjnych dotyczących modelowania sferycznych inkluzji gazowych w modelach kabli elektroenergetycznych napięcia stałego HVDC z izolacją XLPE. W szczególności zaprezentowano wyniki analizy wpływu położenia wewnętrznej wtrąciny gazowej w rozpatrywanej izolacji na warunki powstawania i rozwoju WNZ. Mając na uwadze specyfikę izolacji kabli prądu stałego w symulacjach numerycznych zaimplementowanych w środowisku COMSOL Multiphysics 6.0, przy ocenie wpływu na przewodność elektryczną materiału izolacyjnego obciążonego i nieobciążonego kabla HVDC, uwzględniono występowanie w izolacji XLPE pola elektrycznego modyfikowanego zmianami temperatury. W rozdz. 7.3 Doktorant scharakteryzował rozpatrywane modele numeryczne trzech konstrukcji kabli HVDC o izolacji XLPE o napięciach znamionowych wynoszących odpowiednio: 150, 320 i 500 kV oraz zdefiniował założone dla potrzeb symulacji parametry. W rozdz. 7.4 przedstawiono w formie wykresów wyniki analizy warunków generacji WNZ w zadanych inkluzjach gazowych w izolacji trzech modelowanych kabli. W tym zakresie zobrazowano, wyznaczone dla izolacji bez defektów, rozkłady: temperatury, przewodności elektrycznej, natężenia pola elektrycznego, które zilustrowano oddzielnie dla każdego z trzech symulowanych modeli kabla. Następnie zaprezentowano rozkłady pola elektrycznego, które wyznaczono wzdłuż promienia, osobno dla trzech modelowanych kabli, w izolacji których zostały umieszczone dwie kuliste wtrąciny gazowe, o zdanych rozmiarach i położeniu. Przy czym, rozkłady w celach porównawczych zostały wyznaczone dla pięciu wartości temperatury żył danego kabla. W kolejnym etapie zostały obliczone dwuwymiarowe rozkłady natężenia pola elektrycznego w izolacji każdego z badanych kabli dla obszarów, w których zostały zlokalizowane dwie zadane inkluzje gazowe. W konsekwencji zostały wyznaczone zależności natężenia zapłonu WNZ w funkcji położenia inkluzji gazowej, oddzielnie dla każdego z trzech kabli, porównawczo dla pięciu wartości temperatury ich żył. W ostatnim kroku, w oparciu o przygotowaną przez Doktoranta procedurę numeryczną zaimplementowaną w środowisku Matlab zostały zasymulowane sekwencje czasowe impulsów WNZ generowanych niezależnie w obu zadeklarowanych wtrącinach gazowych, oddzielnie dla każdego z kabli i pięciu wartości temperatury ich żył. Obliczono, przy tym wartości dwóch parametrów charakteryzujących zamodelowane wyładowania niezupełne przy napięciu stałym, tj.: ich średni ładunek oraz średni czas pomiędzy kolejnymi impulsami. W oparciu o uzyskane wyniki, Doktorant dla każdego z badanych kabli oszacował krytyczne średnice wtrącin gazowych, których przekroczenie powoduje, że dana inkluzja może być źródłem WNZ. Uzyskane w tym zakresie wyniki zostały przedstawione w rozdz. 7.5.

Na podstawie zaprezentowanych w rozprawie wyników Doktorant sformułował wnioski zarówno o charakterze szczegółowym, jak i ogólnym, które przedstawił w rozdziale **ósmym**. Stanowią one potwierdzenie założonej w rozprawie tezy. Ponadto, w sposób ogólny określił propozycje czterech kierunków kontynuacji zapoczątkowanych w doktoracie prac naukowo-badawczych.

Część wynikowa rozprawy została uzupełniona o **Załącznik A**, w którym przedstawiono rezultaty przeprowadzonych symulacji numerycznych WNZ generowanych w analizowanych defektach oraz ich pomiarów wykonanych w warunkach laboratoryjnych, dla napięcia przemiennego.

Zaproponowany układ pracy jest czytelny, a kolejne rozdziały tworzą logiczną całość.

Za najważniejsze w rozprawie uważam rozdziały: **5, 6, 7**, w których zostały przedstawione wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych oraz ich weryfikacja pomiarowa.

Reasumując, podjęte w rozprawie zagadnienia zostały sprecyzowane jednoznacznie i w mojej ocenie mają rangę naukową odpowiadającą rozprawom doktorskim.

