



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

**DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE**

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**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**

Autor: mgr inż. Paweł Mikrut

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Paweł Zydróż, prof. AGH

Promotor pomocniczy: dr inż. Józef Roehrich

Praca wykonana:

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki**

Kraków, 2024

Streszczenie

Wysokonapięciowe układy izolacyjne urządzeń elektrycznych mają kluczowe znaczenie dla zapewnienia wysokiej niezawodności działania sieci i systemów elektroenergetycznych. Czas życia izolacji jest limitowany przez procesy starzeniowe typu *intrinsic* i *extrinsic*, zachodzące w dielektrykach. Druga grupa procesów jest związana z występowaniem defektów strukturalnych wewnątrz materiału izolacyjnego. W dielektrykach stałych mogą one mieć np. postać inkluzji lub mikroinkluzji gazowych oraz pęknięć i delaminacji struktury materiałów. W pewnych warunkach defekty takie mogą być źródłami wyładowań niezupełnych (*wnz*). Ich destrukcyjne oddziaływanie na dielektryk prowadzi zwykle do niekorzystnych przemian strukturalnych, co w dłuższym okresie czasu skutkuje obniżeniem lub całkowitą utratą wytrzymałości elektrycznej.

Zakres prac prowadzonych w licznych ośrodkach badawczych w obszarze tematycznym wyładowań niezupełnych dotyczy w szczególności rozpoznania i badania czynników oraz warunków wpływających na powstawanie i rozwój *wnz*, w tym również metodami modelowania numerycznego. Niniejsza praca należy do tego nurtu badań, bowiem skupia się nad analizą warunków powstawania wyładowań niezupełnych w zamkniętych inkluzjach gazowych zlokalizowanych w układach izolacyjnych wykonanych z dielektryków stałych. W rozprawie przedstawiono opracowany w tym celu numeryczny model połowy, pozwalający na analizę powstawania *wnz* w układach izolacyjnych napięcia przemiennego *AC* i stałego *DC*, w warunkach istniejącego w izolacji gradientowego pola temperatury. Pola takie są charakterystyczne dla izolacji obciążonych kabli *WN*, w których żyła kablowa jest wewnętrznym źródłem ciepła. Dzięki połączeniu możliwości programu COMSOL 6.0 z procedurami programu Matlab uzyskano możliwość analizy sekwencji fazowych (dla napięć *AC*) lub czasowych (dla napięć *DC*) impulsów *wnz*. Dla napięcia przemiennego modelowane sekwencje impulsów *wnz* gromadzono w formie obrazów fazowo-rozdzielczych φ - q - n . W ten sposób uzyskano możliwość odniesienia wyników symulacji na modelach numerycznych do wyników pomiarów laboratoryjnych, przeprowadzonych na modelach fizycznych układów izolacyjnych z inkluzjami gazowymi, o określonej geometrii i parametrach materiałów dielektrycznych.

W badaniach analizowano wpływ różnych czynników fizykalnych na powstawanie wyładowań niezupełnych w inkluzjach gazowych: napięcia probierczego i jego częstotliwości, kształtu i rozmiaru inkluzji gazowej oraz jej położenia i orientacji w układzie izolacyjnym, wartości przenikalności elektrycznej i rezystywności skrośnej dielektryka stałego otaczającego inkluzję oraz temperatury. Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów, obrazów fazowo-rozdzielczych i tabel. Sformułowano oryginalne wnioski dotyczące wpływu rozmiaru płaskiej inkluzji gazowej na pojawienie się efektu rozładowania jej ładunku w więcej niż pojedynczym impulsie *wnz*. Korzystając z numerycznego modelu elektro-termicznego kabli *HVDC* z izolacją *XLPE* oszacowano wielkość krytycznego rozmiaru inkluzji sferycznej, w funkcji jej położenia, w izolacji kabla obciążonego i nieobciążonego.

Spis treści

Streszczenie	2
Spis treści.....	3
1 Motywacja, cel i teza pracy.....	4
2 Struktura i zakres pracy	5
3 Podsumowanie, ważniejsze wyniki i wnioski.....	7
Bibliografia.....	20

1 Motywacja, cel i teza pracy

Układy izolacyjne urządzeń elektrycznych podlegają działaniu różnego rodzaju narażeń eksploatacyjnych, znamionowych i zakłóceń. Należą do nich narażenia cieplne, elektryczne, mechaniczne i środowiskowe oraz dowolne ich kombinacje, zwiększające przez synergizm swego działania niekorzystny wpływ na strukturę i właściwości materiałów dielektrycznych, w szczególności polimerowych [6, 20]. W większości urządzeń, pracujących w sieciach i systemach elektroenergetycznych, podstawowym narażeniem dla izolacji elektrycznej jest ciepło (temperatura T) oraz pole elektryczne (natężenie pola E). Oba te czynniki są odpowiedzialne za tempo postępu wewnętrznych procesów starzeniowych typu *intrinsic* w dielektrykach, które warunkują szacowany *czas życia* izolacji elektrycznej [4, 5, 6, 17, 18]. Specyfika pracy i wymagania dotyczące niezawodności działania urządzeń w elektroenergetyce sprawiają, że nieprzerwanie prowadzone są prace badawczo-rozwojowe zmierzające do poprawy właściwości i parametrów materiałów dielektrycznych oraz układów izolacyjnych, dla zapewnienia *projektowego czasu życia* urządzeń sięgającego perspektywy czasu 40+.

Na obecnym etapie rozwoju inżynierii materiałowej dielektryków, technologii wytwarzania układów izolacyjnych oraz techniki wysokich napięć przyjmuje się, że zasadniczy wpływ na poprawną i bezawaryjną pracę układu izolacyjnego ma obecność wewnętrznych defektów strukturalnych, wtrącin i zanieczyszczeń [4, 6]. Defekty takie mogą powodować lokalne podwyższenie wartości natężenia pola elektrycznego ponad wartość krytyczną, tzn. taką, powyżej której w układzie izolacyjnym dochodzi do powstawania *wyładowań niezupełnych (wnz)*. Należą one do grupy procesów starzeniowych *extrinsic*, powodujących szybszą degradację struktury dielektryków i w efekcie prowadzących do skrócenia czasu życia izolacji [6, 12, 13]. Tematyka badawcza z nimi związana ma długą, już ponad 100-letnią historię, której początki sięgają przełomu XIX i XX w. [7, 21], ale ze względu na istotny wpływ *wnz* na niezawodność pracy urządzeń elektrycznych (i elektroenergetycznych), jest ona wciąż aktualna.

Zakres prac badawczych prowadzonych na świecie, w obszarze tematyki *wyładowań niezupełnych*, dotyczy w szczególności:

- rozpoznania i badania czynników oraz warunków wpływających na powstawanie i rozwój *wyładowań niezupełnych* w ich źródłach, w tym również metodami analizy numerycznej, opartej o symulacje polowe lub obwodowe [19];
- opracowania i rozwoju elektrycznych i nieelektrycznych metod detekcji *wnz*, stosowanych w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych oraz sposobów ich przetwarzania, dla poprawy stosunku *sygnał/szum* i selekcji parametrów uznawanych za diagnostycznie istotne [1, 2, 7, 10, 11, 22];
- wielowymiarowej i wieloaspektowej analizy wyników pomiarów *wnz* dla potrzeb diagnozowania i oceny stanu technicznego układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych, w tym również z zastosowaniem zaawansowanych metod

eksploracji i interpretacji danych (rozpoznawanie obrazów, klasteryzacja, analiza wzorców, sieci neuronowe, logika rozmyta, itp.) [7, 8].

Podstawowym **celem pracy**, wpisującej się swym zakresem w pierwszy z wymienionych obszarów badań, było 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. Model taki ma służyć jako narzędzie dla wspomagania analiz i interpretacji zjawisk zachodzących w defektach izolacji, w szczególności wpływu wybranych czynników i procesów fizykalnych na parametry impulsów *wnz* oraz ich sekwencji czasowych, obserwowanych pomiarowo na zewnątrz obiektu (na jego doprowadzeniach prądowych). Dodatkowym warunkiem było uzyskanie możliwości gromadzenia otrzymanych w wyniku symulacji zbiorów impulsów *wnz* w postaci obrazów fazowo-rozdzielczych φ - q - n , stanowiących jedną z podstawowych form akwizycji impulsów *wnz* we współczesnych systemach do pomiaru i rejestracji wyładowań niepełnych. Spełnienie tego celu było istotne ze względu na uzyskanie możliwości prowadzenia analiz porównawczych, przydatnych dla interpretacji danych pomiarowych *wnz* w aspekcie poprawnego rozpoznawania i opisu cech procesów fizykalnych, związanych z ich powstawaniem w wewnętrznych inkluzjach gazowych.

Biorąc pod uwagę przedstawiony cel pracy oraz wynikające z niego zadania badawcze, sformułowano następującą tezę rozprawy:

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.

