

ZAŁĄCZNIK 2

Autoreferat¹

Krzysztof Walczak
Wydział Elektryczny, Politechnika Poznańska

Poznań, 2018

¹ Przygotowany w oparciu o wzór Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów

1. Imię i nazwisko:

Krzysztof Walczak (data urodzenia: 01.10.1973)

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania

- dyplom magistra inżyniera: Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, specjalność: Inżynieria Wysokich Napięć, 1997 r., praca dyplomowa pt.: „Zastosowanie mostka Scheringa P 5026 w układzie niskonapięciowym do badań materiałowych”, promotor: dr inż. Ryszard Dobroszewski
- stopień doktora nauk technicznych: Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, dyscyplina naukowa: Elektrotechnika, 28.09.2001 r., „Zależność zjawisk przedwyładowczych natury elektronowej emisji polowej od ciśnienia gazów resztkowych w komorze próżniowej”, promotor: prof. dr hab. inż. Hanna Mościcka-Grzesiak

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- **1.10.1997 - 30.09.2001** – studia doktoranckie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej, doktorant w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, Instytut Elektroenergetyki, Wydział Elektryczny Politechniki Poznańskiej
- **1.10.2000 - 30.09.2001** – asystent w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, Instytut Elektroenergetyki, Wydział Elektryczny Politechniki Poznańskiej
- **1.10.2001 - 30.09.2014** – adiunkt w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, Instytut Elektroenergetyki, Wydział Elektryczny Politechniki Poznańskiej
- **od 01.10.2014** – starszy wykładowca w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, Instytut Elektroenergetyki, Wydział Elektryczny Politechniki Poznańskiej

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Osiągnięciem w rozumieniu wymienionej wyżej ustawy jest monografia wydana w 2018 roku przez Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Tytuł rozprawy brzmi:

***Zastosowanie bezkontaktowych czujników pojemnościowych
w badaniach i diagnostyce
wysokonapięciowych układów izolacyjnych***

b) Informacje formalne

Monografia habilitacyjna została wydana nakładem Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej w 2018 roku. Liczy ona łącznie 181 stron oraz 256 pozycji literaturowych.

Rozdział 2, stanowiący około 10% monografii (17 stron), jest przeglądem literaturowym opisującym możliwości zastosowania czujników bezkontaktowych, których działanie oparte jest na istnieniu sprzężenia elektromagnetycznego między nimi a obiektem badań, w różnego rodzaju aplikacjach w elektroenergetyce. Przegląd ten miał stanowić wprowadzenie dla opisu osiągnięć habilitanta. Pokazano w nim aktualny stan wiedzy o czujnikach oraz przedstawiono perspektywy ich rozwoju.

Rozdział 3, stanowiący około 17% monografii (31 stron), przedstawia właściwości sondy pojemnościowej, której wykorzystanie było przedmiotem prac prowadzonych przez habilitanta. W rozdziale tym, po krótkim wprowadzeniu pokazującym konstrukcje czujników stosowane obecnie na świecie, opisano oryginalne rozwiązania zaproponowane przez autora. Następnie przedstawiono wyniki badań najważniejszych właściwości skonstruowanych czujników. Opisane w tej części pracy badania były niezbędne dla określenia obszarów zastosowania czujników i stały się podstawą opracowania przez autora nowych metod i algorytmów diagnostycznych.

Rozdziały 4. i 5. zawierają opis najważniejszych osiągnięć naukowych i aplikacyjnych habilitanta i zajmują około 63% objętości monografii (odpowiednio 82 i 33 strony). W rozdziale 4 przedstawiono zagadnienia związane z szeroko pojętą problematyką pomiaru i analizy sygnałów generowanych przez wyładowania niepełne w różnego rodzaju układach izolacyjnych urządzeń wysokonapięciowych. Celem prowadzonych badań było opracowanie metod pomiarowych i analitycznych, które pozwalają, w nowatorskim ujęciu, na detekcję wyładowań niepełnych, identyfikację rodzaju defektu izolacji i jego lokalizację. W rozdziale 5 przedstawiono z kolei możliwości pomiaru parametrów kształtu przebiegu wysokiego napięcia przemiennego lub udarowego, głównie amplitudy lub wartości szczytowej napięcia, oraz parametrów czasowych. Celem było opracowanie wygodnej i uniwersalnej metody, która byłaby alternatywą dla metod obecnie stosowanych i wymagających galwanicznego połączenia układu pomiarowego z obiektem pod napięciem. Szczegółowy opis osiągnięć uzyskanych przez habilitanta, ze względu na ich znaczenie dla postępowania habilitacyjnego, zostanie zawarty w kolejnym podpunkcie 4c wniosku.

Rozdziały 4. i 5 zostały w całości opracowane na podstawie własnych wyników badań, obliczeń i analiz, a przedstawione koncepcje nowych metod i algorytmów są autorstwa habilitanta.

Habilitant ubiegał się w 2014 roku o nadanie stopnia doktora habilitowanego (informację o przebiegu postępowania habilitacyjnego zamieszczono w **Załączniku 8**). W związku z tym poniżej przedstawione zostały zmiany dokonane w monografii opublikowanej w roku 2018. Habilitant deklaruje, że:

- 1) opublikowana w 2018 roku monografia została w znaczący sposób zmodyfikowana, zarówno co do struktury, jak i treści, w stosunku do monografii z roku 2012,
- 2) dodano nowe, obszernie i nieopublikowane fragmenty (45% objętości całej pracy) oraz poprawiono i przereklamowano w znaczący sposób pozostałą część (30% całej objętości pracy),
- 3) opisano osiągnięcia o charakterze aplikacyjnym, w tym autorskie programy komputerowe,
- 4) zaktualizowano i znacząco poszerzono literaturę,
- 5) w związku z powyższym zmieniony został tytuł monografii.

c) Opis osiągnięcia naukowego

c.1. Wprowadzenie – uzasadnienie i zakres podjętej tematyki

Rozprawa pt. „Zastosowanie bezkontaktowych czujników pojemnościowych w badaniach i diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych” dotyczy zagadnień z pogranicza dwóch dziedzin elektrotechniki: inżynierii wysokich napięć oraz metrologii. Habilitant podjął się trudnego zadania zastosowania metody pomiaru sygnału niskonapięciowego rejestrowanego za pośrednictwem bezkontaktowego czujnika pojemnościowego do badania i diagnostyki urządzeń wysokonapięciowych, które z racji charakteru swojej pracy są źródłem silnego pola elektromagnetycznego oraz różnego rodzaju zaburzeń. Prowadzone z wykorzystaniem sondy pojemnościowej badania obejmowały pięć grup zagadnień niżej wymienionych:

- **detekcja impulsów wyładowań niepełnych z wykorzystaniem sond pojemnościowych,**
- **identyfikacja defektów układu izolacyjnego w oparciu o analizę czasową impulsów wyładowań niepełnych,**
- **identyfikacja defektów układu izolacyjnego z wykorzystaniem analizy sygnału w dziedzinie częstotliwości,**
- **lokalizacja źródła wyładowań niepełnych z wykorzystaniem skojarzonych sond pojemnościowych,**
- **bezkontaktowy pomiar napięcia przemiennego i udarowego w warunkach laboratoryjnych i polowych,**
- **detekcja asymetrii i zwarć w sieciach rozdzielczych z wykorzystaniem układu bezkontaktowych sond pojemnościowych.**

Obiektami badań habilitanta były głównie **układy izolacyjne próżniowe** typowe dla wyłącznika próżniowego oraz **izolacja papier-olej** stanowiąca układ izolacyjny transformatora energetycznego. Opanowanie technik pomiarowych opartych na wykorzystaniu sond pojemnościowych umożliwiających zdalne śledzenie sygnałów, pozwoliło habilitantowi na prowadzenie badań w zakresie analizy zjawisk przedprzeskokowych w wymienionych układach izolacyjnych poddanych naprężeniom elektrycznym, na ocenę dynamiki procesów starzeniowych zachodzących w urządzeniach elektroenergetycznych, a w dalszej kolejności na opracowanie koncepcji z zakresu detekcji, identyfikacji i lokalizacji uszkodzeń urządzeń elektroenergetycznych oraz algorytmów oceny stopnia ich zdefektowania.

Tematyka powyższa znajduje się w centrum zainteresowania naukowców nieprzerwanie do wielu lat, ale pojawienie się i dynamiczny rozwój tzw. metod niekonwencjonalnych (do których zalicza się metodę wykorzystującą czujnik pojemnościowy – zgodnie z nomenklaturą broszury CIGRE [1]) pozwala wyjść naprzeciw wyzwaniom współczesnej elektroenergetyki. Czujnik pojemnościowy bowiem to element detekcyjny umożliwiający prowadzenie pomiarów w sposób ciągły (on-line) i w miejscu zainstalowania urządzenia el-en (on-site), a zatem pozwalający na bieżącą ocenę jego stanu w trakcie eksploatacji. Obserwowany od około trzydziestu lat intensywny rozwój tego typu diagnostyki wiąże się przede wszystkim z dokonującą się stopniowo zmianą strategii zarządzania majątkiem sieciowym z tradycyjnej, opartej na badaniach okresowych (TBM – *Time Based Maintenance*), na prewencyjną, opartą na bieżącej ocenie stanu technicznego urządzenia (CBM – *Condition Based Maintenance*). To z kolei jest odpowiedzią na nieuchronnie postępujące starzenie się infrastruktury systemu elektroenergetycznego i wzrastające tym samym niebezpieczeństwo występowania groźnych jego awarii. Dodatkowo warto zauważyć, że ze względu na stopniową automatyzację systemu elektroenergetycznego (przechodzenie na bezobsługowe stacje transformatorowe) oraz rozbudowę jego infrastruktury, przede wszystkim na poziomie dystrybucji energii elektrycznej, przy jednoczesnej tendencji do dynamicznego wdrażania strategii sieci inteligentnych (tzw. *Smart Grid*), czyli układów silnie

zautomatyzowanych i opomiarowanych, należy spodziewać się w najbliższym czasie wzrostu zainteresowania technologiami, które pozwalają na nieinwazyjną i zdalną kontrolę funkcjonowania systemu.

Podsumowując, należy stwierdzić, że opisana wyżej tematyka pozostaje wciąż aktualna. Kolejne doniesienia literaturowe niezmiennie wskazują na istnienie obszarów, w których prowadzenie dalszych badań naukowych jest po prostu koniecznością. Potwierdzeniem powyższej tezy jest chociażby konkluzja zawarta w broszurze grupy roboczej CIGRE D1.29 opublikowanej w roku 2017 p.t. „*Partial discharges in transformers*”, w której autorzy stwierdzają, że „Pomimo dużej liczby praktycznych przykładów wykrycia i zlokalizowania defektów, [...] jednoznaczna identyfikacja niebezpiecznych źródeł wnz działających w układzie elektro-izolacyjnym transformatora energetycznego pozostaje nadal tematyką, która powinna być kontynuowana w dalszych badaniach” [2].

c.2. Badanie wylądowań niezupełnych w aspekcie oceny stanu układu izolacyjnego

c.2.1. Wstęp

W układach wysokonapięciowych, w których występuje duże natężenie pola elektrycznego, bardzo często dochodzi do zapłonu wylądowań niezupełnych (wnz). Oddziałując na układ izolacyjny w sposób ciągły, powodują one wiele niekorzystnych zjawisk, które mogą doprowadzić do przebicia izolacji, a zatem uszkodzenia urządzenia. Stąd pomiary wylądowań niezupełnych w wysokonapięciowych układach izolacyjnych weszły na stałe do podstawowych procedur oceny ich stanu, będąc często elementem testów kontrolnych, które decydują o dopuszczeniu danego urządzenia do eksploatacji.

Wylądowania niezupełne mogą przyjmować różne formy w zależności od konfiguracji układu, użytych materiałów i rodzaju defektu (np. wylądowania w szczelinach gazowych, powierzchniowe, ślizgowe, drzewiaste). Ponadto mogą mieć różną dynamikę zmian w czasie. Problematyka pomiaru wnz nie sprowadza się tylko do wyznaczenia wartości wybranych wielkości, ale również do określenia ich wzajemnych korelacji oraz zmian w czasie. Do tego celu wykorzystuje się coraz bardziej zaawansowane techniki analityczne. Uzyskane w ten sposób bogate spektrum informacji pozwala na realizację następujących zadań:

- określenie stopnia degradacji układu izolacyjnego,
- określenie dynamiki i tendencji rozwoju procesów degradacji izolacji,
- identyfikację rodzaju defektu odpowiedzialnego za generowanie wnz,
- lokalizację defektu będącego źródłem wnz.

Do standardowych technik wykorzystywanych w pomiarach wnz należy zaliczyć przede wszystkim metody elektryczne, które pozwalają wyznaczyć wartość tzw. ładunku pozornego zgodnie ze ściśle określoną procedurą pomiarową [3-5]. Inne rozwijane obecnie metody o bardzo ciekawych możliwościach aplikacyjnych, to metoda akustyczna i metoda wysokiej i ultrawysokiej częstotliwości (VHF i UHF), w której jako detektor wylądowań wykorzystuje się sondę pojemnościową [6].

Zastosowanie technik VHF/UHF nie pozwala na precyzyjne określenie poziomu wylądowań niezupełnych ze względu na niemożność skalowania sygnału, jak ma to miejsce w metodach elektrycznych, ale dzięki nim uzyskuje się na przykład informację o częstości wylądowań w danym przedziale czasu, dynamice zmian ich amplitudy i liczby, co umożliwia ocenę stopnia degradacji układu i tendencji rozwoju danego defektu (dzięki ciągłemu monitoringowi). Pozwalają one także na badanie kształtu i widma impulsów prądowych lub napięciowych wnz, co z kolei umożliwia identyfikację defektów i ich lokalizację.