3. Główne osiągnięcia rozprawy

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam:

- przeprowadzenie w sposób rzetelny oraz wyczerpujący szczegółowej analizy doniesień literaturowych, głównie w oparciu o publikacje zagraniczne i na podstawie jej wyników dokonanie syntetycznej oceny aktualnego stanu wiedzy dotyczącego poruszanej w rozprawie tematyki;
- wyznaczenie na podstawie symulacji numerycznych rozkładów natężenia pola elektrycznego i zbadanie wpływu na uzyskane zależności szeregu parametrów dla dwóch zamodelowanych układów izolacyjnych z wewnętrznym defektem w postaci wtrąciny gazowej, tj.: z równoległymi elektrodami płaskimi i polem jednorodnym oraz elektrodami koncentrycznych odwzorowującymi niejednorodne pole elektryczne występujące w izolacji kabli prądu przemiennego;
- określenie, w oparciu o wyniki symulacji numerycznych, wpływu wzmocnienia natężenia pola elektrycznego na krawędziach sześciu różnych układów elektrod zgodnych z wytycznymi norm IEC i ASTM, na warunki polowe w modelowanych układach izolacyjnych z zadanymi defektami;
- zaprojektowanie i praktyczne wykonanie sześciu modelowych układów izolacyjnych z inkluzją gazową oraz zbadanie ich własności dielektrycznych;
- zaplanowanie i przeprowadzenia pomiarów WNZ w przygotowanych układach modelujących defekty w Laboratorium Wysokich Napięć Katedry Elektrotechniki i Elektroenergetyki w celu weryfikacji rezultatów uzyskanych przy zastosowaniu symulacji numerycznych;
- wykazanie, na podstawie rezultatów analizy porównawczej wyznaczonych obrazów fazowo-rozdzielczych ϕ -q-n i parametrów je charakteryzujących, poprawności opracowanego modelu numerycznego, odzwierciedlającego sześć rzeczywistych izolacji oraz zakresu jego praktycznej przydatności do interpretacji wyników pomiarów WNZ oraz analizy zjawisk fizycznych towarzyszących ich generacji w wysokonapięciowych układach izolacyjnych;
- przeprowadzenie kompleksowych badań symulacyjnych, warunków generacji WNZ, z uwzględnieniem rozkładów pola elektrycznego i temperatury, dla opracowanych modeli numerycznych trzech konstrukcji kabli HVDC z izolacją z polietylenu sieciowanego XLPE o napięciach znamionowych: 150, 320 i 500 kV oraz zadanym defektem w postaci sferycznej inkluzji gazowej, porównawczo w stanie bez i pod obciążeniem;

- oszacowanie, na podstawie wyników przeprowadzonych symulacji elektrotermicznych, zaimplementowanych w programie COMSOL Multiphysics, krytycznego rozmiaru sferycznych inkluzji gazowych, przy których istnieje ryzyko zainicjowania i rozwoju WNZ, w zależności od ich położenia na promieniu kabla HVDC z izolacją XLPE;
- ocena możliwości i zakresu praktycznego wykorzystania podczas pomiarów diagnostycznych zaproponowanych procedur modelowania numerycznego do analizy wpływu szeregu czynników fizykalnych oraz wartości napięcia probierczego na warunki powstawania i rozwój WNZ generowanych w inkluzjach gazowych w dielektrykach stałych.

W moim przekonaniu, przedstawione wyżej osiągnięcia Doktoranta uzasadniają Jego kompetencje naukowe i rekomendują Jego do stopnia naukowego doktora.

4. Uwagi do rozprawy

Uwagi i zastrzeżenia dotyczące ocenianej rozprawy podzieliłem na dwie grupy:

- uwagi merytoryczne,
- uwagi redakcyjne.

4.1 Uwagi merytoryczne

1. Wykonując model numeryczny rzeczywistego kabla elektroenergetycznego XRUHAKXS $1 \times 150/95$ mm², 110/64 kV (TELE-FONIKA Kable S.A.) przyjęto szereg uproszczeń, które zostały opisane na str. 92 w rozdz. 5.3 dysertacji. Czy zdaniem Doktoranta nie będą one wpływać na uzyskiwane wyniki? Ponadto, modelowane w rozdz. 7 kable prądu stałego HVDC z izolacją XLPE są jednożyłowe i mają stosunkowo prostą budowę, jak Doktorant ocenia możliwości praktycznego zastosowania i przydatność zaproponowanego podejścia do analizy WNZ, jakie mogą występować w izolacji kabli wielożyłowych o złożonej, wielowarstwowej konstrukcji, jak na przykład w przypadku kabli podmorskich prądu stałego?