2 Struktura i zakres pracy

Zakres pracy obejmuje problematykę analizy warunków powstawania i rozwoju wyładowań niepełnych w inkluzjach gazowych w układach izolacyjnych z dielektrykami stałymi. Metodyka realizacji badań, zmierzających do osiągnięcia założonego celu oraz potwierdzenia postawionych tez obejmowała: 1) przeprowadzenie studiów literaturowych, dla określenia aktualnego stanu wiedzy w zakresie tematu pracy; 2) przygotowanie narzędzia dla wykonania numerycznych symulacji polowych, umożliwiającego analizę pól elektrycznych w układach izolacyjnych *AC* oraz *DC*, z uwzględnieniem wpływu pola temperatury na rozkład pola *E* (analiza pól sprzężonych); 3) analizę powstawania *wnz* w modelach inkluzji gazowych, w układach izolacyjnych o różnej charakterystyce (o jednorodnym i niejednorodnym polu *E*), w tym dokonanie numerycznego oszacowania rozmiarów krytycznych inkluzji gazowych

w modelach kabli *HVDC*; 4) opracowanie i implementację programową procedury gromadzenia impulsów *wnz* z symulowanych sekwencji czasowych w macierzy φ - q , pozwalające na uzyskiwanie obrazów fazowo-rozdzielczych *wnz*; 5) przygotowanie fizycznych próbek modelowych inkluzji gazowych o zdefiniowanej geometrii w dielektryku stałym, wykonanie serii pomiarów laboratoryjnych dla uzyskania obrazów fazowo-rozdzielczych *wnz* oraz przeprowadzenie analizy porównawczej z wynikami symulacji numerycznych dla modeli o takiej samej geometrii i parametrach materiałowych; 6) analizę i dyskusję wyników, które pozwoliły na sformułowanie wniosków końcowych.

Uwzględniając powyższe, w rozdziałach od 2 do 4 zawarto, bazujący na źródłach literaturowych, syntetyczny opis problematyki związanej bezpośrednio z tematem i zakresem rozprawy. W rozdziale 2 scharakteryzowano materiały stosowane w układach elektroizolacyjnych oraz sklasyfikowano procesy starzeniowe w nich zachodzące, w tym zjawisko powstawania wyładowań niezupełnych. Przedstawiono również typowe rodzaje defektów, występujących w układach izolacyjnych różnych urządzeń elektroenergetycznych, które to defekty w określonych warunkach stają się źródłami wyładowań niezupełnych. Rozdział 3 zawiera opis zjawisk i procesów fizykalnych, które warunkują powstawanie wyładowań niezupełnych. W rozdziale tym, zdefiniowano również i opisano warunki i kryteria dla inicjacji i gaśnięcia wyładowań oraz mechanizmy, które powodują, że pojawienie się elektronów inicjujących wyładowanie ma charakter stochastyczny. Przedstawiono również czynniki, które wpływają na wartość natężenia pola elektrycznego w inkluzji gazowej, w dielektryku stałym, związane z obecnością ładunku powierzchniowego. W rozdziale 4 dokonano przeglądu stosowanych metod modelowania wyładowań niezupełnych w defektach układów izolacyjnych oraz opisano pięć różnych modeli, stosowanych w analizach powstawania *wnz*. Rozdział zakończono opisem różnic w sposobie modelowania *wnz* przy napięciem *AC* i *DC*.

Część badawcza pracy jest przedstawiona w rozdziałach od 5 do 7. W rozdziale 5 zaprezentowano i przedyskutowano wyniki symulacji numerycznych rozkładu natężenia pola E w wybranych modelowych układach izolacyjnych, z wewnętrznymi wtrącinami gazowymi, o zdefiniowanej geometrii. Symulacje przeprowadzono za pomocą programu COMSOL Multiphysics, wersja 6.0. Analizowano defekty o różnym kształcie, rozmiarze i położeniu, umieszczone w izolacji stałej o jednorodnym (układ elektrod płaskich) oraz niejednorodnym (izolacja kabla elektroenergetycznego) rozkładzie natężenia pola elektrycznego. Zbadano także wpływ wartości napięcia probierczego oraz stałej dielektrycznej materiału izolacyjnego. Dokonano ponadto analizy warunków polowych dla powstawania *wnz* w inkluzjach gazowych, w próbkach materiałów poddawanych testom wytrzymałości elektrycznej, wykonywanych przy zastosowaniu układów elektrod zdefiniowanych w normach IEC oraz ASTM. Rozdział 6 opisuje tę część badań, w której porównano wyniki symulacji numerycznych z wynikami badań laboratoryjnych, wykonanych na modelach inkluzji gazowych o znanej geometrii i parametrach materiałów tworzących próbkę. Przedstawiono w nim procedurę przygotowania modeli symulacyjnych przy wspólnym, sprzężonym zastosowaniu programów COMSOL i Matlab oraz opracowano algorytm symulacji *wnz* w dziedzinie czasu, pozwalający na uzyskanie obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań. Wyznaczono wybrane parametry zmierzonych i symulo-

wanych zbiorów impulsów *wnz* i dokonano ich porównania oraz analizy. Efektem były ważne wnioski dotyczące wpływu wielkości powierzchni inkluzji gazowej na przebieg procesów powstawania wyładowań niezupełnych oraz liczbę i parametry rejestrowanych impulsów *wnz*. W rozdziale 7 opisano sposób i rezultaty modelowania sferycznych inkluzji gazowych w modelach kabli napięcia stałego *HVDC* z izolacją *XLPE*. Specyfika izolacji *DC* wymagała uwzględnienia wpływu temperatury i natężenia pola elektrycznego na przewodność materiału izolacyjnego. Dla analizy pól sprzężonych przygotowano i przeprowadzono sprzężoną symulację elektro-termiczną, zaimplementowaną w programie COMSOL Multiphysics. W efekcie, wyznaczono przebiegi czasowe impulsów *wnz*, powstających w defektach gazowych izolacji kabli *HVDC*, obserwując zmiany ich parametrów, spowodowane zmianami temperatury żyły kabla. Model zastosowano do określenia warunków powstawania *wnz* w defektach kabli *HVDC* na napięciu od 150 kV do 500 kV. Dla każdego z analizowanych kabli oszacowano także rozmiary krytyczne inkluzji gazowych, tj. rozmiar, którego przekroczenie powoduje, że wtrącina może stać się źródłem wyładowań niezupełnych.

Podsumowanie całości przeprowadzonych badań i wnioski z nich wynikające są zamieszczone w rozdziale 8. W tym rozdziale przedstawiono również propozycje dalszych prac, które pozwolą rozwinąć i poszerzyć dokonane już analizy.

Całość pracy związana z przygotowaniem rozprawy była prowadzona w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki na Wydziale EAIiB AGH w Krakowie. W szczególności wszystkie prace eksperymentalne zostały wykonane na stanowiskach badawczych Laboratorium Wysokich Napięć, będącego częścią struktury organizacyjnej tej Katedry.

3 Podsumowanie, ważniejsze wyniki i wnioski

Podstawowym tematem, będącym przedmiotem badań i rozważań opisanych w rozprawie, była analiza warunków powstawania wyładowań niezupełnych w inkluzjach gazowych, znajdujących się w układzie izolacyjnym wykonanym z dielektryków stałych. Problem ten dotyka w praktyce konstrukcji wszystkich wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych. Ze względu na destrukcyjne energetyczne oddziaływanie wyładowań niezupełnych na strukturę materiału izolacyjnego, a w szczególności dielektryków organicznych, w procesach technologicznych dąży się do ograniczenia liczby i rozmiarów defektów, które potencjalnie mogą stać się ich źródłami. Dla weryfikacji jakości tych procesów wykonuje się odpowiednie testy i badania laboratoryjne, ale również rozważa się teoretycznie wpływ określonych czynników i parametrów na tempo starzenia się izolacji. W tym aspekcie ważnym obszarem prac badawczych, prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych jest modelowanie numeryczne powstawania i rozwoju wyładowań w defektach izolacji, w których stara się uwzględniać złożoność zjawisk i procesów fizykalnych temu towarzyszących.

W trakcie realizacji programu badań, stosując symulacje numeryczne oraz weryfikujące je pomiary laboratoryjne na modelach fizycznych, rozważano wpływ wybranych parametrów

fizykalnych oraz napięcia probierczego na parametry statystyczne zbiorów impulsów wyładowań niezupełnych, powstających w defektach o znanych parametrach. Symulacje te dotyczyły różnych, sferycznych, elipsoidalnych i cylindrycznych defektów gazowych, umieszczonych w układach o jednorodnym lub niejednorodnym rozkładzie pola elektrycznego E . Cały zakres badań był podzielony na kilka etapów, których kolejność ma swoje uzasadnienie merytoryczne.