Badania prowadzone przez habilitanta były ukierunkowane na analizę zjawisk związanych z generowaniem wylądowań niezupełnych, a w szczególności na poszukiwanie wielkości, które pozwolą opracować nowe wiarygodne sposoby identyfikacji i lokalizacji defektów układów izolacyjnych. Uzyskane w tych obszarach wyniki są jego głównym

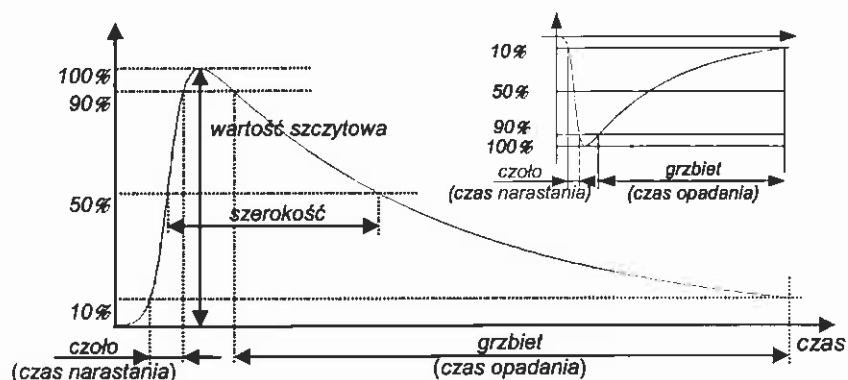
osiągnięciem naukowym i stanowią zarazem istotny wkład w rozwój tej dziedziny w wymiarze światowym.

c.2.2. Identyfikacja defektów układu izolacyjnego

Obecnie można zauważyć dynamiczny rozwój metod identyfikacji defektów układu izolacyjnego na podstawie oceny parametrów zarejestrowanych impulsów wnz, histogramów ich intensywności czy przebiegów czasowych i widm częstotliwościowych. Metody rozpoznawania defektów opierają się na założeniu, udokumentowanym wieloma badaniami, że defekty o różnym charakterze (pojawiające się w różnych miejscach układu izolacyjnego) generują specyficzne, ale powtarzalne impulsy wnz. Powtarzalność tego zjawiska może być opisana parametrami pojedynczego impulsu (ładunek, kształt) lub grupy impulsów (parametry statystyczne rozkładów), wtedy aktywność zjawiska wiąże się dodatkowo z innymi wielkościami, np. z kątem fazowym napięcia. Charakterystyczne parametry, zebrane na ogół na podstawie badań laboratoryjnych wykonywanych w układach modelowych, tworzą bazę danych, tzw. wzorzec, często nazywany „odciskiem palca” (*Finger Print*), który następnie służy do analizy porównawczej w procesie rozpoznawania defektu. Proces porównywania nieznanego defektu z bazą wzorców może odbywać się w sposób uproszczony (przez sprawdzenie, czy parametry nieznanego defektu pokrywają się z parametrami któregoś ze wzorców) lub z wykorzystaniem zaawansowanych algorytmów klasyfikujących (sieci neuronowych, algorytmów genetycznych itd.) [7-14].

Dostępne metody rozpoznawania defektów nie zawsze dają jednoznaczne wyniki, szczególnie w sytuacji współistnienia w układzie izolacyjnym kilku defektów, co stanowiło przyczynę podjęcia badań przez habilitanta w tej dziedzinie.

Analizując zagadnienie habilitant postawił tezę, że kształt impulsów prądowych wnz rejestrowanych za pośrednictwem czujnika pojemnościowego jest charakterystyczny dla danego typu defektu izolacji i powtarzalny, zgodnie z definicją powtarzalności przyjętą w analizie statystycznej. Na pierwszym etapie badań jako obiekt testowy wybrano układ izolacyjny komory próżniowej, w którym zamodelowano trzy typowe defekty generujące charakterystyczne wyładowania niezupełne, czyli: wyładowania zabrudzeniowe na powierzchni zewnętrznej osłony izolacyjnej (defekt 1), mikrowyładowania między nakładkami stykowymi w próżni (defekt 2) oraz mikrowyładowania wynikające z procesu odpylania cząstek metalicznych z powierzchni wewnętrznej osłony ceramicznej (defekt 3). Parametrami wytypowanymi do opisu kształtu pojedynczego impulsu były: czas narastania, czas opadania oraz szerokość impulsu, które były definiowane zgodnie z rysunkiem 1. **Procedura taka jest kwalifikowana jako analiza w dziedzinie czasu.**

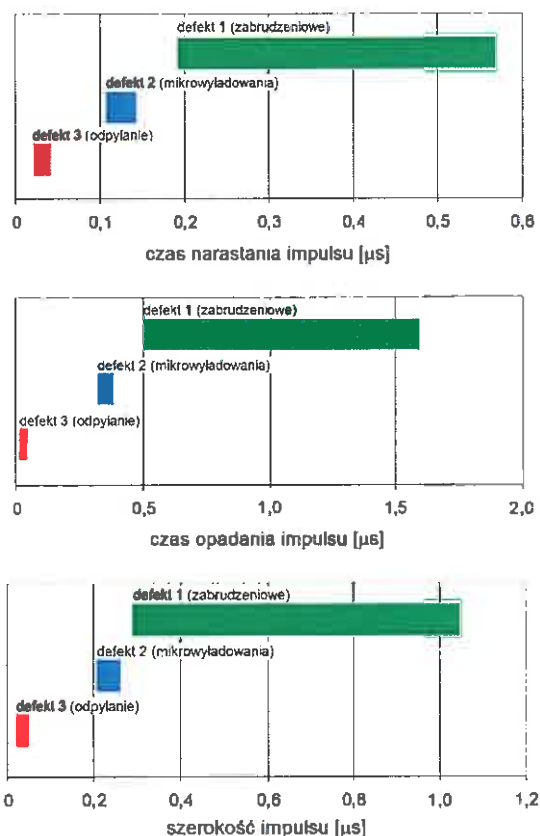


Rys. 1. Parametry charakteryzujące kształt dodatniego i ujemnego impulsu prądowego

Ocenę powtarzalności przeprowadzono według zaleceń zawartych w normie [15]. Testy powtarzalności dały pozytywny wynik, a otrzymane parametry uzyskane na próbie licznej ($n \geq 30$), przyjmując wartość poziomu istotności równą 0,001, wykazywały rozrzuty na

poziomie 10-20% względem wartości średniej. Przedziały ufności poszczególnych parametrów czasowych dla zamodelowanych defektów przedstawiono na rysunku 2.

Na podstawie porównania otrzymanych wyników stwierdzono, że dla żadnego z rozpatrywanych parametrów czasowych, przy założonym bardzo wysokim prawdopodobieństwie 99,9%, przedziały wartości wybranych wielkości charakteryzujących poszczególne defekty nie nakładają się na siebie. Zatem każdy z parametrów opisujących impuls wnz w sposób jednoznaczny identyfikuje defekt, który jest jego źródłem. Oznacza to, że **analiza parametrów czasowych impulsów wyładowań niezupełnych może stanowić podstawę do identyfikacji defektów komory gaszeniowej wyłącznika próżniowego**. Dalsze badania, przeprowadzone na układach, w których zamodelowano dwa defekty działające równocześnie, pokazały dodatkowo, że opracowany algorytm identyfikacji defektów na podstawie oceny parametrów czasowych impulsów wnz pozwala na wiarygodne rozpoznanie nawet w sytuacji defektów działających łącznie, co jest bardzo istotnym osiągnięciem.

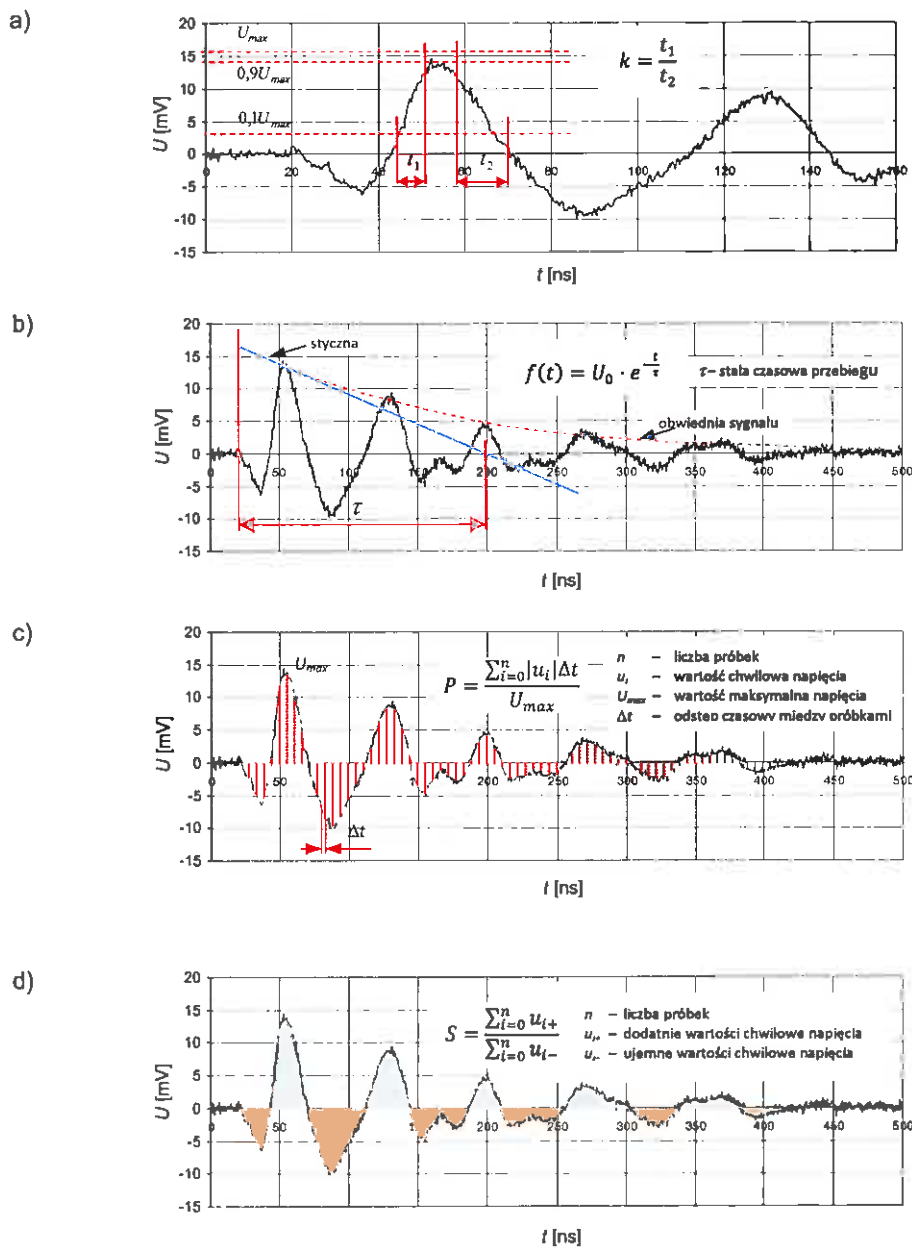


Rys. 2. Porównanie przedziałów ufności poszczególnych parametrów czasowych opisujących kształt impulsów wnz generowanych przez badane defekty komory wyłącznika próżniowego

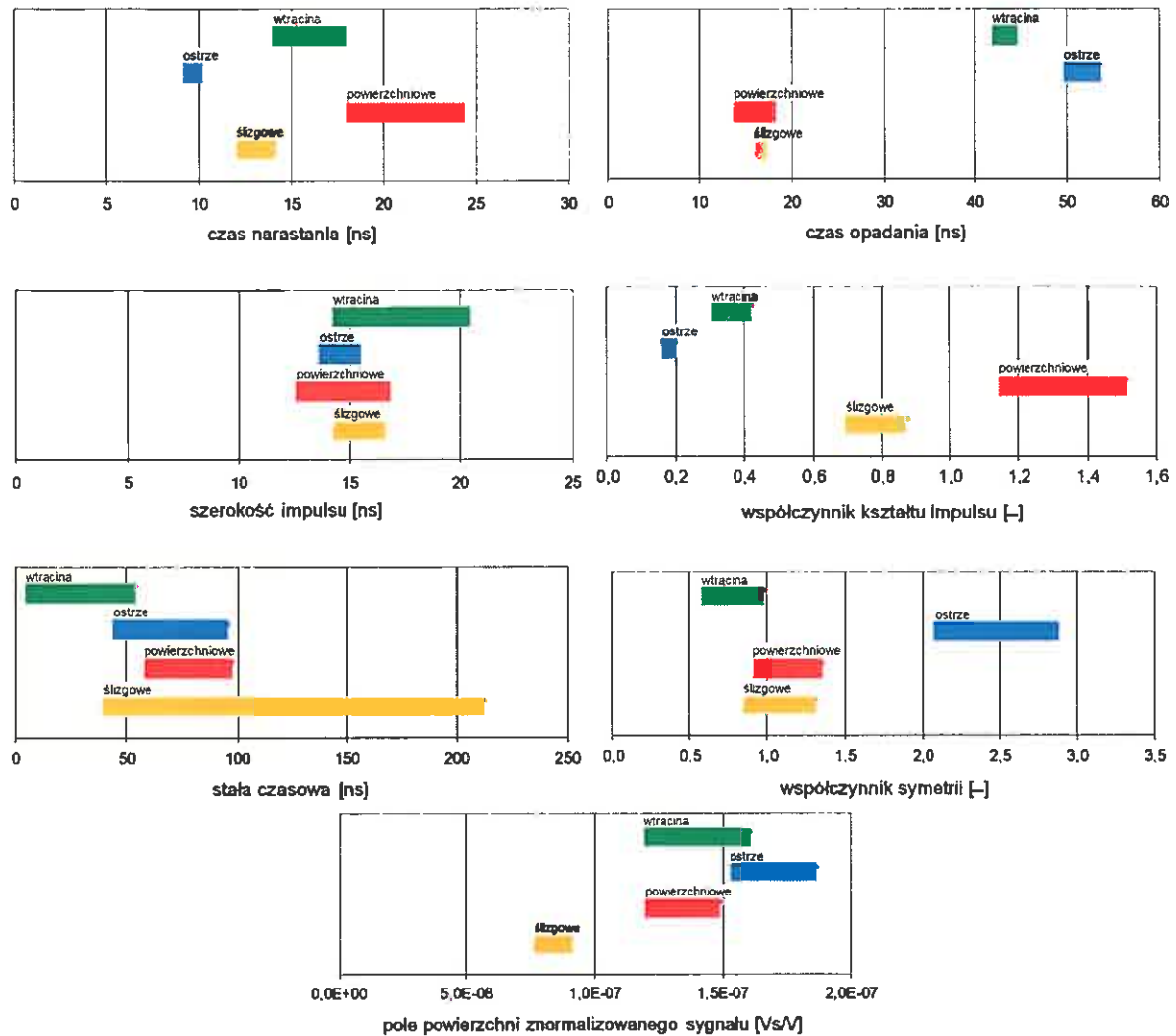
Bardzo dobre wyniki badań uzyskane w układzie izolacyjnym komory próżniowej stały się podstawą do adaptacji opracowanego algorytmu identyfikacji defektów w zakresie oceny innych mediów izolacyjnych, z których najistotniejszym był układ izolacyjny papier-olej, typowy dla konstrukcji transformatorów energetycznych.