2. Doktorant badał wpływ jednego typu defektu, występującego pojedynczo lub w lokalizacjach dla izolacji kablowej, jak zdaniem Doktoranta wyglądałaby sytuacja w przypadku występowania ich większej liczby i dodatkowo o różnych kształtach i w różnych konfiguracjach względem siebie oraz elektrod i związana z tym praktyczna przydatność opracowanych modeli i procedur symulacji numerycznych?

3. W dysertacji brak jest opisu błędów i niedokładności pomiarów, wynikających z zastosowanej metody i układu pomiarowego, które mogą mieć wpływ na właściwą ocenę badanych zjawisk. Jeżeli nie było możliwe przeprowadzenie wystarczającej liczby pomiarów tak, aby określić rozkład gęstości prawdopodobieństwa, odchylenie standardowe lub inny parametr wyznaczony metodą typu A, to należało wykorzystać dane podawane w specyfikacji przyrządów pomiarowych. Jak zatem należałoby oszacować czułość i dokładność przeprowadzonych pomiarów?

4. W rozdz. 5.2.3, podczas symulacji defektu w postaci inkluzji gazowej zmieniono jej średnicę w zakresie od 0.5 do 2,5 mm, czy Doktorant ma wiedzę dotyczącą możliwych i najczęściej występujących defektów tego typu w układach izolacyjnych i czy w przyjętych modelach została zachowana skala proporcji rozmiarów geometrycznych wtrąciny względem modelowanych układów izolacyjnych oraz ich wzajemnego położenia?

5. W oparciu o jakie kryterium została ustalona wartość przenikalności elektrycznej względnej dielektryka stałego otaczającego inkluzję gazową – str. 75 (zmiana od

1,3 do 10) ? Ponadto, w przeprowadzonych symulacjach założono inkluzję wypełnioną powietrzem. Czy Doktorant badał wpływ zmian przenikalności elektrycznej defektu, analogicznie jak dla dielektryku stałego ? Czy byłby to wpływ znaczący i czy wartość 1 jest typowa dla tego typu rzeczywistych defektów ?

6. Dla potrzeb przeprowadzenia analizy porównawczej wyników uzyskanych podczas symulacji numerycznych i pomiarów laboratoryjnych Doktorant w rozdz. 6 opisał wykonane układy izolacyjne z zadaniem defektem. Mając na uwadze stochastyczny charakter zjawisk związanych z generacją WNZ czy została zbadana, z zastosowaniem metod wnioskowania statystycznego, powtarzalność uzyskiwanych rezultatów ? Ponadto, czy Doktorant rozpatrywał ich odtwarzalność, co wymagało by z kolei wykonania co najmniej kilku identycznych układów modelujących zadany defekt ? Jednocześnie czy brane były pod uwagę czynniki metrologiczne, które powtarzalność i odpowiednio odtwarzalność mogą zakłócać ?

7. W zależności 3.24 (str. 52) umożliwiającej wyznaczenie prawdopodobieństwo pojawienia się elektronów swobodnych, którą Doktorant wykorzystuje w procedurze opisanej na str. 113 oraz zilustrowanej na Rys. 6.2 (str. 112) występuje parametr określony jako statystyczny czas opóźnienia zapłonu τ_{lag} wyrażony w sekundach, proszę o komentarz dotyczący sposobu jego wyznaczania.

8. W rozdz. 6.5 Doktorant, przeprowadzając analizę porównawczą wyników symulacji z rezultatami pomiarów stwierdził m.in. : „... Zgodność wyników symulacyjnych i pomiarowych dla tego parametru jest zadowalająca. ...”; „... charakteryzują się lepszą zbieżnością ...” (str. 149); „... wyraźnie odbiega od tendencji obserwowanych ...” (str. 149); „... otrzymane na podstawie modelu symulacyjnego posiadają dobrą zgodność jakościową oraz zadowalającą zgodność ilościową z wynikami pomiarowymi ...” (str. 179). co wydaje się mało precyzyjnymi sformułowaniami z technicznego punktu widzenia. Czy w związku z tym Doktorant rozważał zastosowanie wskaźników statystyk opisowych, jako miar tej zgodności ?

9. Na str. 89 Doktorant stwierdził, że: „... Wyniki te wykazują dużą zgodność z tymi, które można uzyskać metodami analitycznymi, przy zastosowaniu współczynnika wzmocnienia f_c (podrozdział 5.1) ...”, czy w tym zakresie zostały przeprowadzone analizy porównawcze z wykorzystaniem narzędzi statystycznych ?