1. Na podstawie wyników symulacji rozkładów natężenia pola elektrycznego E w dwóch modelowych układach izolacyjnych:

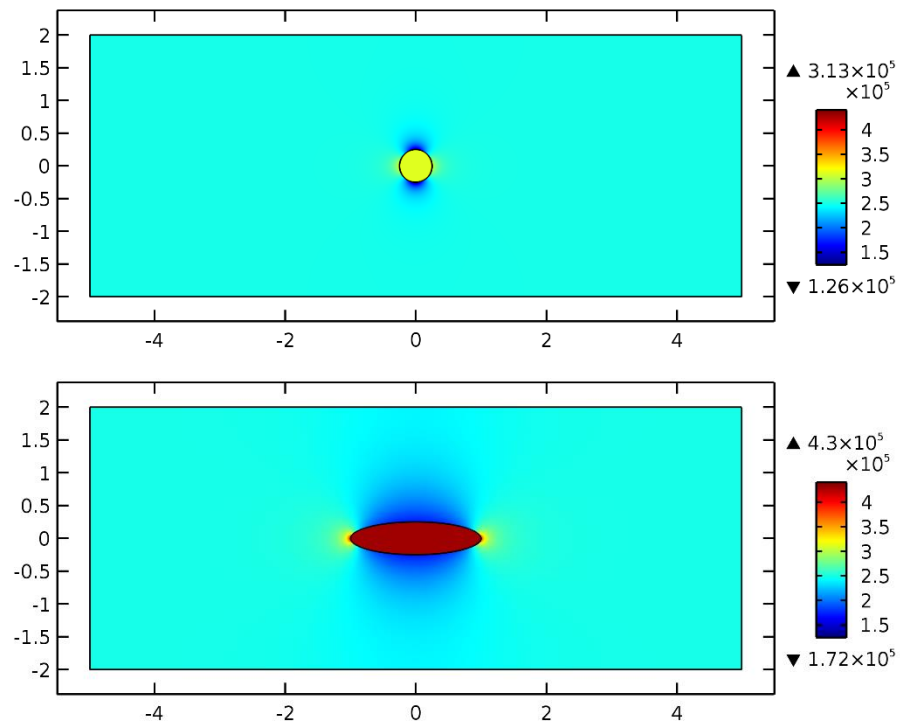
- układzie z równoległymi elektrodami płaskimi, o polu jednorodnym;
- układzie elektrod koncentrycznych, odwzorowujących niejednorodne pole elektryczne w izolacji kabla napięcia przemiennego AC;

analizowano wpływ wybranych parametrów, mających wpływ na wartość natężenia tego pola:

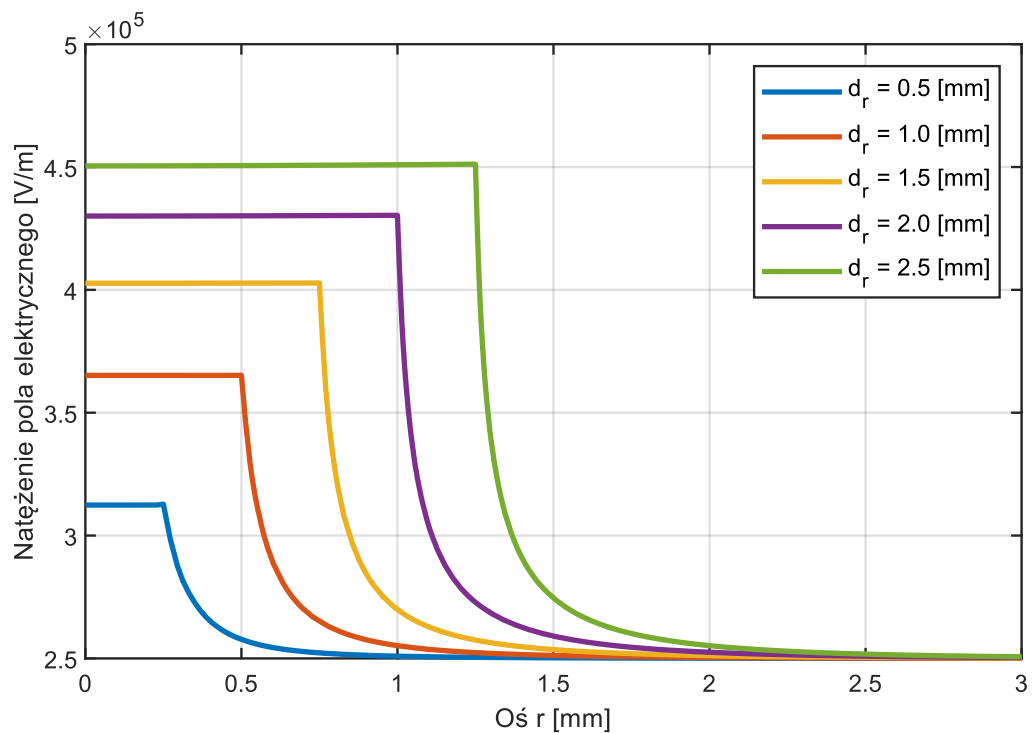
- wartości napięcia probierczego;
- przenikalności elektrycznej dielektryka stałego;
- kształtu inkluzji gazowej (inkluzje sferyczne lub elipsoidalne o różnej orientacji osi głównej względem linii pola E);
- rozmiarów geometrycznych inkluzji gazowej;
- lokalizacji inkluzji gazowej w dielektryku stałym;

na wartość współczynnika wzmocnienia pola elektrycznego wewnątrz inkluzji.

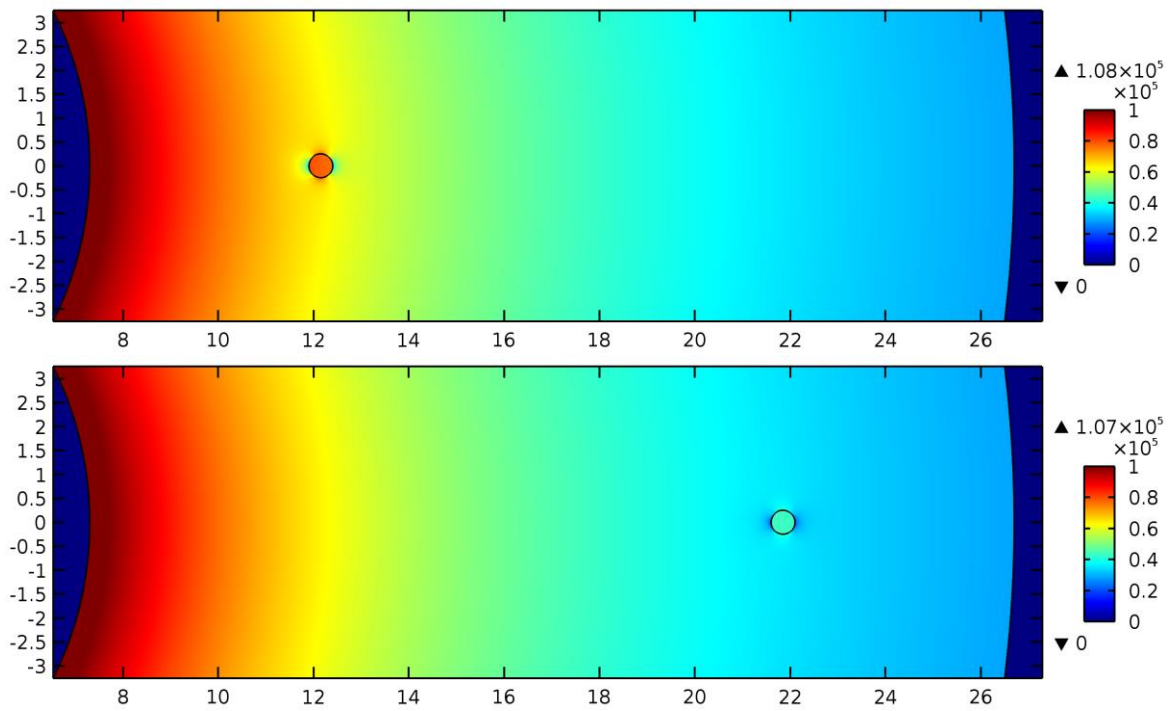
Wykazano, że zarówno w układzie elektrod płaskich jak i w układzie koncentrycznym, przypadkiem najmniej korzystnym, ze względu na wyraźny wzrost wartości natężenia pola E , jest inkluzja płaska, zorientowana główną osią prostopadle do linii pola elektrycznego, umieszczona w dielektrykach o wyższej wartości stałej dielektrycznej, w układzie izolacyjnym o projektowej wysokiej wartości natężenia pola elektrycznego (Rys. 3.1, Rys. 3.2). Ponadto, co było do przewidzenia, dla układu izolacyjnego kabla z niejednorodnym polem AC, inkluzje położone bliżej żyły kabla są bardziej narażone na powstawanie i wyższą intensywność wyładowań niezupełnych (Rys. 3.3, Rys. 3.4).