Habilitant zamodelował typowe zjawiska powstające w zdefektowanej izolacji papierowo-olejowej, czyli wyładowanie we wtrącinie gazowej, wyładowanie z ostrza w oleju, wyładowanie powierzchniowe oraz wyładowanie ślizgowe. Stosując dokładnie taką samą procedurę badawczą oraz analizę statystyczną jak w przypadku układu izolacyjnego próżniowego uzyskano wysoką powtarzalność, ale otrzymane zakresy poszczególnych parametrów czasowych wyznaczone dla badanych defektów częściowo lub nawet całkowicie się pokrywały, co sprawiło, że wynik identyfikacji defektów był w przypadku tego typu izolacji niejednoznaczny (w pewnych sytuacjach algorytm wskazywał z wysokim prawdopodobieństwem istnienie defektu, który nie występował). W celu wprowadzenia

znaczącej poprawy wiarygodności metody habilitant zaproponował rozszerzenie algorytmu identyfikacji o dodatkowe parametry opisujące kształt zarejestrowanych impulsów takie jak: współczynnik kształtu impulsu, stała czasowa przebiegu, pole powierzchni sygnału oraz współczynnik symetrii. Sposób wyznaczania poszczególnych parametrów pokazano na rysunku 3. W efekcie prowadzonych badań uzyskano przedziały ufności poszczególnych parametrów, jak pokazano to na rysunku 4. Wprowadzenie dodatkowych parametrów poprawiło wiarygodność identyfikacji defektu, nadal jednak metoda wykazywała tendencję do rozpoznawania defektów, które z pewnością nie występowały, ze zbyt wysokim prawdopodobieństwem. Kluczowe w prowadzonych badaniach okazało się dopiero wprowadzenie przez habilitanta do bazy wzorców odpowiednich wag. To oryginalne rozwiązanie oparte jest na następujących założeniach. Wyrażony procentowo stopień rozpoznania R , z jakim dany defekt zostanie zidentyfikowany, będzie sumą stopni cząstkowych r_i otrzymanych z porównania każdego parametru z parametrem



Rys. 3. Sposób wyznaczania dodatkowych parametrów opisujących przebiegi czasowe impulsów wnz rejestrowanych przy użyciu sondy: a) współczynnik kształtu impulsu, b) stała czasowa, c) pole powierzchni znormalizowanego sygnału, d) współczynnik symetrii



Rys. 4. Porównanie przedziałów ufności parametrów czasowych opisujących kształt impulsów wnz generowanych przez zamodelowane defekty układu izolacyjnego papier-olej transformatora

w bazie wzorców. Ze względu na fakt, że poszczególne parametry identyfikują z różną jednoznacznością dany defekt, znaczenie informacji uzyskanej w wyniku porównania danego parametru z bazą wzorców, inaczej mówiąc jej waga, jest różne. Wyższą wagę będą miały parametry, których zakresy dla poszczególnych defektów nie pokrywają się, natomiast mniejszą te, których zakresy częściowo na siebie zachodzą. Tworząc bazę wzorców, przyjęto, że waga nadająca znaczenie rozpoznania danego parametru w sumarycznym stopniu rozpoznania danego defektu jest:

- równa 1, gdy zakres parametru dla danego defektu nie pokrywa się z zakresami pozostałych defektów,
- ułamkiem liczby 1, zależnie od liczby defektów n , których zakresy wartości danego parametru nachodzą na siebie, co można zapisać prostą zależnością:

$$w_i = \frac{1}{n} \quad (1)$$

gdzie:

- w_i – waga rozpoznania danego parametru dla badanego defektu,
- n – liczba defektów, których zakresy wartości dla danego parametru się pokrywają.

Po podzieleniu uzyskanej wagi przez sumę wszystkich wag parametrów obliczonych dla danego defektu, uzyskuje się cząstkowy stopień rozpoznania, który wyrażony procentowo można zapisać za pomocą wzoru:

$$r_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^7 w_j} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

r_i – cząstkowy stopień rozpoznania danego parametru dla badanego defektu,

w_i – waga rozpoznania danego parametru dla badanego defektu.

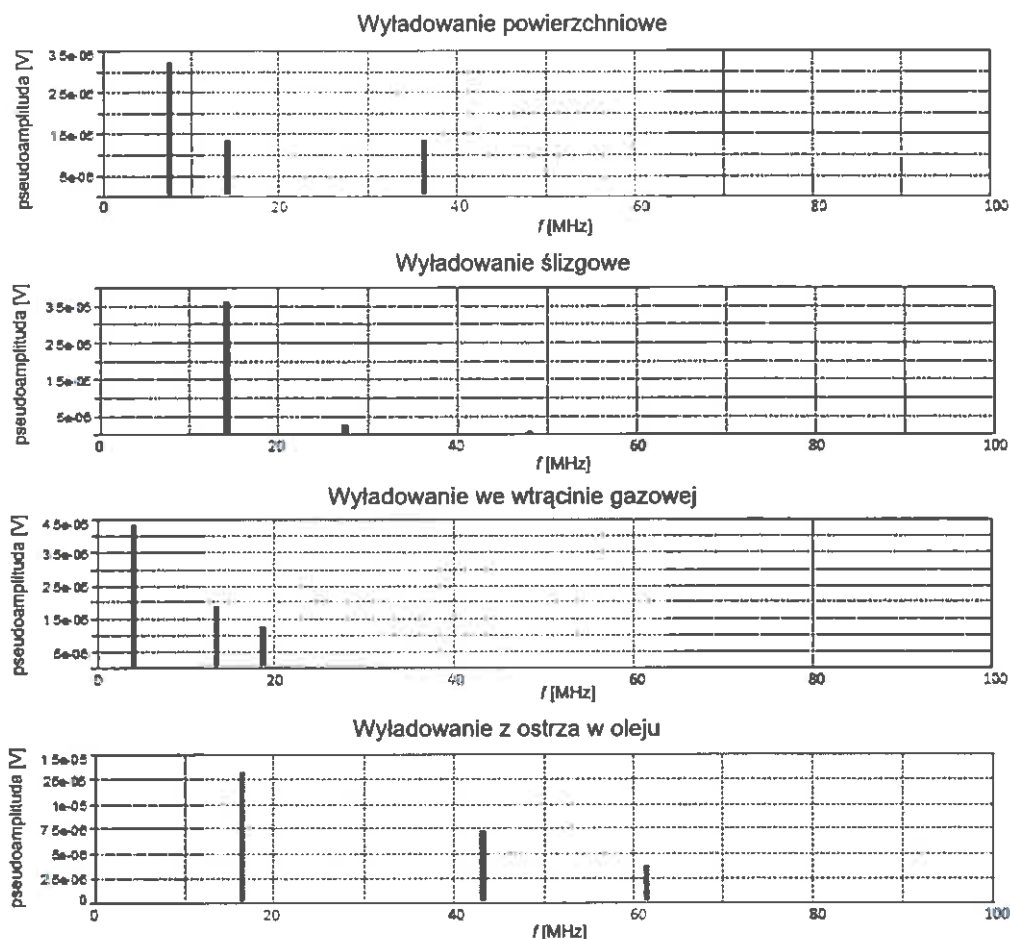
Testy wybranych przypadków, opisane szczegółowo w monografii, potwierdziły, że wprowadzenie wag znacząco poprawia wiarygodność procedury rozpoznawania defektów wpływając przede wszystkim na zmniejszenie (co najmniej dwukrotne) prawdopodobieństwa rozpoznania defektów, które nie występują.

Opracowana metoda identyfikacji defektów w oparciu o parametry czasowe impulsów wnz oraz koncepcja nadania wag poszczególnym parametrom w celu poprawy wiarygodności procedury rozpoznawania defektów jest oryginalnym pomysłem i osiągnięciem habilitanta.

Równoległe z badaniami prowadzonymi w dziedzinie czasu, **sygnał pochodzący od wyładowań niepełnych był również analizowany w dziedzinie częstotliwości**, a także z wykorzystaniem tzw. **rozkładów fazowo-rozdzielczych**, w których impulsy są zliczane w określonym czasie i grupowane ze względu na wartość szczytową oraz kąt fazowy napięcia, przy którym wystąpiły. Tego typu analizy są dosyć powszechnie stosowane przez naukowców zajmujących się metodą VHF i UHF, ponieważ otwierają one możliwości dla prowadzenia bieżącej interpretacji wyników (oceny w czasie rzeczywistym), a zatem mogą być istotnym uzupełnieniem systemów monitorujących pracę wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych. Zainteresowanie habilitanta powyższą tematyką również wynikało z powyższych motywów.

W grupie technik przetwarzania danych w dziedzinie częstotliwości można zastosować obecnie wiele metod analizy, takich jak: przekształcenia z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera FFT (periodogram – metody Welch i Blackmana–Tukeya) [16-18], metody parametryczne (MA – Moving Average, AR – AutoRegressive, ARMA – AutoRegressive-Moving Average) [19-21] i wysokorozdzielcze (Pisarenko, MUSIC – Multiple Signal Classification, ESPRIT – Estimation of Signal Parameters using Rotational Invariance Technique) [22-24]. Habilitant w swoich badaniach zastosował metodę FFT, jako najszybszą a zarazem najprostszą do zaimplementowania w algorytmie automatycznej identyfikacji defektu oraz metodę MUSIC, która z kolei pozwala na precyzyjne określenie pasma częstotliwości charakterystycznych sygnału, nawet silnie zaszumionego. Prezentowane dotąd w licznych publikacjach naukowych opisy widma sygnału wnz (w paśmie UHF) pochodzącego od typowych defektów układu izolacyjnego papier-olej sugerowały, że istnieje związek między pasmami charakterystycznymi widocznymi w widmie a rodzajem defektu, ale były to analizy jakościowe, a nie ilościowe, co głównie wynikało z problemu stosunkowo niskiego poziomu parametru SNR (*Signal to Noise Ratio*) analizowanych sygnałów, co jest charakterystyczne dla tego rodzaju metod. Zaproponowane przez habilitanta podejście pozwoliło w sposób precyzyjny określić zakresy częstotliwości sygnału, które jednoznacznie klasyfikują dany defekt. Ważnym spostrzeżeniem poczynionym na etapie prowadzonych badań było również stwierdzenie, że **istotne z punktu widzenia procedury rozpoznawania defektów jest nie tylko wykrycie obecności danej częstotliwości w rejestrowanym sygnale, ale również wzajemna korelacja między poszczególnymi składowymi widma**. Pokazano to na rysunku 5. Powyższe osiągnięcia o charakterze naukowym pozwoliły opracować bardzo skuteczny algorytm automatycznej identyfikacji defektów (w oparciu o analizę FFT), który następnie został zaimplementowany w opracowanym systemie monitoringu transformatora energetycznego o nazwie PDtracker UHF, co stanowi znaczące osiągnięcie o charakterze aplikacyjnym w dorobku habilitanta.

Algorytm ten będzie wykorzystany w prototypowym urządzeniu do monitoringu transformatorów energetycznych opracowywanym przez zespół Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej wraz z firmą Mikronika (**Załącznik 9**).



Rys. 5. Analiza parametryczna widma sygnałów wnz pochodzących od różnych defektów izolacji papierowo-olejowej przy użyciu metody MUSIC

Badania prowadzone w obszarze rejestracji i analizy tzw. obrazów fazowych wnz również przyniosły znaczące osiągnięcia. Habilitant wykazał, że pomiar wyładowań niepełnych za pośrednictwem sondy pojemnościowej, dokonywany w celu monitorowania dynamiki zmian w czasie tego zjawiska oraz generowania na tej podstawie rozkładów częstościowo-fazowych i częstościowo-amplitudowych, może być alternatywą dla metody tradycyjnej (IEC 60270), której wadą jest konieczność galwanicznego połączenia układu detekcji z obiektem badań. Dodatkowo **habilitant zaproponował bardzo innowacyjne rozwiązanie metrologiczne, w którym krzywa referencyjna napięcia, niezbędna do stworzenia poszczególnych rozkładów fazowych, jest również uzyskiwana na drodze pomiaru bezkontaktowego, czyli z wykorzystaniem czujnika pojemnościowego.** W znaczący sposób upraszcza to układ pomiarowy i czyni go mobilnym oraz łatwym do zastosowania nawet w warunkach polowych (w porównaniu do standardowego dzielnika wysokiego napięcia stosowanego w metodzie IEC 60270). Takie rozwiązanie jak dotąd nie zostało opisane w literaturze i stanowi oryginalne i ważne osiągnięcie habilitanta. Metoda pomiaru wysokiego napięcia z wykorzystaniem sondy pojemnościowej, jako znaczące osiągnięcie naukowe i aplikacyjne, została bardziej szczegółowo opisana w dalszej części autoreferatu. Istotnym osiągnięciem o charakterze aplikacyjnym tej części badań prowadzonych przez habilitanta było także opracowanie kompleksowego, autorskiego systemu laboratoryjnego do pomiaru i analizy wyładowań niepełnych z wykorzystaniem sondy pojemnościowej Patterntacker.

c.2.3. Lokalizacja defektów układu izolacyjnego

Lokalizacja defektów układu izolacyjnego, spośród analizowanych zagadnień związanych z pomiarem wyladowań niezupełnych, jest zadaniem najtrudniejszym. Obecnie najbardziej zaawansowaną i najczęściej spotykaną metodą jest pomiar sygnału emisji akustycznej (EA) [1, 25] z wykorzystaniem techniki osłuchowej lub częściej triangulacyjnej. Powszechność stosowania tej metody nie oznacza, że jest ona wolna od wad i że daje zawsze wiarygodny wynik. Złożoność problemów, na które składają się: tłumienie sygnału akustycznego przez różne ośrodki, zmienna prędkość propagacji sygnału zależna od rodzaju ośrodka, w którym się rozchodzi, zjawiska odbić wielokrotnych czy rezonansu, sprawiają, że wciąż poszukuje się nowych rozwiązań, nowych technik i algorytmów poprawiających wiarygodność metody [26]. Coraz częściej w procesie lokalizacji defektów wykorzystuje się czujniki pojemnościowe. Podobnie jak przy pomiarach sygnałów emisji akustycznej mogą one być zastosowane w metodzie najwyższej wartości (analogicznej do metody największej głośności) lub w metodzie triangulacyjnej. Mogą one również uzupełniać układ przetworników akustycznych będąc „wyzwalaczem” dla pozostałych rejestracji, z racji większej czułości. W swoich badaniach habilitant analizował wszystkie z wymienionych wyżej metod. Ze względu na to, że metody te są obecnie powszechnie znane i dobrze udokumentowane w literaturze, jego badania naukowe przede wszystkim skupiały się na poprawie niektórych aspektów pomiaru oraz algorytmów samej lokalizacji. Między innymi zajmował się zagadnieniem propagacji sygnału akustycznego w dwóch ośrodkach (np. olej i metal), czego nie uwzględniają standardowe algorytmy lokalizacji i co tym samym wprowadza znaczące błędy w otrzymanym wyniku. Na podstawie rezultatów badań przeprowadzonych na modelach laboratoryjnych habilitant zaproponował algorytm, który jest prostą modyfikacją podstawowych równań stosowanych w metodzie triangulacyjnej:

$$\text{równanie podstawowe: } (x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2 = (v_s(T + \tau_o))^2, \quad (3)$$

$$\text{równanie zmodyfikowane: } (x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2 = \left(\sqrt{(v_o \cdot \tau_o)^2 + (v_s \cdot (t - \tau_o))^2} \right)^2, \quad (4)$$

gdzie:

x_s, y_s, z_s – współrzędne położenia sensora,

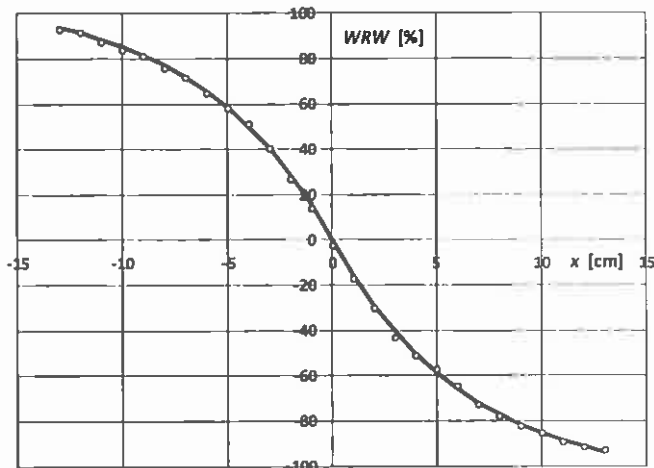
t – zmierzone opóźnienie sygnału,

t_o – czas potrzebny na przemieszczenie się sygnału w oleju,

v_o, v_s – odpowiednio: prędkość propagacji sygnału akustycznego w oleju oraz prędkość propagacji sygnału akustycznego w stali.