10. Na str. 123 dysertacji Doktorant charakteryzując zaprojektowany i wykonany model próbki z inkluzją gazową stwierdził, że: „...Przed umieszczeniem w oleju, każda próbka była montowana w specjalnym O-ringu teflonowym, którego zadaniem jest stabilizacja mechaniczna elementów próbki i uniemożliwienie wnikania oleju do jej wnętrza ...”, natomiast ze schematu przedstawionego na Rys. 6.13 (str. 123) wynika, że między elektrodami, a zastosowaną teflonową obejmą jest przerwa, przez którą może wnikać do badanej próbki olej transformatorowy. Proszę o komentarz w tym zakresie.

11. Doktorant, opisując prezentowane zależności często wykorzystuje sformułowanie „korelacja”, np.: „... podnoszenia napięcia, koreluje bezpośrednio ze wzrostem całkowitej liczby impulsów wyładowań ...” (str. 130); „... liczba impulsów wyładowań, zarejestrowanych w czasie 60 s, dobrze koreluje z częstotliwością napięcia zasilającego ...” (str. 139); „... liczba impulsów wyznaczona w pomiarach, w dużym stopniu zależy od wartości napięcia probierczego ...” (str. 144), itd. Moim zdaniem, z punktu widzenia statystyki matematycznej, w celu określenia liczbowego stopnia, w jakim dwie lub więcej rozpatrywanych zmiennych jest ze sobą powiązanych, należałoby wykorzystać adekwatne narzędzia analizy korelacyjnej. Czy Doktorant, rozważał taką możliwość ?

12. Symulacje numeryczne wykonane za pomocą programu COMSOL zostały przeprowadzone dla stanu ustalonego („Stationary Study”), czy Doktorant rozważał przypadki występowania stanów nieustalonych dla badanych układów izolacyjnych i ewentualnie, jakie rzeczywiste sytuacje eksploatacyjne mogłyby one odzwierciedlać ?

13. Czy Doktorant rozważał możliwości przeprowadzenia weryfikacji pomiarowej wyników symulacji numerycznych uzyskanych dla sferycznych inkluzji gazowych w modelach kabli HVDC z izolacją XLPE ?

4.2 Uwagi redakcyjne

Moim zadaniem rozprawa została zredagowana bardzo poprawnie, zawiera tylko nieliczne błędy gramatyczne. Przede wszystkim dotyczy to sformułowań niepoprawnych stylistycznie, łatwych do wyeliminowania powtórzeń, czy niezręczności językowych, których wybrane przykłady przedstawiłem poniżej, a które nie wpływają w sposób znaczący na jej wysoką ocenę merytoryczną. Na podkreślenie zasługuje także brak błędów ortograficznych, interpunkcyjnych, występuje tylko kilka tzw. literówek. Język dysertacji jest zrozumiały i właściwy dla prac naukowych. Natomiast wszystkie dostrzeżone przez mnie błędy językowe i redakcyjne zaznaczyłem bezpośrednio w rozprawie.

- Doktorant posługuje się w pracy językiem technicznym, jednak nie ustrzegł się przed zastosowaniem kilkunastu mało precyzyjnych i nietechnicznych sformułowań np.:

- „... o niewielkim wypadkowym ...” (str. 42); „... ze względu na ich niewielką ruchliwość ...” (str. 46); „... na dużych krzywiznach elektrod ...” (str. 51); „... dla stosunkowo niewielkich wtrącin ...” (str. 80); „... zlokalizowania wtrąciny w niewielkiej odległości od elektrody ...” (str. 83); „... w niewielkiej odległości od górnej elektrody...” (str. 107), „... ze wzrostem liczby impulsów podąża również ładunek ...” (str. 139), „... całkowity ładunek jest nieco niższy ...” (str. 140), itd.

- W rozprawie występuje tylko kilka powtórzeń w zdaniach, które mogłyby być w prosty sposób wyeliminowane np.:

- „... Zjawisko powstawania wyładowań niezupełnych cechuje duża złożoność zjawisk...” (str. 109); „... zależy od wzajemnej relacji między wzmocnieniem pola a natężeniem inicjacji wyładowań, które są zależne od ...” (str. 132), itd.

- Przykłady sformułowań niepoprawnych stylistycznie:

- „... produkcja elektronów na drodze emisji powierzchniowej ...” (str. 53); „...przyjazny interfejs użytkownika prowadzi go przez wszystkie etapy ...” (str. 71); „... dla weryfikacji tego domysłu ...” (str. 104); „... ze względu na jej prostotę ...” (str. 114); „... uwięzione w okolicach ...” (str. 123); „... skuteczność ewakuacji pęcherzyków ...” (str. 123), itd.