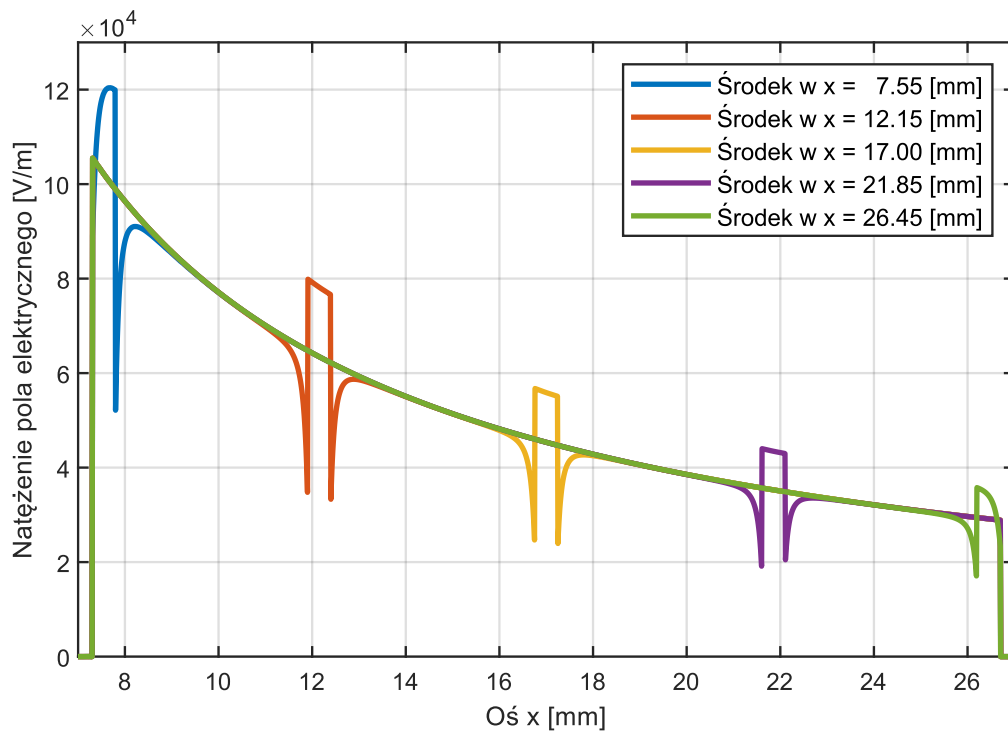
Rys. 3.1 Rozkłady natężenia pola elektrycznego E [V/m] dla inkluzji elipsoidalnych, ukierunkowanych poziomo pomiędzy elektrodami; pole jednorodne, $U_p = 1$ kV.



Rys. 3.2 Wykres natężenia pola elektrycznego E wzdłuż osi r dla inkluzji elipsoidalnych, ukierunkowanych poziomo pomiędzy elektrodami; pole jednorodne, $U_p = 1$ kV.

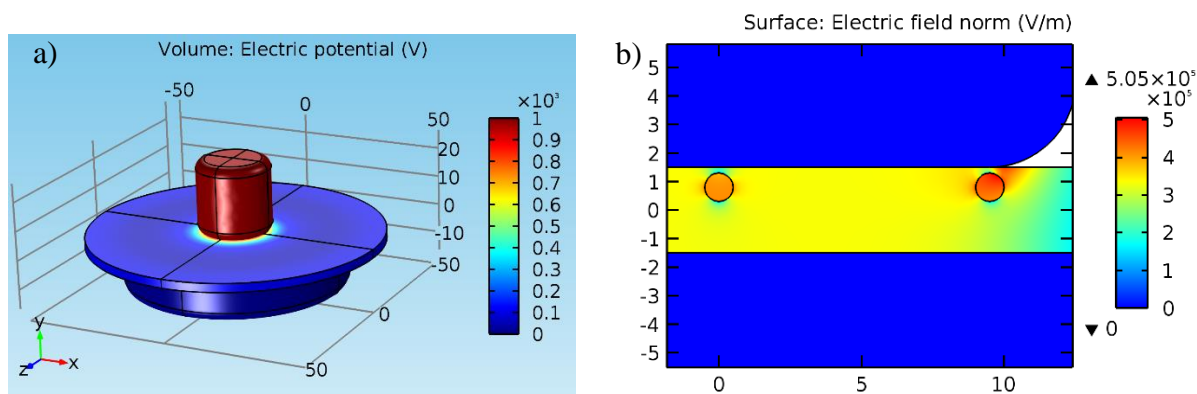


Rys. 3.3 Rozkłady natężenia pola elektrycznego E [V/m] w zależności od położenia inkluzji gazowej w izolacji kabla elektroenergetycznego; $U_p = 1$ kV.



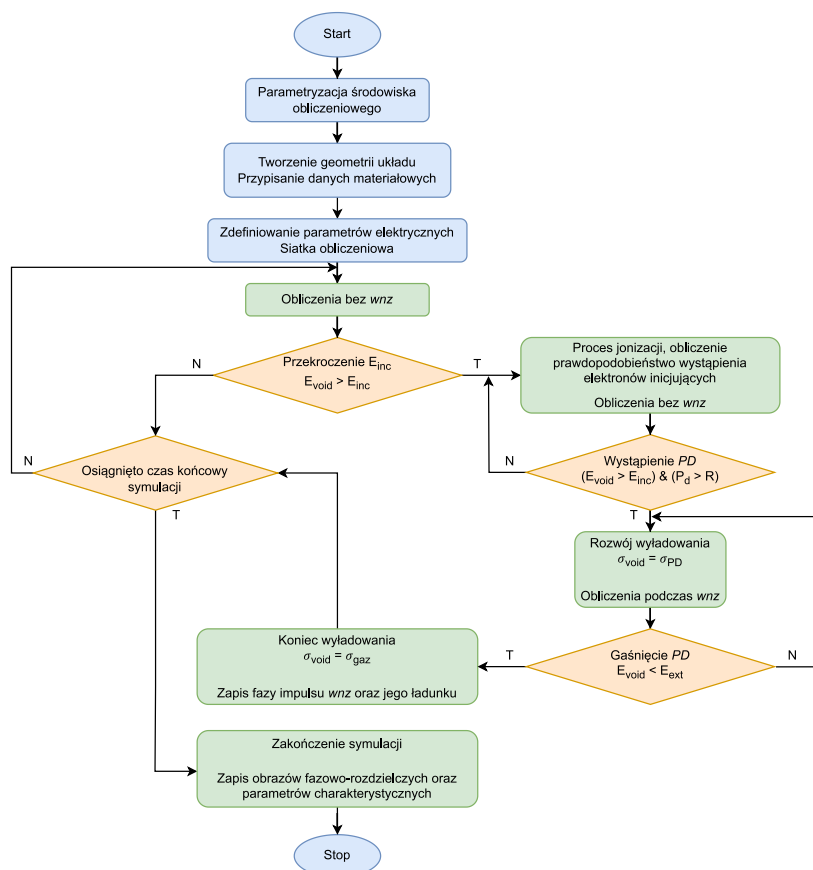
Rys. 3.4 Wykres natężenia pola elektrycznego E wzdłuż osi x , dla wtrącin o różnym położeniu w izolacji kabla elektroenergetycznego; $U_p = 1$ kV.

2. Dla kilku układów znormalizowanych elektrod pomiarowych IEC oraz ASTM, stosowanych w badaniach wytrzymałości elektrycznej próbek materiałów dielektrycznych, dokonano analizy i porównania warunków polowych panujących w inkluzjach sferycznych zlokalizowanych pomiędzy elektrodami, w polu jednorodnym, oraz przy krawędzi elektrod, w obszarze zaburzenia rozkładu pola elektrycznego. Wyniki analiz wykazały możliwość nawet ok. 25% wzrostu natężenia pola E we wtrącinach znajdujących się w pobliżu krawędzi elektrod (Rys. 3.5). Zakładając jednorodny rozkład mikrodefektów gazowych w objętości materiału izolacyjnego, oznacza to że w obszarach bliskich promieniowi styku elektrody pomiarowej z dielektrykiem występuje większe prawdopodobieństwo inicjacji wyładowań niezupełnych w inkluzjach gazowych rozproszonych w materiale izolacyjnym. Jest to powód, dla którego w pomiarach laboratoryjnych *wnz* w płaskich próbkach modelowych należy używać elektrod o odpowiednio wyprofilowanych krawędziach, które zmniejszą efekt lokalnego podwyższenia wartości pola E .

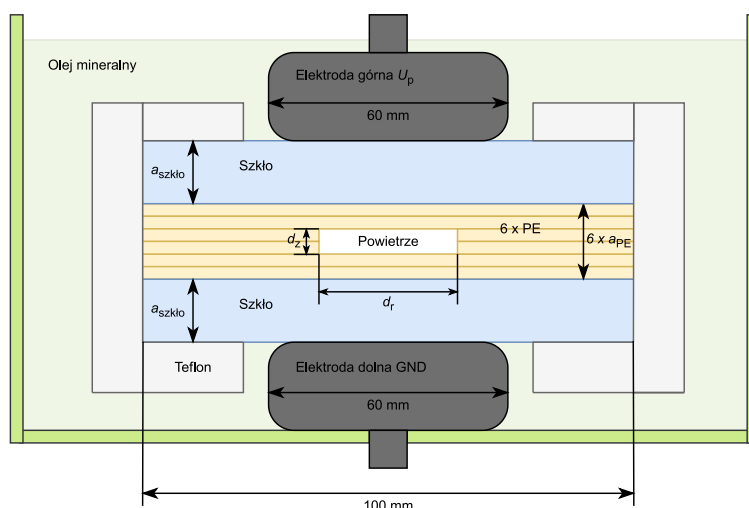


Rys. 3.5 Numeryczny model symulacyjny do badania rozkładu pola dla inkluzji gazowych umieszczonych na krawędzi układu elektrod IEC:25-75, napięcie probiercze 1 kV, grubość dielektryka 3 mm: a) widok 3D modelu ilustrujący rozkład potencjału w układzie; b) rozkład natężenia pola E [V/m] dla wtrąciny umieszczonej centralnie oraz w pobliżu krawędzi elektrody górnej

3. Istotną częścią wykonanych badań było przeprowadzenie analiz porównawczych obrazów fazowo-rozdzielczych φ - q - n uzyskanych podczas pomiarów na fizycznych modelach laboratoryjnych cylindrycznych inkluzji gazowych w dielektryku (Rys. 3.7) z odpowiadającymi im obrazami uzyskanymi podczas symulacji polowych, wykonanych na adekwatnych geometrycznie i materiałowo modelach numerycznych. W tym celu opracowano algorytm symulacji *wnz* w dziedzinie czasu (Rys. 3.6), zaimplementowany w środowisku programu COMSOL Multiphysics, sterowany z programu Matlab. Otrzymano dzięki temu narzędzie, które pozwoliło nie tylko uzyskiwać sekwencje czasowe impulsów *wnz*, ale również akumulować je w macierzy φ - q o tym samym rozmiarze, jaki ma macierz wynikowa, otrzymywana w systemie do pomiaru *wnz* ICMsystem (Power Diagnostix GmbH). Opracowany model polowy i algorytm przetwarzania danych pozwoliły też na wyznaczenie podstawowych parametrów fizycznych i statystycznych dla impulsów *wnz* oraz ich zbiorów. Wyniki analiz wskazują, że wyniki otrzymane na podstawie modelu symulacyjnego posiadają dobrą zgodność jakościową oraz zadowalającą zgodność ilościową z wynikami pomiarowymi.