Wprowadzona modyfikacja w połączeniu z zastosowaniem metody iteracyjnej rozwiązywania równań nieliniowych pozwoliła uzyskać poprawę wyniku lokalizacji o około 50%, co należy uznać za spore osiągnięcie.

Opisane techniki lokalizacji defektów dotyczą obiektów o dużych gabarytach, takich jak transformator energetyczny dużej mocy (w praktyce powyżej 1,6 MVA), dla których czas przemieszczania się sygnału od defektu do przetwornika jest wystarczająco długi (w oleju sygnał EA przemieszcza się z prędkością ok. 1400 m/s, a UHF ok. 200 m/μs). Dla małych obiektów taka analiza jest bardzo utrudniona, ponieważ opóźnienie sygnału pochodzącego od wnz jest na tyle niewielkie, że generuje duży błąd już na etapie jego wyznaczania. Dla przykładu różnica 1 cm na drodze propagacji sygnału akustycznego oznacza opóźnienie wynoszące około 7 μs, a dla sygnału UHF około 30 ps. W takiej sytuacji dla obiektów o niewielkich gabarytach alternatywą dla metod triangulacyjnych może być opracowana przez habilitanta metoda, w której wykorzystuje się analizę wartości sygnału pochodzącego od impulsów wnz rejestrowanych równocześnie przez układ sond pojemnościowych odpowiednio rozmieszczonych. Pozwala ona na zlokalizowanie źródła wnz z dokładnością nie mniejszą niż 0,5 cm.



Rys. 6. Zależność względnej różnicy wartości WRW sygnałów zarejestrowanych przez parę sond w zależności od położenia iskiernika gazowego na osi x ; za pomocą punktów na charakterystyce przedstawiono wartości zmierzone, a linię ciągłą otrzymano z obliczeń

Koncepcja metody zaproponowanej przez habilitanta jest następująca. Analizując sygnały zarejestrowane przez parę czujników, autor wykazał, że względna różnica wartości sygnałów obu sond (WRW) (tzn. odniesiona do wyższej wartości) jest zależna od położenia źródła sygnału w osi danej pary sond. Zależność ta ma postać funkcji wykładniczej, której wzór trzeba określić na podstawie pomiarów laboratoryjnych w procesie kalibracji danej pary sond (przykładową krzywą kalibracyjną przedstawiono na rysunku 6).

Przedstawiona na rysunku 6 zależność może być aproksymowana następującą funkcją:

$$WRW = \operatorname{sgn}(x)A \left(1 - e^{-\frac{\operatorname{Abs}(x)}{t}} \right), \quad (5)$$

gdzie:

- WRW – względna różnica wartości sygnałów zarejestrowanych przez sondy,
- x – położenie źródła wnz w osi,
- t, A – stałe.

Wyznaczając na podstawie pomiarów wartość parametru WRW oraz przekształcając odpowiednio przedstawioną powyżej funkcję do postaci:

$$x = -t \ln \left(1 - \left(\frac{WRW}{\operatorname{sgn}(x) \cdot A} \right) \right) \quad (6)$$

można określić położenie źródła wnz w osi pary sond, czyli w jednym wymiarze.

Niestety powyższa zależność pozwala na precyzyjną lokalizację defektu tylko w sytuacji, gdy znajduje się on w odległości nie większej niż 5 cm od osi między sondami lub w tej samej odległości od obu sond. Dzieje się tak dlatego, że wraz ze zmianą położenia źródła względem osi zmienia się w sposób nieliniowy wartość szczytowa rejestrowanego sygnału. Zmienia się zatem także relacja między wskazaniem pary sond pokazana na rysunku 6 oraz opisana wzorami 5 i 6. Oczywiście te zmiany mają ściśle określony charakter, który można opisać funkcyjną zależnością, ale parametrem, który pozwoliłby na wprowadzenie odpowiedniej korekty jest informacja o odległości źródła sygnału od osi sond. Taką informację można uzyskać, dysponując drugą parą sond, której oś jest prostopadła względem osi pierwszej pary, czyli tak jak w układzie skonfigurowanym do lokalizacji dwuwymiarowej. W tej sytuacji wskazanie poszczególnej pary sond służy wyznaczeniu odpowiednio współrzędnej x lub y oraz wprowadzeniu korekty do wskazania drugiej pary sond według zależności:

$$\begin{aligned} x &= x_p \cdot k = x_p \cdot \left(1,1 + \left(0,0006 \cdot y_p^2 \cdot 1,6 |x_p| \cdot |x_p|^{0,18} \right) \right) \\ y &= y_p \cdot k = y_p \cdot \left(1,1 + \left(0,0006 \cdot x_p^2 \cdot 1,6 |y_p| \cdot |y_p|^{0,18} \right) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

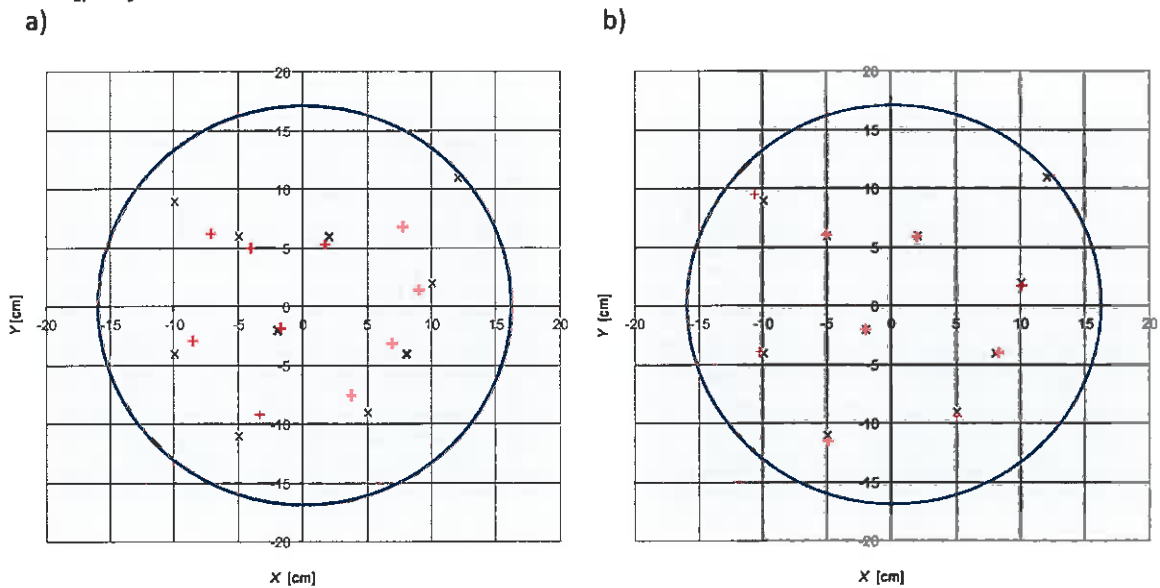
gdzie:

- x, y – położenie źródła wnz po korekcie,
- x_p i y_p – współrzędne wyznaczone na podstawie wzoru 6,
- k – współczynnik korekcyjny.

Dość złożony wzór na współczynnik korekcyjny k jest wynikiem analizy zależności wartości parametru WRW od położenia defektu w całym rozpatrywanym obszarze a współczynniki zawarte we wzorze dobrano doświadczalnie.

Na rysunku 7 przedstawiono efekt działania standardowego algorytmu lokalizacji (a) oraz z uwzględnieniem korekty według opisanego wyżej algorytmu (b). **Zastosowanie współczynnika korekcyjnego k sprawia, że metoda pozwala na wyznaczenie położenia źródła wnz z dokładnością do 0,5 cm.** Wniosek powyższy został poparty badaniami na rzeczywistych obiektach, co szczegółowo opisano w rozprawie.

Opisana metoda lokalizacji defektów w obiektach wysokonapięciowych o niewielkich gabarytach za pośrednictwem układu sond pojemnościowych skojarzonych jest autorskim pomysłem habilitanta i według jego wiedzy nie było dotąd podobnych rozwiązań w dostępnej literaturze.



Rys. 7. Lokalizacja defektu na podstawie serii dziesięciu pomiarów (miejsce defektu zaznaczono symbolem x, a lokalizację „+”) z zastosowaniem standardowego algorytmu (a) oraz z uwzględnieniem współczynnika korekcyjnego k (b); okrąg o promieniu 17 cm definiuje obszar, dla którego algorytm wyznacza położenie defektu z dokładności nie mniejszą niż 0,5 cm

c.3. Pomiar wysokiego napięcia z wykorzystaniem czujników pojemnościowych

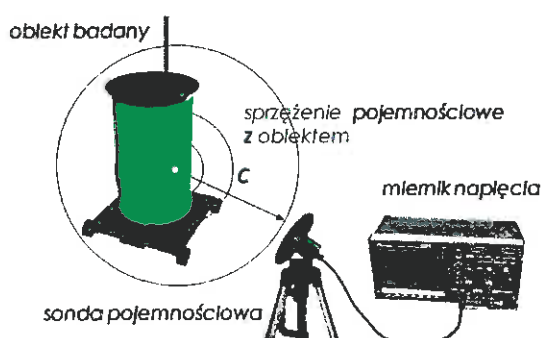
c.3.1. Pomiar napięcia przemiennego

Stosowane obecnie w elektroenergetyce techniki pomiaru wysokiego napięcia przemiennego (np. przekładnik lub dzielnik) mają istotną wadę – wymagają galwanicznego kontaktu z urządzeniem. Podłączenie ich jest zatem możliwe tylko w stanie beznapięciowym. Dodatkowo, jeżeli mamy do czynienia z siecią o napięciu znamionowym 110 kV i więcej to należy liczyć się także z tym, że urządzenie pomiarowe będzie miało duże gabaryty i będzie miało dużą masę. W sytuacji, gdy na przykład istnieje konieczność podłączenia na pewien czas do transformatora energetycznego systemu monitoringu wylądowań niezupełnych,

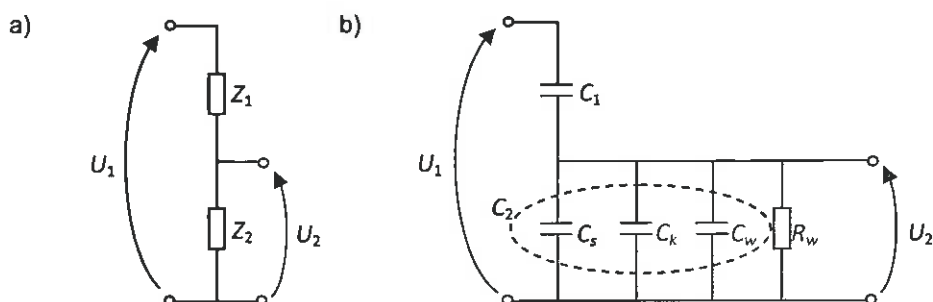
którego instalacja i deinstalacja dokonywana jest na pracującej jednostce (np. metoda AE czy niektóre wersje metody UHF), wtedy zapewnienie równoczesnej rejestracji rzeczywistego przebiegu napięcia będzie bardzo utrudnione, a jest ona wymagana dla prawidłowej oceny aktywności wyładowań niezupełnych. Powyższy problem stał się bodźcem do podjęcia badań przez habilitanta w zakresie oceny możliwości wykorzystania sondy pojemnościowej do rejestracji przebiegów napięcia przemiennego.

Koncepcja pomiaru wysokiego napięcia z wykorzystaniem czujnika pojemnościowego, chociaż z pozoru dosyć prosta, jak dotąd, według wiedzy habilitanta, nie była opublikowana w literaturze naukowej i nie są mu znane żadne doniesienia wskazujące na obecność na rynku jakichś komercyjnych rozwiązań, bazujących na podobnym pomysśle. Realizacja koncepcji wymagała od autora przeprowadzenia wielu badań, które pozwalają na wiarygodne stosowanie metody, co stanowi zarówno osiągnięcie naukowe, jak i aplikacyjne habilitanta.

Pomiar wysokiego napięcia z wykorzystaniem sondy pojemnościowej w dużym stopniu przypomina pomiar w układzie dzielnika pojemnościowego. Podobieństwo to wynika przede wszystkim z charakteru sprzężenia układu pomiarowego z obiektem badań. W obu przypadkach mamy do czynienia z pojemnością sprzęgającą (wysokonapięciową o dużej impedancji) oraz z pojemnością pomiarową (niskonapięciową o mniejszej impedancji), na której spadek napięcia jest mierzony i odpowiednio przeliczany z uwzględnieniem tzw. przekładni dzielnika, która jest funkcją obu pojemności (rys. 8). O ile główna idea pomiaru w obu układach jest zbliżona, o tyle specyfika ich wykonywania i charakter pewnych zależności są diametralnie różne. W przypadku dzielnika pojemnościowego mamy do czynienia ze stałymi parametrami poszczególnych elementów składowych (stałą przekładnią) i galwanicznym połączeniem układu pomiarowego z obiektem badań. **Układ wykorzystujący sondę pojemnościową jest mobilny, wartość pojemności sprzęgającej (przekładnia) może być kształtowana adekwatnie do potrzeb przez zmianę położenia sondy i – co najważniejsze – pomiar wykonuje się bezkontaktowo, a więc w sposób bezpieczny dla aparatury pomiarowej oraz bez obciążania źródła i zakłócania rozkładu pola elektrycznego w bezpośrednim otoczeniu badanego obiektu.**



Rys. 8. Idea pomiaru wysokiego napięcia z wykorzystaniem sondy pojemnościowej i oscyloskopu



Rys. 9. Schematy zastępcze układu pomiarowego: a) uproszczony, b) pełny, gdzie: C_1 – wartość pojemności sprzężenia między sondą a obiektem badanym, R_w – rezystancja woltomierza, C_w – pojemność wejściowa woltomierza, C_s – pojemność sondy, C_k – pojemność kabla

Prawidłowy pomiar napięcia z wykorzystaniem sondy pojemnościowej w dużej mierze zależy od precyzyjnego wyznaczenia przekładni układu, a więc przede wszystkim wartości sprzężenia pojemnościowego między obiektem badań a sondą. Wartość przekładni jest opisana dosyć skomplikowaną zależnością, która musi uwzględniać wszystkie elementy wchodzące w skład toru pomiarowego (takie jak impedancja wejściowa oscyloskopu, pojemność przewodów itp.). Jeżeli przyjmiemy się, że wartość maksymalną napięcia można obliczyć ze wzoru:

$$U_1 = v \cdot U_2 \quad (8)$$

gdzie:

U_2 – napięcie zmierzone za pomocą sondy,
 v – przekładnia układu,

to, zgodnie z rysunkiem 9, wzór na przekładnię można przedstawić za pomocą zależności:

$$v = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} = \frac{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_w}{1 + j\omega C_2 R_w}}{\frac{R_w}{1 + j\omega C_2 R_w}} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} - j \frac{1}{\omega C_1 R_w} \quad (9)$$

gdzie:

Z_1 – impedancja sprzęgająca,
 Z_2 – impedancja układu pomiarowego,
 ω – pulsacja,
 R_w – rezystancja woltomierza,
 C_1 – pojemność sprzęgająca,
 C_2 – pojemność wypadkowa układu pomiarowego, będąca sumą poszczególnych elementów składowych, tj. pojemności sondy (C_s), pojemności kabla koncentrycznego (C_k) i pojemności wejściowej woltomierza (C_w).