- Przykłady niewłaściwej formy wyrazów:

- „...w sposobie modelowania wzn przy napięciem AC i DC ...” - a poprawnie powinno być: „przy napięciu” (str. 19); „...Tempo zanikania ładunku na powierzchni inkluzji kulistej, po wystąpieniu wyładowania, może być określony poprzez ...” - a poprawnie powinno być: „określone” (str. 41); „... próbek modelowych z inkluzjami gazowy ...” - a poprawnie powinno być: „gazowymi” (str. 111); „...kolejno definiuję się wartości graniczne ...” - a poprawnie powinno być: „definiuje się” (str. 113);

- Brak konsekwencji w stosowaniu skrótu „Rys.” (np. „... klasyfikowaną wg Rys. 2.4 Na rysunku 2.6 przedstawiono ...” str. 31).

Ponadto, nie mam jakichkolwiek zastrzeżeń do zastosowanej w dysertacji terminologii, prezentowanych wzorów oraz zależności, stosowanych oznaczeń, a przedstawione rysunki, fotografie oraz tabele są czytelne i w konsekwencji jednoznacznie interpretowalne.

Zawarte w recenzji uwagi i zastrzeżenia nie wpływają w sposób znaczący na wartość merytoryczną rozprawy, proszę jednak Doktoranta o odniesienie się do nich przed obroną. Jednocześnie stwierdzam, że opiniowana praca jest kompletna i w związku z tym nie wymaga zmian ani uzupełnień.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy aktualnego i oryginalnego zagadnienia naukowego. Stanowi kompleksowe ujęcie zagadnień związanych z wykorzystaniem modelowania numerycznego do odwzorowania zjawisk i parametrów fizycznych, jakie mogą mieć wpływ na powstawanie oraz rozwój WNZ w wysokonapięciowych układach izolacyjnych. Podstawowym celem przeprowadzonych prac naukowo-badawczych było opracowanie, a następnie określenie możliwości oraz zakresu praktycznego zastosowania, zaawansowanego numerycznego modelu polowego do analizy i w konsekwencji umożliwiającego właściwą interpretację wyników pomiarów WNZ, generowanych w inkluzjach gazowych zlokalizowanych w dielektrykach stałych.

Uzyskane wyniki mają duże znaczenie poznawcze i naukowe, stanowią poszerzenie możliwości interpretacji wyników pomiarowych uzyskiwanych metodą elektryczną oraz w mojej ocenie mają perspektywę praktycznego wykorzystania w nieniszczącej diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. Główne cele rozprawy były konsekwentnie realizowane i zostały osiągnięte. Analizując uzyskane wyniki i sformułowane na ich podstawie wnioski, należy jednoznacznie stwierdzić, że założona w dysertacji teza została udowodniona. Doktorant posiada zdolność samodzielnego formułowania, a następnie rozwiązywania problemów o charakterze naukowym. Moim zdaniem, posiada umiejętności związane z opracowywaniem metodyki badawczej, projektowaniem i praktycznym wykonywaniem układów modelujących defekty izolacji, a także prowadzeniem przy ich wykorzystaniu eksperymentów w warunkach laboratoryjnych. Ponadto, w moim przekonaniu Doktorant wykazał się bardzo dobrym opanowaniem wiedzy teoretycznej z zakresu szeroko rozumianej elektrotechniki, w tym w szczególności dotyczącej materiałoznawstwa dielektryków, techniki wysokich napięć, diagnostyki układów izolacyjnych, a przede wszystkim znajomością i umiejętnością modelowania złożonych zjawisk oraz obiektów fizycznych przy zastosowaniu zaawansowanych narzędzi informatycznych, takich jak pakiet symulacyjny Comsol Multiphysics. Ponadto, Doktorant posiada szeroką wiedzę dającą możliwość dogłębnej interpretacji procesów fizyko-chemicznych, jakie mogą towarzyszyć generacji WNZ w układach izolacyjnych.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że przedłożona praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, określone w obowiązującej *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki*. Dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, mgr inż. Pawła Mikruta do publicznej obrony przedłożonej rozprawy.

Jednocześnie, mając na uwadze wysoki poziom merytoryczny dysertacji, szeroki zakres przeprowadzonych badań symulacyjnych i pomiarów je weryfikujących, a także oryginalność uzyskanych zależności i sformułowanych na ich podstawie wniosków oraz fakt opublikowania części wyników w renomowanych czasopismach naukowych, wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.