Rys. 3.6 Algorytm symulacji sekwencji wyładowań niezupełnych w inkluzjach gazowych

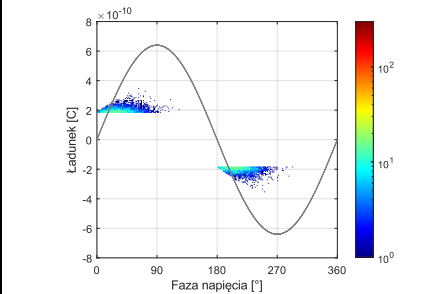
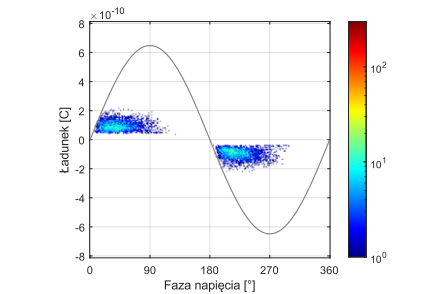
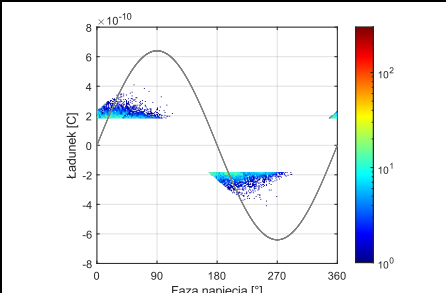
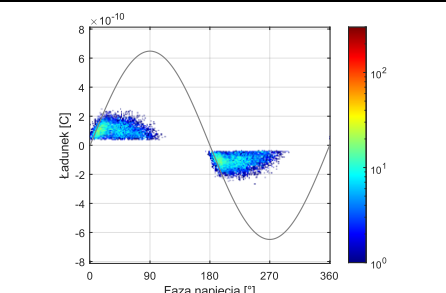
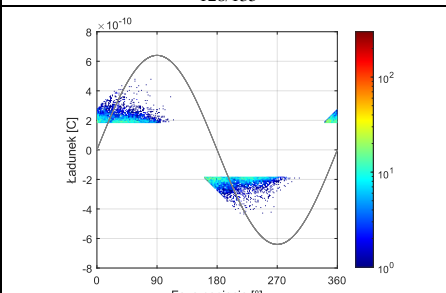
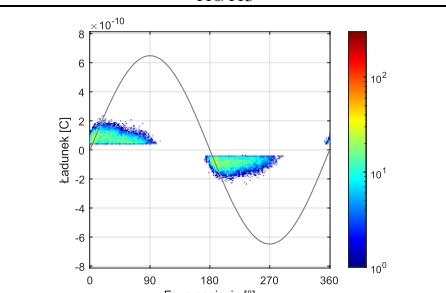


Rys. 3.7 Schemat rzeczywistej próbki modelowej z inkluzją gazową o określonej geometrii

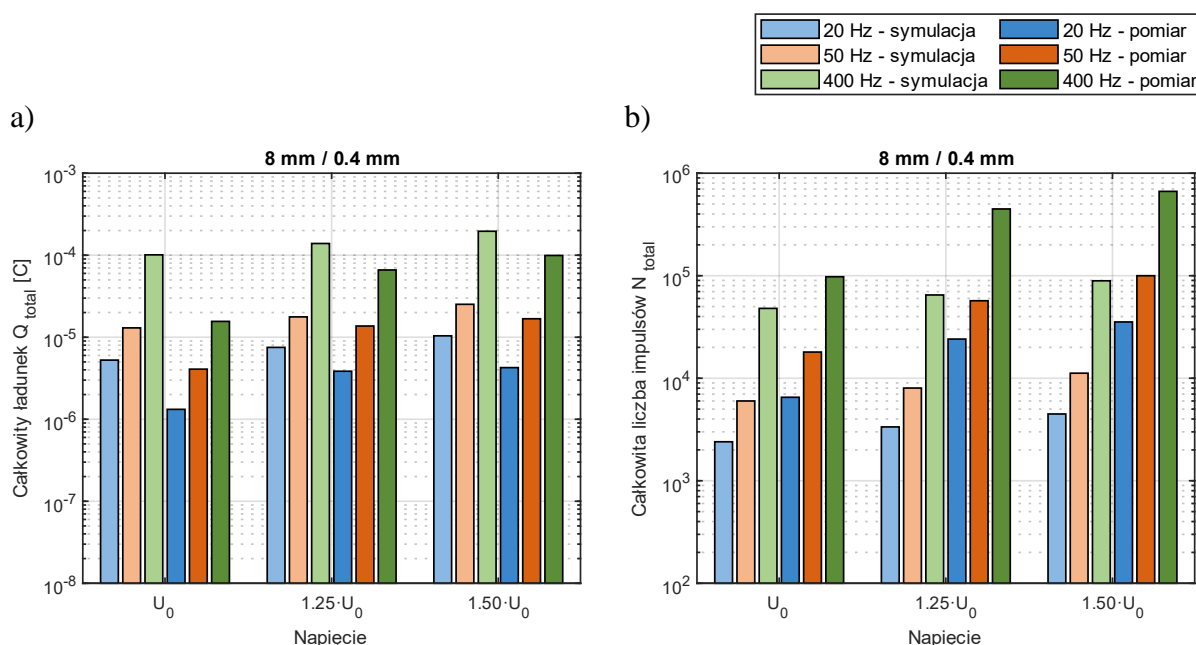
Na podstawie pomiarów i symulacji numerycznych, stwierdzono, że:

- Zwiększenie wartości napięcia probierczego U_p powoduje wzrost pola we wtrącinie E_{void} , nie powoduje natomiast zmian natężenia zapłonu E_{inc} oraz napięcia początkowego wyładowań U_0 . Skutkuje to wzrostem liczby wyładowań N oraz ich ładunku Q . Zmienia się wówczas również faza początkowa wyładowań φ_{inc} , skutkując przesunięciem kąta początkowego wnz ku mniejszym wartościom, z jednoczesnym rozszerzeniem się zakresu fazowego wyładowań $\Delta\varphi$ (Tabela 3.1);

Tabela 3.1 Porównanie wyników symulacyjnych i pomiarowych wybranych parametrów wnz oraz obrazów fazowych dla modelowej wtrąciny o wymiarach 2 mm / 0.4 mm, dla różnych poziomów napięć (U_0 , $1.25 \cdot U_0$ i $1.50 \cdot U_0$) o częstotliwości 50 Hz