Ocena wiarygodności opracowanej metody wymagała wykonania wielu badań oraz analiz o charakterze naukowym. Wśród najważniejszych osiągnięć habilitanta w tym zakresie można wymienić:

- wykazanie, że przekładnia układu pomiarowego nie zmienia się wraz ze wzrostem napięcia,
- wykazanie, że wartość sprzężenia pojemnościowego między obiektem a sondą nie zależy w istotny sposób od wilgotności powietrza,
- przeprowadzenie oceny niepewności pomiarowej metody i wykazanie, że mieści się ona w zakresie od 1,5% do 5%,
- opracowanie algorytmu filtracji i rekonstrukcji sygnału rejestrowanego za pośrednictwem czujnika pojemnościowego dla prawidłowego odzwierciedlenia kształtu przebiegu napięcia rzeczywistego (problem szczególnie istotny w przypadku rejestracji napięć odkształconych).

Efektom pracy naukowej było uzyskanie przez habilitanta **znaczącego osiągnięcia aplikacyjnego, jakim było opracowanie i przetestowanie w warunkach polowych na transformatorze energetycznym, systemu Vtracker do pomiaru wysokiego napięcia z wykorzystaniem czujnika pojemnościowego**. Stworzony układ będzie również częścią tworzonego systemu monitoringu wnz (**Załącznik 9**).

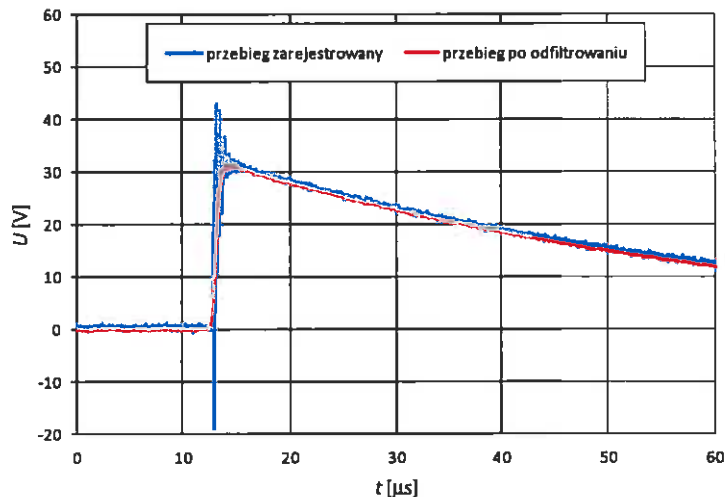
c.3.2. Pomiar napięcia udarowego

Na podstawie wyników uzyskanych w badaniach przy napięciu przemiennym, habilitant postawił tezę, że można zaadaptować technikę pomiarową wykorzystującą sondę pojemnościową do rejestracji i wiernego odtworzenia przebiegu udaru napięciowego oraz wyznaczenia jego podstawowych parametrów. **Wykorzystanie sondy pojemnościowej do rejestracji szybkich udarów napięciowych, o dużej wartości szczytowej, jest**

Wade

innowacyjną koncepcją, dotąd nie prezentowaną w literaturze naukowej. Przeprowadzone badania i analizy potwierdziły powyższą tezę, a wśród najważniejszych osiągnięć habilitanta uzyskanych w tym obszarze można wymienić:

- wykazanie, że obecność zaburzeń wynikających ze specyfiki pracy generatora udarów powoduje tylko niewielkie zniekształcenia przebiegu udarowego rejestrowanego przy użyciu sondy pojemnościowej, które można skutecznie wyeliminować za pomocą odpowiednich filtrów cyfrowych (rys. 10),



Rys. 10. Przebieg napięcia zarejestrowany przez układ z sondą pojemnościową z widocznymi zaburzeniami na czole udaru i ten sam przebieg po odfiltrowaniu z wykorzystaniem filtra uśredniającego

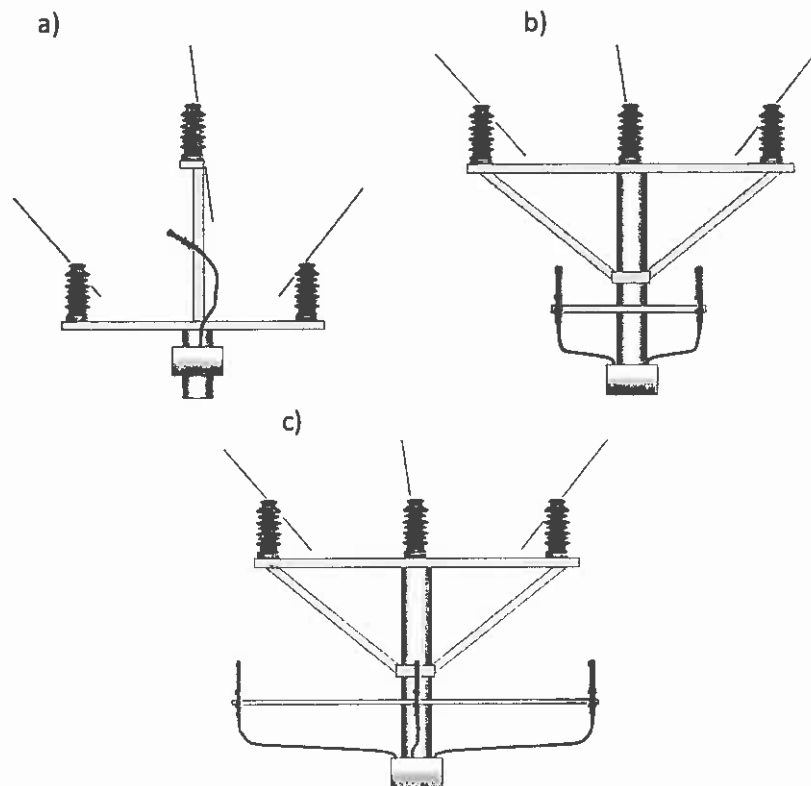
- wykazanie, że możliwe jest określenie przekładni układu pomiarowego w sposób analogiczny jak w przypadku napięcia przemiennego,
- wykazanie, że zależność między wartością szczytową generowanego udaru oraz wartością zmierzoną przy użyciu sondy jest liniowa w całym zakresie mierzonego napięcia,
- wykazanie, że możliwa jest rekonstrukcja rzeczywistego przebiegu napięcia udarowego na zasadach podobnych jak dla napięcia przemiennego, co pozwala poprawnie wyznaczyć podstawowe parametry czasowe udaru,
- uzyskanie potwierdzenia, na podstawie badań porównawczych z wykorzystaniem metod referencyjnych, że metoda spełnia rygorystyczne wymagania odpowiednich norm [27-28] w zakresie wyznaczania parametrów czasowych rejestrowanych udarów.

c.3.3. Pomiar składowej zerowej napięcia

Zagadnienie związane z wykrywaniem asymetrii napięć w trójfazowej sieci elektroenergetycznej jest istotne z dwóch powodów. Po pierwsze, asymetria jest jednym z parametrów wskazujących na obniżenie jakości energii elektrycznej, co obecnie, zgodnie z rozporządzeniem [29] oraz wytycznymi normy [30], jest sytuacją niedopuszczalną w polskiej energetyce. Po drugie, sytuacja taka może wskazywać na wystąpienie poważnego zaburzenia w pracy systemu elektroenergetycznego, jakim jest zwarcie doziemne, co z kolei jest szczególnie ważne z punktu widzenia eksploatacji sieci średniego napięcia.

Jednym z podstawowych i uniwersalnych kryteriów wykrywania zwarć doziemnych jest wyznaczenie wartości składowej zerowej napięcia. Zabezpieczenia zero napięciowe w zasadzie nie występują samodzielnie, a ich powszechność stosowania wynika z faktu, że często stanowią element rozruchowy dla wielu innych kryteriów. W niektórych wypadkach może ono stanowić nawet zabezpieczenie podstawowe, ale działające jako sygnalizacja. W typowych rozwiązaniach do pomiaru składowej zerowej stosuje się specjalne filtry

napięcia (czyli przekładniki napięciowe połączone w układzie tzw. otwartego trójkąta). **Habilitant postawił tezę, że wykorzystując odpowiednio umiejscowione sondy pojemnościowe (w liczbie od 1 do 3 czujników w zależności od konfiguracji słupa energetycznego), można uzyskać podobny efekt pomiarowy, czyli wykryć zwarcie doziemne, ale z zastosowaniem prostszej i dużo tańszej aparatury.** Założenie powyższe oparte było na wynikach wcześniej prowadzonych badań nad właściwościami sond pojemnościowych w kontekście ich wykorzystania do pomiaru wysokiego napięcia przemiennego. Badania te wykazały, że pewną trudnością jest dokonywanie pomiaru napięcia jednej z faz układu trójfazowego w sytuacji, gdy pozostałe fazy znajdują się stosunkowo blisko czujnika. W sytuacji, gdy istotny jest pomiar sumarycznego napięcia wszystkich trzech faz, czego odzwierciedleniem jest właśnie składowa zerowa napięcia, istnienie sprzężeń pojemnościowych między czujnikiem pomiarowym a poszczególnymi fazami okazuje się zaletą. Przy umiejętnym ułożeniu poszczególnych sond można ją w sposób praktyczny wykorzystać. Na rysunku 11 pokazano dwie typowe konstrukcje słupowe, w których izolatory pracują w układzie trójkątnym i płaskim. Na tym tle ułożono w kilku wariantach sondy pojemnościowe, aby przedstawić poglądowo ideę pomiaru. Dla układu trójkątnego składowa zerowa, ze względu na symetrię geometryczną układu (a tym samym symetryczne sprzężenia między poszczególnymi fazami i sondą), jest możliwa do wyznaczenia za pomocą jednego czujnika. W układzie płaskim natomiast istnieje konieczność zastosowania dwóch lub trzech czujników w zależności od tego, czy rejestracja obejmuje pomiar napięcia poszczególnych faz czy tylko składowej zerowej.



Rys. 11. Sposób ułożenia sond pojemnościowych w zależności od konstrukcji słupa: a) wariant z jedną sondą, b) wariant z dwiema sondami, c) wariant z trzema sondami

Idea pomiaru składowej zerowej z wykorzystaniem sond pojemnościowych wynika wprost z zasady pomiaru wysokiego napięcia przedstawionej wcześniej. Każdy przewód pod napięciem jest, za pośrednictwem sprzężenia pojemnościowego, połączony z czujnikiem, tworząc układ dzielnika napięciowego. Rejestrowane zatem przy użyciu sondy napięcie jest sumą napięć fazowych, obniżonych do poziomu niskiego, zgodnie z przekładnią układu pomiarowego. Analizy prowadzone w warunkach laboratoryjnych dowiodły, że przy

spełnieniu warunku odpowiedniego ulokowania sondy lub układu sond względem poszczególnych faz wartość tego napięcia jest równa zero dla pełnej symetrii napięć lub różna od zera w sytuacji jakiegokolwiek asymetrii. Można tę sytuację opisać uproszczonym wzorem:

$$\underline{U} = v \cdot (\underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3}) \quad (10)$$

gdzie:

U_{L1}, U_{L2}, U_{L3} – napięcia poszczególnych faz,
 v – przekładnia układu pomiarowego obliczana ze wzoru:

$$v = \frac{C + C_p}{C} - j \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (11)$$

gdzie:

C_p – pojemność układu pomiarowego (sondy, przewody, miernik),
 R_p – rezystancja wejściowa miernika napięcia,
 C – pojemność sprzężenia między dowolnym przewodem fazowym a sondą dla układu z jednym czujnikiem lub równe:

$$C = C_{11} + C_{21} = C_{12} + C_{22} = C_{13} + C_{23} \quad (12)$$

dla układu z dwoma czujnikami.

Weryfikację koncepcji wyznaczania składowej zerowej habilitant przeprowadził na podstawie badań laboratoryjnych oraz symulacji komputerowych. Badania laboratoryjne miały na celu przede wszystkim określenie parametrów dla schematu zastępczego. W symulacjach natomiast przebadano wybraną konfigurację sieci (punkt neutralny uziemiony przez rezystor), aby ocenić jaka będzie czułość detekcji układu sond (wartość napięcia rejestrowanego) w zależności od rezystancji przejścia w miejscu zwarcia. Dla najbardziej niekorzystnej sytuacji, gdy wartość rezystancji w miejscu doziemienia jednej z faz wynosiła 2500 Ω , uzyskano sumaryczny sygnał napięciowy na poziomie ok. 0,3 V, co stanowi ponad 2% maksymalnej wartości sygnału, który byłby zarejestrowany przy pełnym zwarciu. Dla typowych zabezpieczeń stosowanych w sieciach z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor wartość rozruchową napięcia przyjmuje się na poziomie 3–10 V [31]. Przy założeniu maksymalnego sygnału pomiarowego na poziomie 100 V daje to wartość względną na poziomie 3–10%, a więc porównywalną do uzyskanej z wykorzystaniem sond pojemnościowych.

Na podstawie zebranych wyników należy przyjąć, że opracowana koncepcja zastosowania układu sond pojemnościowych do monitorowania stanu asymetrii sieci średniego napięcia i wykrywania zwarc w niej powstających to rozwiązanie wymagające dalszych testów polowych. Niemniej jednak już na tym etapie należy uznać, że jest ono istotnym i nowatorskim w skali świata osiągnięciem naukowym habilitanta. Urządzenia umożliwiające szybką ocenę stanów zakłóceń, czyli wspierające działanie tzw. sieci inteligentnych (Smart Grid), to z pewnością przyszłość energetyki.

