

Marek Olesz

Politechnika Gdańska

Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Załącznik nr 1

**Autoreferat informujący o zainteresowaniach
i osiągnięciach w działalności naukowo-badawczej,
dydaktycznej i organizacyjnej**

Gdańsk 2017 r.

Autoreferat informujący o zainteresowaniach i osiągnięciach w działalności naukowo-badawczej, dydaktycznej i organizacyjnej

1. IMIĘ I NAZWISKO

Marek Olesz

2. POSIADANE STOPNIE NAUKOWE Z PODANIEM NAZWY, MIEJSCA I ROKU UZYSKANIA

Politechnika Gdańska, Wydział Elektryczny, magister inżynier elektryk, 16.07.1990 r. praca dyplomowa magisterska pt. „Wytrzymałość udarowa folii polietylenowej”.

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, doktor nauk technicznych, 27.10.1998 r. praca doktorska pt. „Wpływ udarów łączeniowych na wytrzymałość długotrwałą polietylenu sieciowanego”.

3. PRZEBIEG PRACY ZAWODOWEJ

Okres	Instytucja	Stanowisko
01.10.1989 – 30.09.1990	Politechnika Gdańska, Wydział Elektryczny	asystent stażysta w Katedrze Wysokich Napięć
1.10.1990 – 30.11.1998	Politechnika Gdańska, Wydział Elektryczny	asystent
1.12.1998 – 30.09.2013	Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki	adiunkt
od 01.10.2013 r.	Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki	starszy wykładowca

Stanowiska organizacyjne pełnione obecnie w uczelni - Pełnomocnik Dziekana Wydziału Elektrotechniki i Automatyki ds. ochrony radiologicznej w Katedrze Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć.

Stanowiska organizacyjne pełnione w przeszłości w uczelni - członek Rady Wydziału w kadencji 2012 – 2016.

Uwaga: wszystkie odwołania do publikacji w nawiasach kwadratowych w układzie literowo – liczbowym są zgodne z załącznikiem nr 3.

4. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA WYNIKAJĄCEGO Z ART. 16 UST 2. USTAWY z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Diagnostyka ograniczników przepięć oraz izolacji kondensatorów niskiego napięcia.

Osiągnięcie naukowe stanowią:

w zakresie diagnostyki ograniczników przepięć:

monografia:

Olesz M., „Problemy pomiaru prądów upływowych ograniczników przepięć”, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2016, 133 s. ISBN 978-83-7348-665-2 [1]

publikacje:

Olesz M., Algorytmy obliczania składowej czynnej prądu upływowego ograniczników przepięć (The algorithms for calculating the leakage current resistive component in surge arresters), Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 88, No. 11A, pp. 30 – 33, 2012, (**Impact Factor 0,244**) [2]

Olesz M., Wyznaczanie składowej rezystancyjnej prądu upływu ogranicznika metodą wektorów ortogonalnych, (The determination of the resistive leakage current in surge arresters with orthogonal vectors method), Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 88, No: 11B, pp. 188-191, 2012, (**Impact Factor 0,244**), udział 35%, [3]

Smulko J., **Olesz M.**, Hasse L., et al., Problems of varistor quality assessment during exploitation, Metrology and Measurement Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 395-404, 2012, (**Impact Factor 1,14**), udział 35% [4]

w zakresie diagnostyki izolacji kondensatorów niskiego napięcia:

rozdział w książce o zasięgu krajowym:

Olesz M., Józwiak K.: Metody pomiaru izolacji kondensatorów niskonapięciowych, Metrologia dziś i jutro: praca zbiorowa/ red. W. Kiciński, L. Swędrowski. Gdańsk: Katedra Metrologii i Systemów Informacyjnych, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska, 2009, s. 185-192, udział 75% [5]

publikacje:

Smulko J., Józwiak K., **Olesz M.**, Quality testing methods of foil-based capacitors, Microelectronics Reliability, Vol. 52, No. 3, pp. 603-609, 2012 (**Impact Factor 1,137**), udział 50%) [6]

Smulko J., Józwiak K., **Olesz M.**, Hasse L.: Acoustic emission for detecting deterioration of capacitors under aging, Microelectronics Reliability, Vol. 51, No. 3, pp. 621-627, 2011, (**Impact Factor 1,167**), udział 35% [7]

Józwiak K., **Olesz M.**, Hasse L., Smulko J.: Pomiar wyładowań niepełnych w kondensatorach foliowych, (Partial discharges measurements in the foil-based capacitors), Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 86, No. 9, pp. 55-58, 2010 (**Impact Factor 0,244**), udział 35%) [8]

4.2. Istotne osiągnięcie naukowe dotyczące tematyki oceny stanu technicznego warystorowych ograniczników przepięć - omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników

Warystorowe ograniczniki przepięć stosuje się, jako podstawowe aparaty zapewniające prawidłową koordynację izolacji w sieciach elektroenergetycznych i instalacjach elektrycznych. Są to aparaty wielokrotnego działania instalowane zazwyczaj pomiędzy przewodem fazowym a ziemią, równoległe do chronionej izolacji. W czasie oddziaływania

napięcia znamionowego sieci przez ogranicznik przepływa niewielki prąd upływowy, którego wartość może być wykorzystana do oceny stopnia jego zesterzenia.