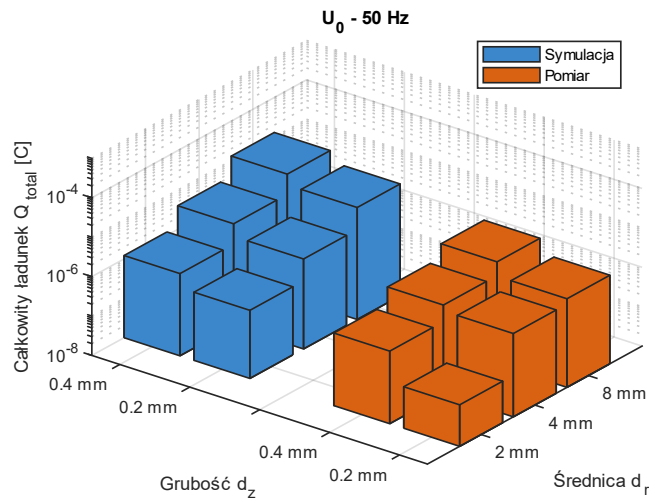
2 mm / 0.4 mm, $f = 50$ Hz				
	Symulacja	Pomiar	Sym./Pom.	
U_0 (max) [kV]	6.350	6.215	1.02	
N	5988	7375	0.81	
N /półokres	0.998	1.229	0.81	
Q_{avg} [C]	$2.05 \cdot 10^{-10}$	$9.41 \cdot 10^{-11}$	2.17	
Q_{max} [C]	$3.55 \cdot 10^{-10}$	$2.17 \cdot 10^{-10}$	1.64	
Q_{total} [C]	$1.22 \cdot 10^{-06}$	$6.94 \cdot 10^{-07}$	1.76	
φ_{inc} (+/-) [°]	0/180	6/186		
$\Delta\varphi$ (+/-) [°]	108/104	113/106		
Obraz fazowo-rozdzielczy				
$1.25 \cdot U_0$ (max) [kV]	7.938	7.768	1.02	
N	7921	14455	0.55	
N /półokres	1.320	2.409	0.55	
Q_{avg} [C]	$2.11 \cdot 10^{-10}$	$1.06 \cdot 10^{-10}$	1.98	
Q_{max} [C]	$4.09 \cdot 10^{-10}$	$2.61 \cdot 10^{-10}$	1.57	
Q_{total} [C]	$1.67 \cdot 10^{-06}$	$1.54 \cdot 10^{-06}$	1.08	
φ_{inc} (+/-) [°]	-11/168	-3/176		
$\Delta\varphi$ (+/-) [°]	121/123	114/115		
Obraz fazowo-rozdzielczy				
$1.50 \cdot U_0$ (max) [kV]	9.525	9.322	1.02	
N	10895	22129	0.49	
N /półokres	1.816	3.688	0.49	
Q_{avg} [C]	$2.16 \cdot 10^{-10}$	$8.86 \cdot 10^{-11}$	2.44	
Q_{max} [C]	$4.81 \cdot 10^{-10}$	$2.29 \cdot 10^{-10}$	2.10	
Q_{total} [C]	$2.36 \cdot 10^{-06}$	$1.96 \cdot 10^{-06}$	1.20	
φ_{inc} (+/-) [°]	-18/162	-10/171		
$\Delta\varphi$ (+/-) [°]	128/135	110/113		
Obraz fazowo-rozdzielczy				
$1.25 \cdot U_0 / U_0$	N	1.323	1.960	
	Q_{avg}	1.029	1.131	
	Q_{max}	1.153	1.203	
	Q_{total}	1.362	2.217	
$1.50 \cdot U_0 / U_0$	N	1.819	3.001	
	Q_{avg}	1.058	0.942	
	Q_{max}	1.355	1.055	
	Q_{total}	1.925	2.827	

- Zmiany częstotliwości f napięcia probierczego powodują zmiany w rozkładzie natężenia pola elektrycznego w poszczególnych warstwach analizowanego modelu. Wzrost częstotliwości powodował obniżenie wartości stałej dielektrycznej szkła, co skutkowało obniżeniem natężenia pola w inkluzji E_{void} i w efekcie prowadziło do podwyższenia wartości napięcia początkowego wyładowań U_0 . Podwyższenie częstotliwości, powoduje wzrost liczby okresów napięcia AC w obserwowanym czasie (60 s), co skutkowało zwiększeniem całkowitej liczby impulsów N_{total} oraz całkowitego ładunku wyładowań Q_{total} (Rys. 3.8). Obniżenie częstotliwości f napięcia probierczego powodowało efekty odwrotne od przedstawionych.



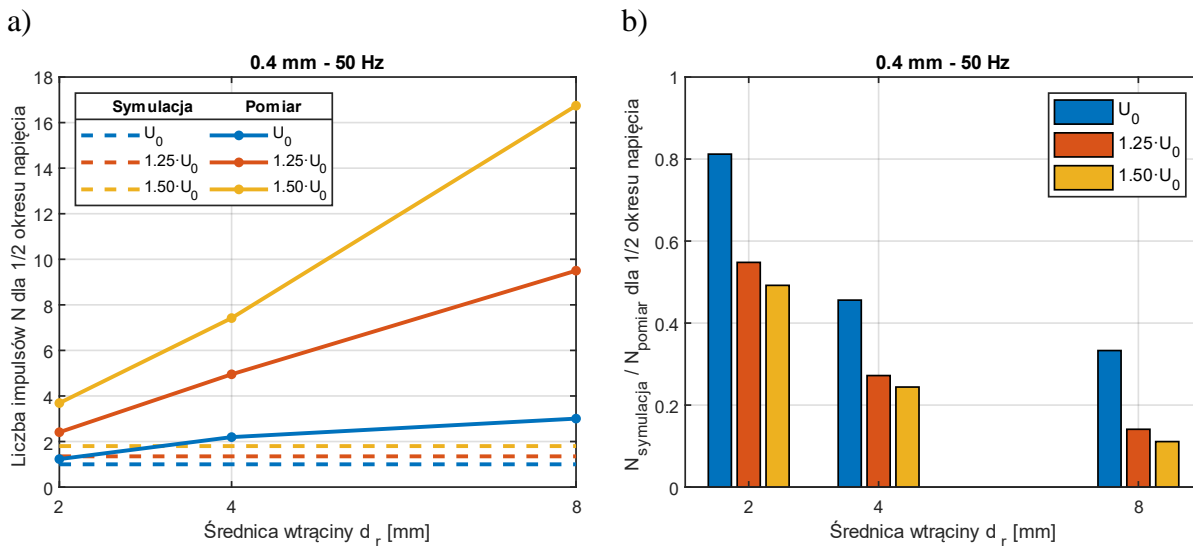
Rys. 3.8 Całkowity ładunek Q_{total} (a) oraz całkowita liczba impulsów N_{total} (b), dla trzech poziomów napięć (U_0 , $1.25 \cdot U_0$, $1.50 \cdot U_0$) oraz częstotliwości (20 Hz, 50 Hz, 400 Hz) dla wtrąciny o wymiarach (d_r / d_z) 8 mm / 0.4 mm

- Kształt i wymiary geometryczne inkluzji gazowej mają wyraźny wpływ na warunki powstawania wnz , a co za tym idzie również na ich parametry.
 - Zwiększenie średnicy inkluzji cylindrycznej przekłada się na wyższe pole w jej wnętrzu, przy niezminiającej się wartości natężenia zapłonu. Powoduje to obniżenie wartości napięcia początkowego wyładowań U_0 oraz wzrost wartości dwóch istotnych parametrów wyładowań, ich liczby i ładunku (Rys. 3.9).
 - Zwiększenie grubości wtrąciny cylindrycznej powoduje obniżenie zarówno natężenia pola elektrycznego we wtrącinie E_{void} , jak i natężenia zapłonu E_{inc} , co w efekcie obniża napięcie początkowe wyładowań U_0 oraz podwyższa ładunki wyładowań.
- Przy wyższych napięciach, powodujących wzrost intensywności wnz , dochodzi do podwyższenia temperatury gazu w zamkniętej inkluzji o stałej objętości, a więc również do wzrostu jego ciśnienia. Może to w efekcie skutkować podwyższeniem napięcia zapłonu wnz i w konsekwencji czasowego wygaszenia wyładowań.

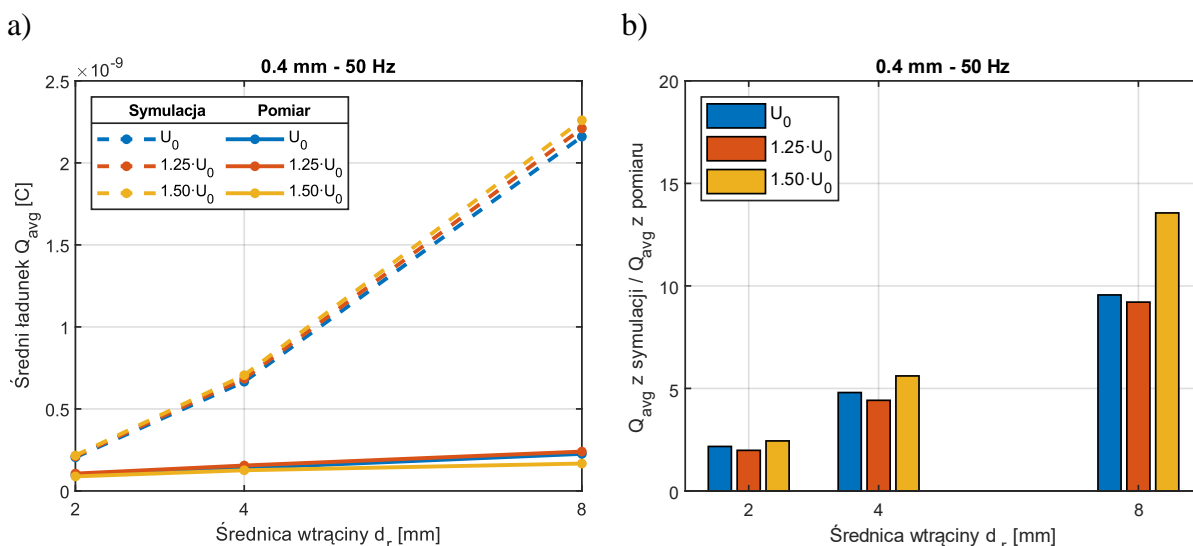


Rys. 3.9 Całkowity ładunek Q_{total} dla inkluzji o różnych wymiarach, przy wartości napięcia U_0 i częstotliwości $f = 50 \text{ Hz}$