Literatura:

- [1] Guidelines for Partial Discharge Detection Using Conventional (IEC 60270) and Unconventional Methods, Brochure No. 662, CIGRE WG D1.37, 2016.
- [2] Partial discharges in transformers, Brochure No. 676, CIGRE WG D1.29, 2017.
- [3] IEC 60270, Partial Discharge Measurements, wyd. 3, March 2001.
- [4] IEEE Std C57.113-2010, IEEE Recommended Practice for Partial Discharge Measurement in Liquid-Filled Power Transformers and Shunt Reactors.
- [5] PN-EN 60270:2003/A1:2016-04, Wysokonapięciowa technika probiercza – Pomiar y wyladowań niezupełnych.
- [6] Galski E., Strehl T., Muhr M., Tenbohlen S., Meijer S., Judd M.D., Bodega R., Lemke E., Jongen R.A., Coenen S., Larzelere B., Hanai M., Agoris P., Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements, Brochure No. 444, CIGRE WG D1.33, 2010.

- [7] Gulski E., Diagnostowanie wyladowań niezupełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji, Prace naukowe – Elektryka, z. 128, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [8] Elborki M., Jenkins N., Crossley P., Wang Z., Power Transformer PD Sources Determination Using Current Signals Waveshape and Pattern Distributions, International Symposium on Electrical Insulation, IEEE, 2004, s. 178–181.
- [9] Machin C., Wiesmann H.J., PD Recognition with knowledge-based preprocessing and neural networks, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. DEI-2, No. 4, 1995, s. 578–589.
- [10] Pattanadech N., Nimsanong P., Partial Discharge Classification Using Principal Component Analysis Combined with Self-Organizing Map, X Conference TENCON 2014, IEEE Region, s. 1–5.
- [11] Ping S., Dake X., Guoli W., Yanming L., Application of Neural Network with Genetic Algorithm to UHF PD Pattern Recognition in Transformers, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 2002, s. 732–735.
- [12] Sahoo N.C., Salama M.M.A., Trends in Partial Discharge Pattern Classification: A Survey, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, April 2005, s. 248–264.
- [13] Sinaga H.H., Phung B.T., Blackburn T.R., Recognition of Single and Multiple Partial Discharge Sources in Transformers Based on Ultra-High Frequency Signals, Generation, Transmission & Distribution, IET, Vol. 8, Iss. 1, 2014, s. 160–169.
- [14] Ziomek W., Reformat M., Kuffel E., Application of Genetic Algorithms to Pattern Recognition of Defects in GIS, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 2, 2000, s. 161–168.
- [15] PN-ISO 5725-2:2002: Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarowych i wyników pomiarów – Część 2: Podstawowa metoda określania powtarzalność i odtwarzalności standardowej metody pomiarowej.
- [16] Marven C., Ewers G., Zarys cyfrowego przetwarzania sygnałów, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1999.
- [17] Ozimek E., Podstawy teoretyczne analizy widmowej sygnałów, PWN, Warszawa–Poznań 1985.
- [18] Stabrowski M.M., Cyfrowe przyrządy pomiarowe, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
- [19] Kay S., Modern Spectral Estimation: Theory and Application, Prentice Hall Inc., New Jersey 1988.
- [20] Marple S.L., Digital Spectral Analysis with Applications, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1987.
- [21] Musicus B.R., Fast MLM Power Spectrum Estimation from Uniformly Spaced Correlations, IEEE Transactions on Acoustic, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-33, No. 4, October 1985, s. 1333–1335.
- [22] Besson O., Stoica P., Analysis of MUSIC and ESPRIT Frequency Estimates for Sinusoidal Signals with Lowpass Envelopes, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 44, No. 9, September 1996, s. 2359–2364.
- [23] Eriksson A., Stoica P., Soderstrom T., Markov-Based Eigenanalysis Method for Frequency Estimation, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 42, No. 3, 1994, s. 586–594.
- [24] Leonowicz Z., Parametric Methods for Time-Frequency Analysis of Electric Signals, rozprawa habilitacyjna, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2006.
- [25] Eleftherion P.M., Partial Discharge XXI: Acoustic Emission-Based PD Source Location in Transformers, Electrical Insulation Magazine, IEEE, Vol. 11, 1995, s. 22–26.
- [26] Markalous S.M., Feser K., All-Acoustic PD Measurements of Oil/Paper-Insulated Transformers for PD-Localization, International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, Wrocław 2004, s. 106–113.
- [27] PN-EN 61083-2:2013-07, Przyrządy i oprogramowanie używane do pomiarów w próbach wysokonapięciowych i silnoprądowych – Część 2: Wymagania dla oprogramowania do prób z udarami napięciowymi i prądowymi.
- [28] PN-EN 61083-1:2002, Przyrządy i oprogramowanie stosowane do pomiarów w wysokonapięciowych próbach udarowych – Część 1: Wymagania dotyczące przyrządów.
- [29] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. z 2007 r. Nr 93, poz. 623).
- [30] PN-EN 50160:2010, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.
- [31] Hoppel W., Lorenc J., Dobór nastaw zabezpieczeń w polach linii średniego napięcia, Automatyka Elektroenergetyczna, nr 2, 2003, s. 35–39.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych po uzyskaniu stopnia doktora

Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze habilitanta w sposób syntetyczny ujęto w podpunktach od 5.1 do 5.5. **Symbolika oznaczeń publikacji odpowiada oznaczeniom wg Załącznika 4.** Spis artykułów, na które powołuje się autoreferat, został dla większej przejrzystości załączony także po każdym podpunkcie.

5.1. Rozwój metod pomiaru zawartości wody w izolacji stałej transformatorów i izolatorów przepustowych opartych na odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego (PDC, FDS, RVM)

Tematyka, spoza nurtu badań opisanych w monografii, którą habilitant zajmował się najobszerniej, dotyczyła diagnostyki układu izolacyjnego papier-olej z wykorzystaniem tzw. metod polaryzacyjnych, do których zalicza się metodę pomiaru prądu polaryzacji i depolaryzacji (PDC), spektroskopię dielektryczną (DFR) oraz pomiar napięcia powrotnego (RVM). Wszystkie te metody są stosowane w celu wyznaczenia w sposób nieinwazyjny stopnia zawilgocenia izolacji stałej transformatora energetycznego. Badanie to jest uznawane obecnie za jedno z ważniejszych testów, który pozwala na ocenę stanu jednostki, szczególnie długo eksploatowanej.

Badania prowadzone przez habilitanta w obrębie tej tematyki obejmowały przyczyny, skutki oraz ilościową ocenę zawartości wilgoci w izolacji celulozowej impregnowanej cieczą izolacyjną. Bódcem do zajęcia się tym aktualnym i ważnym tematem był udział w międzynarodowym projekcie badawczym o akronimie REDIATool (*Reliable Diagnostics of HV Transformer Insulation For Safety Assurance of Power Transmission System* – patrz **Załącznik 4**). Projekt, którego koordynatorem była Politechnika Poznańska, skupiał kilka europejskich ośrodków badawczych i przedstawicieli sektora energetycznego (z Polski, Niemiec i Szwecji). Prace badawcze miały na celu opracowanie wiarygodnych metod oceny stopnia zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej transformatora energetycznego z uwzględnieniem różnych aspektów jego eksploatacji (m. in. stopnia zesterzenia [A4]). W ramach tego projektu habilitant odbył siedmiomiesięczny staż naukowy w Chalmers University of Technology (Gothenburg, Szwecja), który stał się poważnym kamieniem milowym w jego pracy naukowej. W trakcie stażu prowadzone były badania laboratoryjne na układach modelowych oraz pomiary w terenie. Celem badań laboratoryjnych była ocena wpływu różnych czynników, w tym wilgoci, temperatury, stopnia zesterzenia, parametrów materiałowych (gęstość, przenikalność elektryczna) na odpowiedź dielektryczną w dziedzinie czasu i częstotliwości izolacji celulozowej impregnowanej olejem mineralnym. W testach wykonywanych na eksploatowanych transformatorach oceniany był wpływ rozkładu temperatury w kadzi transformatora na wypadkową odpowiedź układu izolacyjnego, a także analizowano różnego rodzaju aspekty metrologiczne takie jak wpływ warunków pogodowych, konfiguracji połączeń (UST, GST) oraz dodatkowych urządzeń podłączonych do układu na wynik pomiaru. Owocem naukowym prac prowadzonych w ramach stażu były dwie wartościowe publikacje wydrukowane w magazynie IEEE Transactions on Power Delivery [A1, A2], gdzie z dużym udziałem habilitanta opisano szczegółowo wskazane wyżej problemy. O randze publikacji wskazuje liczba cytowań, która zgodnie z katalogiem Web of Science wynosi obecnie łącznie 185. Wyniki prac prowadzonych w ramach projektu stały się także podstawą wydanej przez grupę roboczą CIGRE broszury dotyczącej zastosowania metod polaryzacyjnych do oceny zawilgocenia transformatora energetycznego pt. *Dielectric Response Diagnoses for Transformer Windings* (Brochure of CIGRE No 414, April 2010). W wykazie literatury, na którą powołuje się powyższa broszura, znajduje się 5 artykułów, których współautorem był habilitant [A1, A2, D23, D28, D38].

Największym osiągnięciem aplikacyjnym prowadzonych badań było stworzenie bazy wiarygodnych wzorców odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości próbek preszpanowanych o znanym zawilgoceniu impregnowanych olejem mineralnym, które obecnie są wykorzystywane w sposób praktyczny przy ocenie stopnia zawilgocenia transformatorów energetycznych prowadzonych w ramach Mobilnego Laboratorium Diagnostyki Transformatorów Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej.

Prace z zakresu oceny stopnia zawilgocenia izolacji celulozowej były kontynuowane w ramach projektu badawczego finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (**Załącznik 4**), który dotyczył stworzenia wzorców odpowiedzi dielektrycznej próbek preszpanowanych o znanym zawilgoceniu, zaimpregnowanych estrem syntetycznym [C30, C41]. Osiągnięciem aplikacyjnym projektu było stworzenie specjalistycznego oprogramowania, które pozwala na wyznaczanie stopnia zawilgocenia izolacji transformatora

energetycznego w oparciu o opracowane wzorce. Szacunkowy udział habilitanta w pracach nad programem można określić na 70%. Tego typu program wykorzystujący wzorce izolacji preszpanowej impregnowanej estrem syntetycznym jest wciąż unikatowy na skalę światową.

Doświadczenie zdobyte podczas badań naukowych prowadzonych na układach izolacyjnych transformatora energetycznego zostało przez habilitanta wykorzystane do opracowania procedur diagnostycznych przeznaczonych również dla innych urządzeń wysokonapięciowych. Owocem tych prac było np. **stworzenie algorytmu wyznaczania stopnia zawilgocenia izolatora przepustowego typu kondensatorowego** w oparciu o opracowany wspólnie z dr. inż. J. Gielniakiem tzw. model 2XY [D60]. Koncepcja ta stała się również przedmiotem zgłoszenia patentowego [P1].

Efektem długoletnich badań prowadzonych przez habilitanta w zakresie oceny stopnia zawilgocenia i degradacji izolacji transformatorów energetycznych i przepustów wysokonapięciowych było zdobycie solidnej wiedzy praktycznej w zakresie obsługi zaawansowanej technologicznie aparatury pomiarowej i doświadczenia niezbędnego do prawidłowej oceny uzyskanych wyników. Obecnie habilitant bardzo często uczestniczy w pomiarach i ekspertyzach dotyczących stanu izolacji dużych transformatorów energetycznych oraz izolatorów przepustowych (ponad 100 ekspertyz), które odbywają się w ramach umów zawartych z dużymi przedsiębiorstwami branży energetycznej (np. PSE S.A., ELTEL Networks). Owocem naukowym tych szeroko zakrojonych i prowadzonych od wielu lat pomiarów jest statystyczna analiza problemu zawilgocenia transformatorów energetycznych w Polsce oraz Europie zawarta w ważnej wieloautorskiej publikacji [A8] (wg katalogu WoS publikacja była dotąd cytowana 23 razy).

Habilitant jest również członkiem zespołu, który opracowuje wytyczne w zakresie diagnostyki transformatorów energetycznych dla spółki dystrybucyjnej ENEA Operator S.A (Załącznik 9).

Doświadczenie zdobyte przez habilitanta w tej tematyce zostało również zauważone za granicą, czego potwierdzeniem było zaproszenie do poprowadzenia cyklu wykładów na studiach doktoranckich na University Carlos III (Madryt, Hiszpania, 2005 r.) o wyżej opisanej tematyce.

Literatura:

- [A4] Gielniak J., Graczkowski A., Gubański S., Moranda H., Mościcka-Grzesiak H., Walczak K., 2009 r., *Influence of thermal ageing on dielectric response of oil-paper insulation*, Materials Science-Poland, Vol.: 27, No.: 4/2, pp. 1199-1205. (publikacja indeksowana w bazie Web of Science Core Collection, IF=0,384).
- [A1] Ekanayake C., Gubański S.M., Graczkowski A., Walczak K., 2006 r., *Frequency response of oil impregnated pressboard and paper samples for estimating moisture in transformer insulation*, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 21, Issue: 3, pp. 1309-1317 (publikacja indeksowana w bazie Web of Science Core Collection, IF=0,496).
- [A2] Blennow J., Ekanayake C., Walczak K., Garcia B., Gubański S.M., 2006 r., *Field experiences with measurements of dielectric response in frequency domain for power transformer diagnostics*, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 21, Issue: 2, pp. 681-688 (publikacja indeksowana w bazie Web of Science Core Collection, IF=0,496).
- [A8] Gielniak J., Graczkowski A., Morańda H., Przybyłek P., Walczak K., Nadolny Z., Mościcka-Grzesiak H., Gubański S.M., Feser K., 2012 r., *Moisture in cellulose insulation of power transformers: statistics*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, Issue 3, pp. 982-987, 2013. (publikacja indeksowana w bazie Web of Science Core Collection, IF=1,228).
- [C30] Gielniak J., Graczkowski A., Morańda H., Przybyłek P., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., 2011 r., *Wzorce zawilgocenia izolacji papierowej nasyconej estrem syntetycznym z wykorzystaniem analizy częstotliwościowej spektroskopii dielektrycznej*, „Pomiary, Automatyka, Kontrola”, Vol.:57, Nr: 4, s. 372-375.
- [C41] Gielniak J., Graczkowski A., Morańda H., Przybyłek P., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., 2013 r., *Wzorce odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości izolacji celulozowej o różnym zawilgoceniu syconej estrem syntetycznym*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7/2013, s. 258-260.
- [D23] Blennow J., Walczak K., Dermfalk A., Garcia B., Bartnicki A., Gubanski S., Samuelsson O., Karlsson U., 2005, *Comparative Study of Dielectric Spectroscopy Measurements and Analyses of Oil and Paper Samples from a Power Transformer*, Nordic Insulation Symposium NORD-IS 05, Trondheim, Norwegia.
- [D28] Blennow J., Dermfalk A., Walczak K., Ekanayake C., Koestinger P., Karlsson L., Gäfvert U., Gubański S., Bartnicki A., *Sequential Comparative Study of Dielectric Response and Analyses of Oil and Paper from*

a *Power Transformer Undergoing Repair*, XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, China.

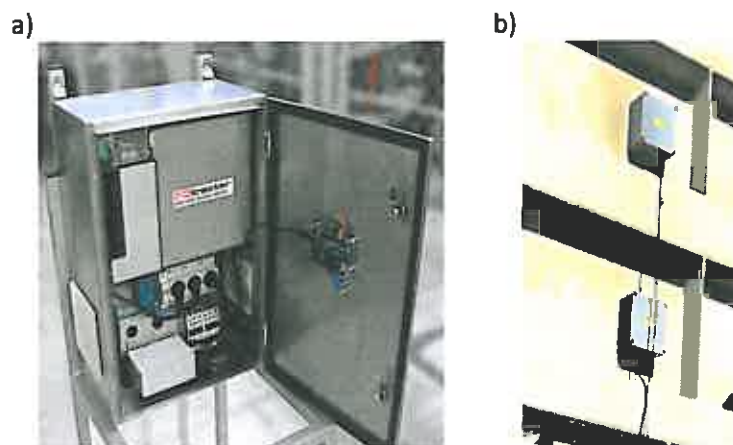
[D38] Walczak K., Gielniak J., Graczkowski A., Siodla K., 2007, *Investigations of High Voltage Insulation Materials Assigned to Work in Cryogenic Conditions*, XVth International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Słowenia.

[D60] Gielniak J., Graczkowski A., Walczak K., Morańda H., Przybyłek P., Polak F., Gronko W., 2013, *Doświadczenia z badań izolatorów przepustowych wysokiego napięcia z użyciem metody spektroskopii dielektrycznej*, Międzynarodowa Konferencja Transformatorowa TRANSFORMATOR 2013, Gdańsk, 5-7 czerwca, s. 14/1-10.

5.2. Monitoring wylądowań niepełnych w transformatorze energetycznym za pomocą metody EA, prace rozwojowe i wdrożeniowe systemu monitoringu

Znaczącym obszarem aktywności naukowej habilitanta jest zagadnienie wykorzystania pomiaru wylądowań niepełnych do oceny stanu wysokonapięciowych układów izolacyjnych, w szczególności przy użyciu metod pozwalających na monitorowanie aktywności tego zjawiska w czasie rzeczywistym. Zagadnienie to, w kontekście wykorzystania metody UHF, zostało omówione w monografii oraz w punkcie 4 autoreferatu, dlatego w tym miejscu zostaną przywołane jedynie pozostałe osiągnięcia habilitanta z tej dziedziny.

Od roku 2007 do chwili obecnej habilitant jest nieprzerwanie zaangażowany w rozwój systemu monitoringu wnz w transformatorze energetycznym o nazwie PDtracker (rys. 12). Prace nad tym systemem zostały zapoczątkowane w ramach projektu badawczo-rozwojowego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (**Załącznik 4**). Opracowane urządzenie pracuje z wykorzystaniem metody EA (Emisji Akustycznej). Projekt zakończył się stworzeniem prototypu, który na mocy umowy z firmą Mikronika został w roku 2010 wdrożony na jednej ze stacji elektroenergetycznych i zintegrowany z systemem nadrzędnym monitoringu transformatora SYNDIS-ES tejże firmy. Główny wkład habilitanta w rozwój prototypu polegał na stworzeniu oprogramowania sterującego pracą systemu (jest



Rys. 12. System monitoringu transformatora energetycznego PDtracker (a) oraz przetworniki akustyczne z przedwzmacniaczem zainstalowane na monitorowanej jednostce (b)

to urządzenie w pełni autonomiczne i bezobsługowe) oraz przeprowadzeniu wdrożenia i zaangażowaniu w dalszych pracach rozwojowych prototypu (wszystkie te prace były prowadzone wspólnie z dr. inż. W. Sikorskim, a wkład własny habilitanta wyniósł ogółem 50%). Wyniki prac projektowych oraz wdrożeniowych były publikowane w materiałach konferencyjnych [D57] oraz czasopismach [A10, C27, C34, C39, C44, C45]. Głównymi osiągnięciami naukowymi habilitanta opisanymi w powyższych publikacjach są:

- opracowanie wspólnie z dr. W. Sikorskim koncepcji działania systemu monitoringu wnz w transformatorze energetycznym PDtracker,

- opracowanie algorytmu oceny stanu układu izolacyjnego za pomocą autorskiej metody śledzenia zmian tzw. parametrów skumulowanych (algorytm został zaimplementowany w systemie PDtracker i sprzężony z sygnalizatorem ostrzeżeń i alarmów tego systemu),
- przeprowadzenie analizy dynamiki zmian liczby i amplitudy impulsów wnz zarejestrowanych na transformatorze energetycznym i skorelowanie jej z różnymi czynnikami (temperatura, napięcie, obciążenie), w tym także opracowanie koncepcji wpływu migracji wilgoci w stanie nierównowagi hydrotermicznej na aktywność wnz.

Doświadczenie zdobyte przy pracach nad systemem PDtracker zaowocowało stworzeniem koncepcji nowego, uniwersalnego urządzenia do monitorowania wyładowań niepełnych w wysokonapięciowych urządzeniach elektroenergetycznych, które wyposażone będzie w różnego rodzaju czujniki pomiarowe (metody EA, UHF i HF). Projekt ten, opracowany tym razem z partnerem przemysłowym firmą Mikronika, uzyskał wsparcie ze strony Narodowego Centrum Badań i Rozwoju i od roku 2015 do chwili obecnej jest realizowany przez konsorcjum dwóch wykonawców: Politechnikę Poznańską oraz firmę Mikronika. W tym nowym projekcie habilitant jest jednym z głównych wykonawców (współdziałal w projektowaniu i doborze elementów, testowaniu prototypów, tworzeniu oprogramowania). Wyniki prowadzonych prac zostały opublikowane jak dotąd w publikacji [C48]. W opracowywanym urządzeniu zostały wykorzystane urządzenia i algorytmy stworzone przez habilitanta, co potwierdza stosowny dokument (Załącznik 9).

Literatura:

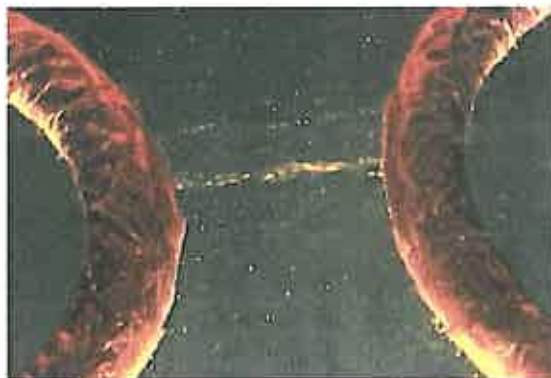
- [A10] Sikorski W., Walczak K., Przybyłek P., 2016 r., *Moisture migration in oil-paper insulation system in relation to online partial discharges monitoring of power transformers*, Energies, Vol. 9, Issue 12, pp. 1-16 (publikacja indeksowana w bazie Web of Science Core Collection, IF=2,262)
- [C27] Sikorski W., Walczak K., Bródka B., Morańda H., Siodła K., Mościcka-Grzesiak H., 2009 r., *Prototypowy system monitoringu on-line wyładowań niepełnych w transformatorach energetycznych przy zastosowaniu metody emisji akustycznej*, Energetyka, Nr: 6, s. 340-346.
- [C34] Sikorski W., Walczak K., Morańda H., Gil W., Andrzejewski M., 2012 r., *System monitoringu wyładowań niepełnych metodą emisji akustycznej – doświadczenia eksploatacyjne*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 88, Nr: 11b, s. 117-121 (publikacja indeksowana w bazie Web of Science Core Collection)
- [C39] Sikorski W., Walczak K., Morańda H., 2013 r., *Detekcja, lokalizacja i monitoring wyładowań niepełnych w transformatorze przy użyciu metody emisji akustycznej*, Wiadomości Elektrotechniczne - 2013, nr 2, s. 14-18.
- [C44] Sikorski W., Walczak K., 2014 r., *PDtracker – system monitoringu wyładowań niepełnych w transformatorze energetycznym*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10/2014, s. 45-49.
- [C45] Sikorski W., Walczak K., 2014 r., *Analiza trendu parametrów wyładowań niepełnych realizowana przez system monitoringu transformatorów energetycznych PDtracker*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 2014, Nr 10, s. 168-171.
- [C48] Walczak K., Sikorski W., Gil W., 2016 r., *Wielomodułowy system monitoringu wyładowań niepełnych oparty na metodach EA, HF i UHF*, Przegląd Elektrotechniczny - 2016, R. 92, nr 10, s. 5-9.

5.3. Badanie zjawisk zachodzących w układzie izolacyjnym papier-olej

Równolegle do badań prowadzonych w zakresie opracowania wiarygodnych metod diagnostyki układów izolacyjnych habilitant uczestniczył również w pracach mających na celu analizę przyczyn, dynamiki rozwoju oraz możliwych skutków wystąpienia różnego rodzaju defektów i procesów degradacji różnego typu układów izolacyjnych. Głównym obiektem badań był układ izolacyjny papier-olej, stosowany powszechnie w transformatorach energetycznych i izolatorach przepustowych wysokiego napięcia. Wśród zagrożeń analizowano zjawisko generowania mostka wyładowczego oraz wpływ obecności wilgoci na właściwości układu izolacyjnego.

Mostek wyładowczy jest jednym z typowych defektów izolacji olejowej transformatora. Na ogół zbudowany jest on z włókien celulozy, często zawilgoconych. Ponieważ tego typu zanieczyszczenia mają przenikalność elektryczną większą od przenikalności oleju, to wciągane są w obszar o największym natężeniu pola, gdzie ustawiają się zgodnie z liniami

sił pola (rys. 13). W wyniku tego powstaje mostek, poprzez który może rozwinąć się wylądowanie. W badaniach opublikowanych w [C2, D8 i D10] obserwowano proces tworzenia się i rozwoju mostka w aspekcie towarzyszących temu wylądowań niepełnych. Najważniejszym osiągnięciem prowadzonych badań było wykazanie, że dynamika formowania się mostka zależy przede wszystkim od stopnia zawilgocenia włókien celulozy, a wylądowania niepełne towarzyszą temu procesowi tylko do momentu uzyskania połączenia między dwoma elektrodami, a ich poziom zależy od rezystywności samego mostka. Badania były częścią szerszej zakrojonych prac związanych z projektem pt. „Wzbogacenie odcisku palca w procedurze rozpoznania defektów o parametry czasowe wylądowań niepełnych” finansowanym przez KBN (Załącznik 4).



Rys. 13. Mostek wylądowczy między elektrodami prętowymi owiniętymi papierem izolacyjnym w oleju mineralnym zanieczyszczonym pyłem celulozowym i zawilgoconym; $U = 8 \text{ kVrms}$, $d = 1 \text{ cm}$

Dużo groźniejszym zjawiskiem dla izolacji papierowo-olejowej jest wzrost jej poziomu zawilgocenia, dlatego analizie tego zagadnienia habilitant poświęcił znacznie więcej czasu. Badania były ukierunkowane zarówno na ocenę warunków wystąpienia groźnych i gwałtownych efektów prowadzących do uszkodzenia izolacji (np. na skutek wystąpienia efektu bąbelkowania), jak i analizę ograniczeń jakie wprowadza wzrost zawilgocenia w zakresie eksploatacji urządzenia.

Analiza zagadnień teoretycznych związanych z oceną zagrożenia pracy transformatora jakie wprowadza nadmierne zawilgocenie jego izolacji zostało przeanalizowane teoretycznie i opisane w publikacjach [C25 i C26]. Osiągnięciem naukowym prowadzonych prac było stworzenie wytycznych w zakresie eksploatacji zawilgoconych transformatorów energetycznych w powiązaniu z krytycznymi wartościami temperatury (ich obciążalnością) określonymi np. w Ramowej Instrukcji Eksploatacji Transformatorów.

Z kolei w pracy [A10] na podstawie badań laboratoryjnych zwrócono uwagę na wpływ poziomu zawilgocenia izolacji na aktywność wylądowań niepełnych oraz wykazano, że krytyczne zawilgocenie w połączeniu z dynamiczną migracją wody z celulozy do oleju powiązanej ze zmianami temperatury może prowadzić do gwałtownych efektów, w tym przebicia. Wnioski z prowadzonych prac odnoszą się wprost do nastaw i funkcjonowania systemów chłodzenia transformatorów energetycznych.

Stosunkowo najwięcej uwagi habilitant poświęcił na analizę zjawiska, uznawanego za jedno z bardziej niebezpiecznych, czyli tzw. *bubble effect* (efekt bąbelkowania). Jest to proces gwałtownego uwalniania pary wodnej z izolacji celulozowej na skutek przyrostu temperatury, co w efekcie może prowadzić w krótkim czasie do niebezpiecznego wzrostu ciśnienia w kadzi transformatora oraz osłabienia izolacji olejowej, aż do jej przebicia. W artykule [C8] opisano podstawowe parametry, jakie mają wpływ na efekt bąbelkowania. Przedstawiono również przykład awarii, do której doszło na jednym z transformatorów sieciowych, potwierdzając tezę przyczyny awarii badaniami laboratoryjnymi. Z kolei artykuł [C14] zawiera opis wyników badań laboratoryjnych przeprowadzonych na modelach, które miały na celu opracowanie sposobów monitorowania zjawiska oraz jego wczesnego

wykrywania. Kolejne publikacje rozszerzały zakres analizy problemu o nowe materiały izolacyjne (ester syntetyczny). Np. w artykule [C37] zestawiono na zasadzie porównania dwie cieczki elektroizolacyjne olej mineralny i ester syntetyczny. Badania laboratoryjne pokazały, że ester cechuje się wyższą temperaturą inicjacji *bubble effect'u* oraz mniejszą dynamiką zjawiska po jego wystąpieniu. Wnioski z prowadzonych badań pokazują zatem, że zamiana powszechnie stosowanego oleju mineralnego na ester syntetyczny może nieść pozytywne efekty nie tylko z punktu widzenia ekologii (ester jest cieczą biodegradowalną), ale również ograniczenia zagrożeń wynikających z możliwości wystąpienia niebezpiecznego zjawiska bąbelkowania.

Nowatorskim zagadnieniem na skalę światową była ocena możliwości wystąpienia zjawiska bąbelkowania w izolatorach przepustowych typu OIP (*Oil Impregnated Paper*) oraz RBP (*Resin Bonded Paper*). Prace związane z tą problematyką były prowadzone w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Badań (Załącznik 4). Habilitant wraz z współautorami publikacji [A7] i [A9] postawili tezę, że zjawisko bąbelkowania jest możliwe również w izolatorach przepustowych i udowodnili ją na podstawie badań na modelach laboratoryjnych. We wskazanych pracach potwierdzono również, że zamiana oleju mineralnego na ester syntetyczny jest bardzo korzystna, ponieważ w znaczący sposób obniża zagrożenie związane z wystąpieniem *bubble effect* – podwyższa temperaturę inicjacji oraz ze względu na większą rozpuszczalność wody zmniejsza ciśnienie w osłonie. Na bazie zdobytych doświadczeń przygotowano zostało zgłoszenie patentowe [P2].