- Analizując wyniki badań zauważono, że dla modelowych inkluzji sferycznych o mniejszych średnicach d_r , liczba dodatnich lub ujemnych impulsów wnz na półokres napięcia $N/półokres$ (Rys. 3.10) oraz wartość średnia ładunku wyładowań Q_{avg} (Rys. 3.11) uzyskana w pomiarach posiada większą zgodność z wynikami symulacji numerycznych, niż ma to miejsce dla inkluzji o większych średnicach. Ponadto, analizując dane pomiarowe stwierdzono, że przy wzroście średnicy inkluzji następuje zwiększenie liczby impulsów wnz na $1/2$ okresu napięcia oraz jednoczesny spadek wartości średniej ładunku wyładowań Q_{avg} , w porównaniu do wyników symulacji. Wartości ładunku całkowitego (a więc iloczynu N i Q_{avg}) otrzymanego w pomiarach oraz jako efekt symulacji zachowują swoje wzajemne relacje przy zmieniającej się średnicy inkluzji. Interpretacja fizykalna, które wyjaśnia to zjawisko jest taka, że w inkluzji płaskiej (o stosunkowo dużej powierzchni, w stosunku do jej grubości), ładunek w niej zgromadzony nie przepływa podczas jednego impulsu wnz , ale jest dzielony na kilka wyładowań. Na podstawie źródeł literaturowych można przypuszczać, że wyładowania te mogą zachodzić w kilku niezależnych kanałach wyładowczych, których zasięg zbierania ładunku jest ograniczony jedynie do pewnej części powierzchni przeciwległych ścian inkluzji. Liczba wyładowań i ich średni ładunek, zależą wówczas od liczby i powierzchni zbierania ładunku powstających kanałów wyładowczych. Im powierzchnia inkluzji jest większa w stosunku do jej grubości, tym całkowity ładunek wyładowań przepływa przez większej liczby kanałów. Efekt ten będzie się zapewne silniej uwidaczniał w rozległych delaminacjach izolacji warstwowej, np. prętów uzwojeń maszyn elektrycznych wirujących.



Rys. 3.10 Liczba impulsów N (a) oraz stosunek $N_{\text{symulacja}}/N_{\text{pomiar}}$ (b) dla $\frac{1}{2}$ okresu napięcia zasilającego, w funkcji średnicy wtrąciny d_r (grubość wtrąciny $d_z = 0.4$ mm), dla trzech poziomów napięć (U_0 , $1.25 \cdot U_0$, $1.50 \cdot U_0$) oraz częstotliwości $f = 50$ Hz

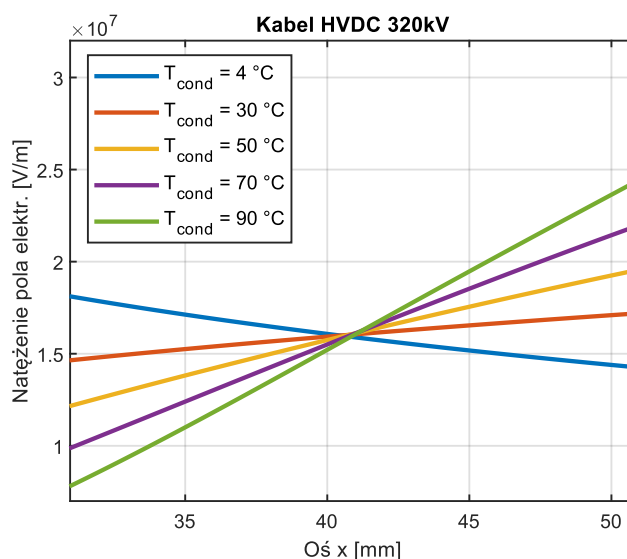


Rys. 3.11 Średni ładunek Q_{avg} (a) oraz stosunek $Q_{\text{symulacja}}/Q_{\text{pomiar}}$ (b) w funkcji średnicy wtrąciny d_r (grubość wtrąciny $d_z = 0.4$ mm), dla trzech poziomów napięć (U_0 , $1.25 \cdot U_0$, $1.50 \cdot U_0$) oraz częstotliwości $f = 50$ Hz

4. Długoterminowa niezawodność kabli *HVDC* jest ściśle związana z technologią ich wytwarzania, w szczególności z jakością wytwarzania warstw ekranów półprzewodzących oraz izolacji głównej. Determinuje to obecność i rozmiary defektów mających postać inkluzji gazowych zamkniętych w materiale izolacyjnym. Rozkład natężenia pola elektrycznego w kablach *DC*, w stanie ustalonym, a więc podczas normalnej pracy, jest warunkowany przewodnością elektryczną dielektryka, która jest silnie zależna od temperatury oraz od natężenia pola E . Dzięki opracowaniu modelu numerycznego kabla *HVDC* z izolacją z polietylenu sieciowanego *XLPE*, implementującą sprzężoną analizę elektro-termiczną w programie COMSOL, badano wpływ napięcia, geometrii kabla oraz temperatury żyły (warun-

kującej parametry pola temperatury w izolacji kabla) na rozkład natężenia pola elektrycznego w jego izolacji, dla 3 konstrukcji kabli. Następnie, określono wartości współczynnika wzmocnienia pola w sferycznych inkluzjach gazowych zlokalizowanych na promieniu w izolacji każdego z kabli oraz, stosując ponownie współpracę programu Matlab z programem COMSOL, wygenerowano sekwencje czasowe impulsów w_{nz} , zmieniając wymienione parametry modelu oraz położenie inkluzji na promieniu każdego z analizowanych modeli kabla. Na tej podstawie można wyciągnąć następujące wnioski:

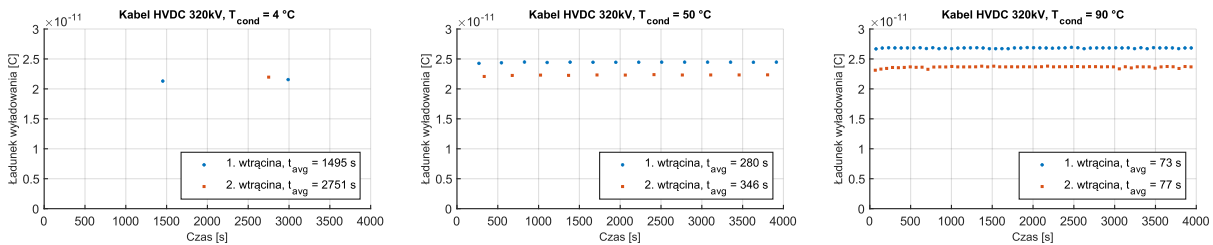
- Stopień obciążenia kabla, czyli w efekcie - temperatura żyły, oraz zewnętrzne warunki jego chłodzenia mają zasadniczy wpływ na powstający w izolacji kabla gradient temperatury na promieniu kabla.
- Zmiana temperatury *XLPE* powoduje zmianę jego przewodności/rezystywności. Obszar izolacji, w którym panuje wyższa temperatura, charakteryzuje się wyraźnie wyższą przewodnością, a więc niższą rezystywnością.
- Zmiana rezystywności *XLPE* skutkuje modyfikacją natężenia pola E na promieniu kabla *HVDC*. Przy rosnącym gradiencie temperatury w izolacji kabla możliwe jest zjawisko inwersji rozkładu pola elektrycznego na promieniu kabla (Rys. 3.12). Wówczas natężenie pola E ma wyższą wartość w zewnętrznych warstwach izolacji aniżeli w obszarze przy żyły kablowej.



Rys. 3.12 Rozkład natężenia pola $E(x)$ w izolacji kabla, przy temperaturach żyły kabla 4°C , 30°C , 50°C , 70°C i 90°C dla kabla *HVDC* 320 kV

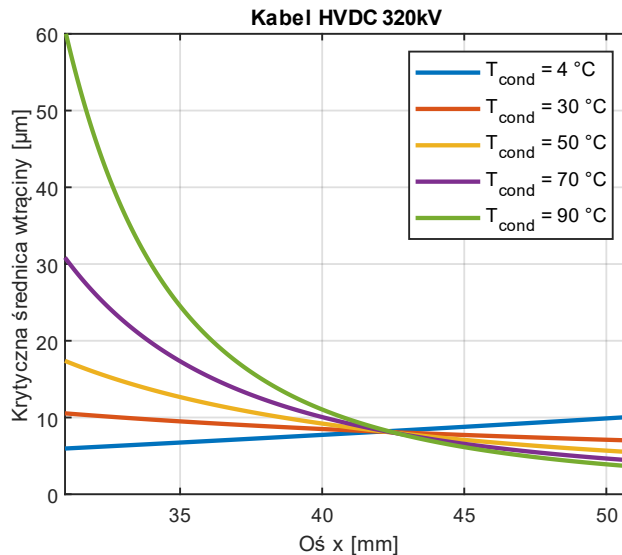
- Aktualne (chwilowe) natężenie pola E oraz natężenie pola zapłonu w_{nz} E_{inc} w inkluzjach gazowych, w izolacji kabla, są zależne od warunków otoczenia. Z tego powodu powstawanie wyładowań oraz ich parametry, w tym intensywność zależą od wielu współzależnych czynników. Pole temperatury występujące w izolacji *XLPE* obciążonego kabla *HVDC* w istotnym stopniu modyfikuje parametry impulsów wyładowań niezupełnych w inkluzjach gazowych.

- Wzrost temperatury izolacji powoduje wzrost wartości ładunku impulsów wyładowań niezupełnych generowanych w inkluzji gazowej oraz skrócenie odstępów czasu pomiędzy kolejnymi impulsami *wnz* (Rys. 3.13). Oznacza to wzrost energii wydzielanej w inkluzjach gazowych w efekcie działania wyładowań, co jest niekorzystne z punktu widzenia rozwoju procesów destrukcyjnych w strukturze izolacji polimerowej.



Rys. 3.13 Symulowane sekwencje czasowe impulsów wyładowań niezupełnych, przy temperaturach żyły kabla 4°C, 50°C i 90°C dla kabla *HVDC* 320 kV

- Uwzględniając analizowane czynniki fizyczne, warunkujące powstawanie wyładowań w sferycznych inkluzjach gazowych, w izolacji *XLPE* modelowanych kabli *HVDC*, oszacowano dla nich rozmiary krytyczne inkluzji gazowych, dla pracy przy napięciu znamionowym, dla różnych temperatur żyły kablowej (*rozmiar krytyczny* - minimalny rozmiar wtrąciny gazowej w izolacji, dla której w określonych warunkach spełnione jest kryterium połowe inicjacji *wnz*). Efektem tego oszacowania są przykładowe dane zawarte na wykresie przedstawionym na Rys. 3.14.



Rys. 3.14 Szacowana krytyczna średnica sferycznej inkluzji gazowej d_{cr} w funkcji współrzędnej x , przy temperaturach żyły kabla 4°C, 30°C, 50°C, 70°C i 90°C dla kabla *HVDC* 320 kV

Biorąc pod uwagę całość wniosków wynikających z przeprowadzonego programu badań można uznać, że osiągnięty został jej cel, a także udowodniona została postawiona przez autora teza rozprawy. Wykonane symulacje numeryczne pozwalają lepiej interpretować i rozumieć wpływ poszczególnych czynników warunkujących powstawanie *wnz* w inkluzjach gazowych na ich parametry. W szczególności, wyniki pomiarów na modelach fizycznych, dla inkluzji o dużej powierzchni, odniesione do wyników symulacji numerycznych, pozwoliły na sformułowanie wniosku o podziale ładunku zgromadzonego w inkluzji na kilka niezależnych impulsów wyładowań niezupełnych.

Prace związane z tematyką badań przedstawionych w rozprawie oraz nabyta wiedza i umiejętności zostały wykorzystane podczas przygotowania kilku publikacji konferencyjnych oraz artykułów w czasopiśmie naukowych [9, 14, 15, 16, 23, 24, 25], a opracowane dla analizy sprzężonych pól elektro-termicznych procedury symulacyjne zostały zastosowane również dla analizy procesów transportu nanocząstek w procesie elektroforetycznej modyfikacji właściwości dielektrycznych nanokompozytów epoksydowych [3].

Niniejsza rozprawa swoim zakresem nie wyczerpuje tematyki badań związanych z zastosowaniem numerycznych metod symulacyjnych dla analizy powstawania i rozwoju wyładowań niezupełnych. Dalsze prowadzone i planowane badania autora w tym kierunku obejmują:

- 1) Analizę wpływu temperatury żyły kablowej na powstawanie i parametry impulsów wyładowań niezupełnych w inkluzjach gazowych, w izolacji kabli AC.
- 2) Rozwinięcie badań dotyczących wpływu geometrii elektrod na rozkład i wartości natężenia pola elektrycznego na ich krawędziach i w izolacji, w kontekście inicjowania rozwoju wyładowań niezupełnych.
- 3) Dalszy rozwój opracowanego modelu polowego *wnz* w programach Matlab i COMSOL, który będzie uwzględniał występowanie podziału ładunku zgromadzonego w rozległej inkluzji płaskiej na wyładowania w wielu kanałach oraz przy różnych kształtach napięcia probierczego.
- 4) Rozwój modelu *wnz* dla kabli HVDC, pozwalający na uwzględnienie wpływu ładunku przestrzennego w objętości izolacji oraz na powierzchniach granicznych, a także dla analizy *wnz* w takich układach dla stanów nieustalonych, wynikających np. z odwrócenia polarności napięcia (jak ma to miejsce w systemach przesyłowych HVDC typu LCC).

Bibliografia autoreferatu

- [1] T. Boczar, *Analiza zakłóceń w pomiarach akustycznych wyladowań niezupełnych*. Opole: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2010.
- [2] T. Boczar, *Obiektywizacja wyników akustycznej metody oceny wyladowań niezupełnych przy zastosowaniu do opisu sygnałów analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania*. Opole: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2003.
- [3] A. Dąda, P. Błaut, P. Mikrut, M. Kuniewski, and P. Zydrón, "Control of Dielectric Parameters of Micro- and Nanomodified Epoxy Resin Using Electrophoresis," *Energies*, vol. 17, no. 5: 1095, 2024.
- [4] J. Densley, "Ageing mechanisms and diagnostics for power cables - an overview," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 17, no. 1, pp. 14-22, 2001.
- [5] J. Densley, R. Bartnikas, and B.S. Bernstein, "Multi-stress ageing of extruded insulation systems for transmission cables," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 15-17, 1993.
- [6] L.A. Dissado and J.C. Fothergill, *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. Chicago, IL, USA: Peregrinus Press, 1992.
- [7] B. Florkowska, M. Florkowski, R. Włodek, and P. Zydrón, *Mechanizmy, pomiary i analiza wyladowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. Warszawa: Wydawnictwo IPPT PAN, 2001.
- [8] M. Florkowski, *Partial discharges in high-voltage insulating systems : mechanisms, processing and analytics*. Kraków: Wydawnictwa AGH, 2020.
- [9] M. Florkowski, M. Kuniewski, and P. Mikrut, "Effects of mechanical transversal bending of power cable on partial discharges and dielectric-loss evolution," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2024.
- [10] IEC 60270:2000+A1:2015 High-voltage test techniques - Partial discharge measurements, 2015.
- [11] IEC TS 62478:2016 High voltage test techniques – Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods, IEC Technical Specification, IEC, Geneva, 2016.
- [12] V. Madonna et al., "Thermal overload and insulation aging of short duty cycle, aerospace motors," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 67, no. 4, pp. 2618-2629, 2019.
- [13] C. Maninder et al., "A review of aging models for electrical insulation in power cables," *Energies*, vol. 15, no. 9, p. 3408, 2022.
- [14] P. Mikrut and P. Zydrón, "Partial discharge modeling in a gaseous inclusion located on the radius of a loaded HVDC XLPE cable," in *Proceedings of the XVII Conference Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE 2023)*, Kościelisko, Poland, 2023.
- [15] P. Mikrut and P. Zydrón, "Modelowanie numeryczne i analiza warunków powstawania wyladowań niezupełnych w defektach układów izolacyjnych wysokiego napięcia," *ZN Wydziału EiA Politechniki Gdańskiej*, no. 46, pp. 77-80, 2015.
- [16] P. Mikrut and P. Zydrón, "Numerical modeling of PD pulses formation in a gaseous void located in XLPE insulation of a loaded HVDC cable," *Energies*, vol. 16, p. 6374, 2023.
- [17] G.C. Montanari, P. Seri, and L.A. Dissado, "Aging mechanisms of polymeric materials under DC electrical stress: A new approach and similarities to mechanical aging," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 26, pp. 634–641, 2019.
- [18] G.C. Montanari and L. Simoni, "Aging phenomenology and modeling," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 28, no. 5, pp. 755-776, 1993.

- [19] C. Pan, G. Chen, J. Tang, and K. Wu, "Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 3, pp. 981-1000, June 2019.
- [20] G.C. Stone, E.A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. Milwaukee, WI, USA: Wiley-IEEE Press, 2004.
- [21] G.C. Stone, A. Cavallini, and G. Behrmann, "A review of the history of the development of partial discharge testing," in *2022 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Knoxville, TN, USA, 2022, pp. 85-89.
- [22] P. Zydrón, *Sygnały probiercze i pomiarowe w technice wysokich napięć i diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych*. Kraków: Wydawnictwa AGH, 2011.
- [23] P. Zydrón, M. Bonk, J. Roehrich, P. Mikrut, and B. Szafraniak, "Application of the Extended Phase-Resolved PD Patterns for Analysis of PD Activity in Epoxy Resin Insulation," in *2018 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, Koscielisko, Poland, 2018, pp. 1-4.
- [24] P. Zydrón, J. Roehrich, and P. Mikrut, "Analiza teoretyczna i modelowanie wpływu harmonicznego napięcia na powstawanie wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia," *ZN Wydziału EiA Politechniki Gdańskiej*, no. 51, pp. 225-228, 2016.
- [25] P. Zydrón, J. Roehrich, P. Mikrut, and M. Bonk, "Wyładowania niezupełne w wybranych układach modelowych oraz analiza numeryczna warunków polowych ich powstawania," *ZN Wydziału EiA Politechniki Gdańskiej*, no. 57, pp. 165-170, 2017.