Z problemem zawilgocenia transformatorów energetycznych o izolacji papierowo-olejowej wiąże się również zagadnienie suszenia izolacji w miejscu zainstalowania jednostki. Problematyka ta znalazła się również w kręgu zainteresowania habilitanta. W 2009 roku projekt celowy bazujący na metodzie suszenia LFH (*Low Frequency Heating*), złożony w Ministerstwie Nauki i Szkolnictwa Wyższego, którego habilitant był menadżerem technicznym, otrzymał dofinansowanie. Jednakże ze względu na wycofanie się partnera przemysłowego projekt na samym początku realizacji został niestety przerwany. Doświadczenie zebrane przez habilitanta na etapie tworzenia wniosku oraz tuż po rozpoczęciu projektu pozwoliło jednak zdobyć pewną wiedzę ekspercką. Z tego względu w 2013 roku został on poproszony o przygotowanie wystąpienia nt. „Metody suszenia izolacji transformatora energetycznego w miejscu zainstalowania” podczas warsztatów, które towarzyszyły Międzynarodowej Konferencji Transformatorowej „Transformator 2013” [D56]. Obecnie habilitant jest jednym z głównych wykonawców projektu finansowanego przez NCBiR i dotyczącego „Mobilnego systemu suszenia izolacji transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem medium ciekłego” (Załącznik 4).

Literatura:

- [A7] Przybyłek P., Morańda H., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., 2012 r., *Can the bubble effect occur in an OIP bushing insulator?*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, Issue 6, pp. 1879-1883 (publikacja indeksowana w bazie Web of Science Core Collection, IF=1,36).
- [A9] Przybyłek P., Morańda H., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., 2015 r., *The bubble effect in bushings – investigations on models*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, Issue 6, pp. 3405-3412 (publikacja indeksowana w bazie Web of Science Core Collection, IF=1,306).
- [A10] Sikorski W., Walczak K., Przybyłek P., 2016 r., *Moisture migration in oil-paper insulation system in relation to online partial discharges monitoring of power transformers*, Energies, Vol. 9, Issue 12, pp. 1-16 (publikacja indeksowana w bazie Web of Science Core Collection, IF=2,262).
- [C2] Morańda. H., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., 2002 r., *Zjawiska tworzenia się mostka w zanieczyszczonym oleju przy napięciu przemiennym i analiza towarzyszących wylądowań niezupełnych*, Przegląd Elektrotechniczny, Nr: 10s/2002, s. 202-205.
- [C8] Gielniak J., Morańda H., Neumann S., Ossowski M., Przybyłek P., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., 2005 r., *Warunki wystąpienia „bubble effect” w transformatorze o izolacji papierowo-olejowej*, Energetyka, Zeszyt tematyczny nr: 6, s. 120-122.
- [C14] Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Gielniak J., Neumann S.R., Przybyłek P., Walczak K., Sikorski W., Siodła K., Staniek P., 2006 r., *Bubble effect – powstawanie i monitorowanie*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 1k/2006, s. 166-169.
- [C25] Graczkowski A., Gielniak J., Walczak K., Bródka B., 2009 r., *Przyczyny oraz najważniejsze skutki zawilgocenia izolacji transformatorów*, „Pomiary, Automatyka, Kontrola”, Vol.: 55, Nr: 1, s. 41-43.

- [C26] Mościcka-Grzesiak H., Morańda H., Gielniak J., Graczkowski A., Przybyłek P., Walczak K., 2009 r., *Ograniczenia obciążalności transformatorów o zawilgoconej izolacji*, „Pomiary, Automatyka, Kontrola”, Vol.: 55, Nr: 1, s. 47-49.
- [C37] Przybyłek P., Morańda H., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., 2012 r., *Bubble Effect w układzie izolacyjnym papier-ester syntetyczny*, Prace Instytutu Elektrotechniki / Instytut Elektrotechniki. - 2012, z. 259, s. 13-17, p-ISSN: 0032-6216.
- [D8] Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Walczak K., 2002, *Partial Discharges Generated During Creating and Development of Bridge in Transformer Oil at AC Voltage*, XIth International Workshop on High Voltage Engineering, Karpacz.
- [D10] Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Walczak K., 2003, *Dynamics of Bridge Creating in Contaminated Oil At AC Voltage and Analysis of Accompanying Partial Discharges*, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, Holandia.
- [D56] Walczak K., 2013, *Metody suszenia izolacji stałej transformatora energetycznego w miejscu zainstalowania*, Międzynarodowa Konferencja Transformatorowa TRANSFORMATOR 2013, Gdańsk, 5-7 czerwca, s. C/1-9

5.4. Poprawa wiarygodności metody DGA (Dissolved Gas Analysis) wykorzystywanej do diagnostyki transformatorów energetycznych

Analizę gazów rozpuszczonych w oleju (Dissolved Gas Analysis – DGA) uznaje się za jedną z podstawowych metod diagnostyki transformatorów energetycznych o izolacji papierowo-olejowej. W metodzie tej ocenia się stężenie gazów charakterystycznych (jak np. wodoru, tlenku i dwutlenku węgla czy węglowodorów), których wzrost jest sygnałem rozwijającego się defektu izolacji. Do podstawowych zalet metody należy niewątpliwie brak konieczności wyłączenia urządzenia z ruchu (próbki oleju pobiera się podczas normalnej pracy urządzenia), możliwość wykrywania defektów we wczesnym stadium i śledzenia ich rozwoju w czasie, możliwość wykrywania uszkodzeń o charakterze cieplnym i elektrycznym, bezinwazyjność oraz czułość. Pomimo tego, że metoda DGA jest stosowana w diagnostyce transformatorów od ponad 50 lat, wciąż prowadzi się prace nad poprawą jej wiarygodności. Wynika to z faktu, że procedura pomiarowo-analityczna składa się wielu elementów, z których praktycznie każdy może wprowadzić znaczące błędy do końcowego wyniku i dać w efekcie błędną diagnozę. Problem ten został przedstawiony przez habilitanta oraz współautorów w dwóch istotnych publikacjach [C33] i [A5].

W artykule pierwszym [C33], na bazie międzylaboratoryjnych badań, dowiedziono słabą odtwarzalność metody DGA. Wskazano na czynniki wpływające na rozbieżności w uzyskiwanych wynikach i na tej podstawie sformułowano zalecenia. Wśród najważniejszych należy wymienić sugestie w zakresie sposobów przechowywania próbek oraz metod kalibracji chromatografu, które stały się dobrą praktyką w zakresie ekspertyz prowadzonych w ramach laboratorium fizyko-chemicznego Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej.

W artykule drugim [A5] z kolei analizowano możliwości poprawy interpretacji wyników uzyskanych z chromatografu, czyli poprawę wiarygodności metod rozpoznawania defektu. Standardowo w analizie DGA stosuje się wybraną metodę (z pośród kilkunastu dostępnych), która pozwala na przypisanie defektu do jednej z grup (np. defekty elektryczne, ciepłe, czy będące następstwem wyładowań niezupełnych). W opracowanych metodach (np. IEC, Doernenburg'a, Rogers'a, Duval'a) klasyfikacja odbywa się na bazie oceny wartości tzw. ilorazów gazów charakterystycznych. W praktyce okazuje się jednak, że interpretacja wyników z wykorzystaniem danej (jednej) metody nie zawsze daje jednoznaczne rozwiązanie, a czasem wręcz wyniki uzyskane przy zastosowaniu dwóch różnych metod wzajemnie się wykluczają. Aby poprawić wiarygodność procesu rozpoznawania defektu coraz częściej sięga się po zaawansowane algorytmy sztucznej inteligencji np. sztuczną sieć neuronową (SSN). W artykule [A5] habilitant wraz ze współautorami zaproponowali właśnie takie podejście. Koncepcja zastosowania SSN wymagała przeprowadzenia procedury wyboru odpowiedniej metody klasyfikacji defektu, wyboru typu SSN oraz zaprojektowania odpowiedniego modelu sieci. Procesy projektowania, uczenia i testowania sieci pozwoliły wybrać optymalny wariant. W efekcie prowadzonych prac zostało stworzone wiarygodne

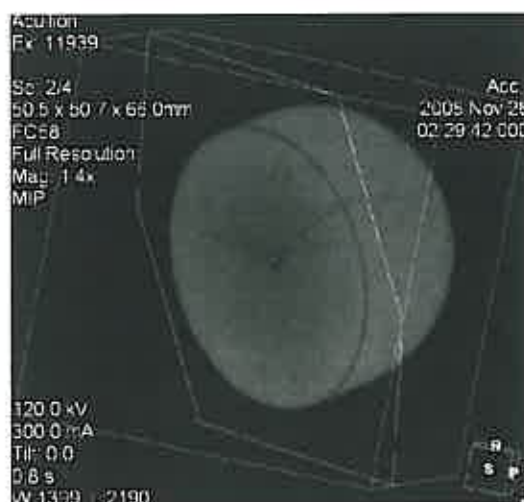
i funkcjonalne oprogramowanie do diagnostyki transformatorów energetycznych, co jest znaczącym osiągnięciem aplikacyjnym grupy autorów.

Literatura:

- [A5] Walczak K., Pruchnicki M., Przybyłek P., 2010 r., *Interpretacja wyników analizy gazów rozpuszczonych w oleju z użyciem sztucznej sieci neuronowej w aspekcie oceny stanu transformatora energetycznego*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol.:86, Nr: 11b, s. 275-278. (publikacja indeksowana w bazie [Web of Science Core Collection](#), IF=0,242).
- [C33] Przybyłek P., Walczak K., 2012 r., *Analiza gazów rozpuszczonych w oleju – badania międzylaboratoryjne*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol: 88, Nr: 11b, s. 244-247 (publikacja indeksowana w bazie [Web of Science Core Collection](#)).

5.5. Wykorzystanie zjawiska promieniowania rentgenowskiego do badań i diagnostyki urządzeń wysokiego napięcia

Prace zapoczątkowane przez habilitanta w ramach pracy doktorskiej pt. „Zależność zjawisk przedwyładowczych natury elektronowej emisji polowej od ciśnienia gazów reszkowych w komorze próżniowej” były przez pewien czas jeszcze kontynuowane po otrzymaniu stopnia doktora. Szczególnie ciekawym i aplikacyjnym wątkiem prowadzonych badań było zagadnienie wykorzystania pomiaru emisji promieniowania rentgenowskiego jako alternatywy do pomiaru prądu elektronowej emisji polowej. Pomiar tego typu dokonywany jest zdalnie i nie wymaga tak złożonej aparatury jak ta stosowana przy analizie prądu emisji polowej. Efekty prowadzonych prac zostały opublikowane i zaprezentowane na międzynarodowej konferencji z cyklu ISDEIV w publikacji [D7]. Wykazano w niej, że przy otwartych zestykach wyłącznika próżniowego i po doprowadzeniu odpowiednio wysokiego napięcia moc dawki promieniowania rentgenowskiego mierzona za pomocą sondy dozymetrycznej jest skorelowana z poziomem ciśnienia reszkowego. Analizując zatem zmiany tego parametru w czasie można diagnozować w sposób nieinwazyjny i zdalny stan komory próżniowej wyłącznika.



Rys. 14. Trójwymiarowy obraz badanego obiektu otrzymany za pomocą tomografu komputerowego i przekształcony specjalistycznym programem; na zdjęciu uchwycono ślad po wyładowaniu wewnątrz materiału

Analiza zagadnień związanych z naturą zjawiska emisji promieniowania rentgenowskiego zaowocowała również badaniami w zakresie defektoskopii materiałów i układów elektroenergetycznych. Współczesne tomografy komputerowe, stosowane głównie w medycynie, pozwalają na uzyskiwanie na tyle dokładnych obrazów, że możliwe staje się obserwowanie mikrodefektów struktury materiału elektroizolacyjnego (rys. 14). Tego typu badania otwierają drogę do analizy np. uszkodzenia układu izolacyjnego lub też wykrycia

błędów na etapie ich produkcji. Przykłady takich badań wykonanych na izolatorach wysokiego napięcia zostały przedstawione w artykule [A6] oraz w pracy dyplomowej. Otrzymane wyniki prowadzonych prac zostały dostrzeżone i wyróżnione przez gremia naukowe, ponieważ artykuł przedstawiony podczas konferencji naukowej Inżynieria Wysokich Napięć 2010 otrzymał nagrodę za najlepszy plakat (**Załącznik 10**), a praca dyplomowa poruszająca tę problematykę została wyróżniona w konkursie im. Prof. Jerzego I. Skowrońskiego (**Załącznik 10**).

Literatura:

- [A6] Walczak K., Waszkiewicz A., 2010 r., *Wykrywanie defektów w izolacji stałej urządzeń elektroenergetycznych za pomocą promieniowania X*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol.:86, Nr. 11b, s. 279-282 (publikacja indeksowana w bazie Web of Science Core Collection, IF=0,242).
- [D7] Walczak K., 2002, *Method for Vacuum State Evaluation Based on Analysis of Dynamics Changes of Electron Field Emission Current and X-radiation in Time*, XXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Tours, Francja (publikacja indeksowana w bazie Web of Science Core Collection).

6. Podsumowanie działalności naukowej – dane bibliometryczne

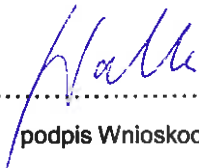
Habilitant jest autorem lub współautorem **105** publikacji zamieszczonych w czasopiśmie lub materiałach konferencji krajowych i międzynarodowych, a także **15** prac naukowych niepublikowanych oraz **107** opracowań dla podmiotów gospodarczych. Habilitant jest także współautorem dwóch zgłoszeń patentowych.

Ze zbioru prac publikowanych **10** jest wykazywanych w bazie JCR. Sumaryczny dwuletni **Impact Factor** czasopism dla tych publikacji według listy Journal Citation Reports zgodny z rokiem opublikowania wynosi **8,4**. Sumaryczna liczba punktów **MNiSW** dla publikacji habilitanta wynosi **M=478**.

Wynikiem przeszukiwania bazy **Web of Science Core Collection** (stan na 16.07.2018) jest **259** cytowań (w tym **238** cytowań obcych) **38** publikacji autorstwa lub współautorstwa habilitanta oraz wskaźnik **H-index=5**.

Wynikiem przeszukiwania bazy **Scopus** (stan na 16.07.2018) jest **408** cytowań (w tym **365** cytowań obcych) **72** publikacji autorstwa lub współautorstwa habilitanta oraz wskaźnik **H-index=6**.

Wynik analizy bibliometrycznej sporządzonej przez Oddział Informacji Naukowej Biblioteki Politechniki Poznańskiej został zamieszczony w **Załączniku 6**.


.....
podpis Wnioskodawcy