Prąd upływowy w warystorze o prawidłowym stanie technicznym ma charakter sinusoidalny wyprzedzając napięcie o kąt przesunięcia fazowego bliski 90° elektrycznych. Oprócz znacznej składowej pojemnościowej występuje przepływ prądu czynnego wykorzystywanego często do oceny stanu technicznego ogranicznika. Podczas uszkodzenia struktury ogranicznika następuje odwrócenie podanych proporcji – prąd czynny silnie wzrasta zmieniając dotychczasowy, dominujący charakter pojemnościowy stosu warystorów.

W praktyce eksploatacyjnej wprowadzono szereg określeń dla prądu upływowego mierzonego w różnych stanach napięciowych ogranicznika. Przykładowo dla ograniczników pracujących w sieciach średniego napięcia (SN) można wyznaczać przy różnych wymuszeniach napięciowych następujące prądy:

- prąd odniesienia (I_{ref}) – określona przez wytwórcę, wyższa wartość szczytowa składowej czynnej prądu z obu biegunowości, o częstotliwości sieciowej, wykorzystywana do wyznaczenia napięcia odniesienia ogranicznika; w przypadku ograniczników jednokolumnowych prąd ten zazwyczaj wynosi $1 \div 5$ mA, co odpowiada gęstości powierzchniowej $0,05 \div 1$ mA/cm² powierzchni warystora,

- prąd trwały ogranicznika (I_c) – wartość skuteczna lub amplituda prądu przepływającego przez ogranicznik przy doprowadzeniu napięcia trwałej pracy U_c ,

Dodatkowo ze względu na nieliniową charakterystykę $u(i)$ ogranicznika wynikającą z właściwości ceramiki warystorowej oraz zazwyczaj odkształconego napięcia sieci, w praktyce z przebiegu prądu upływowego wyznacza się:

- wartość skuteczną I i jego trzecią harmoniczną I_3 ,
- amplitudę I_m ,
- składową czynną I_R ,
- trzecią harmoniczną dla składowej czynnej I_{3R} .

W czasie wystąpienia przepięcia oczekuje się nagłego zmniejszenia rezystancji ogranicznika, co powoduje odprowadzenie do systemu uziemień prądu wyładowczego, który wywołuje na zaciskach aparatu tzw. napięcie obniżone. Podstawową charakterystyką ogranicznika umożliwiającą jego poprawne skoordynowanie z chronioną izolacją jest zależność napięcia obniżonego od prądu wyładowczego.

W przypadku wystąpienia znacznych i długich w czasie przepięć, szczególnie łączeniowych, silnie wzrasta temperatura warystora, a w celu jej ograniczenia montuje się układy ograniczników równoległych lub zwiększa się wymiary warystorów dla uzyskania większej pojemności cieplnej i nie dopuszczenia do przekroczenia temperatury krytycznej w warunkach przepływu długotrwałego prądu wyładowczego. W takich sytuacjach szczególnie istotna jest jednorodność wewnętrznej struktury warystora, którą uzyskuje się przez odpowiednie zabiegi technologiczne, dobór składników spieku, kontrolę półfabrykatów i produktu końcowego. Istotne jest również monitorowanie parametrów tej struktury w czasie eksploatacji, najlepiej metodami pozwalającymi na ocenę stanu technicznego w instalacji elektroenergetycznej w miejscu użytkowania.

Poprawne określenie stanu technicznego ogranicznika ma ważne znaczenie w eksploatacji sieci elektroenergetycznych i pozostaje w grupie wiodących tematów badawczych [4]. Przebieg charakterystyki $u(i)$ ogranicznika wynika ze struktury wewnętrznej warystorów i ma podstawowe znaczenie w utrzymaniu właściwej koordynacji izolacji, szczególnie ważnej w ochronie generatorów i transformatorów energetycznych. Zmiany starzeniowe warystorów powodują wzrost wartości szczytowej napięcia obniżonego podczas przepływu prądów wyładowczych, co można wykrywać podczas normalnej pracy ogranicznika poprzez monitorowanie prądu upływowego, a szczególnie jego składowej czynnej I_R . W tym zakresie istotne jest dokładne wyznaczenie składowej czynnej prądu upływowego, bez wykonywania

dotychczasowych pomiarów, np. pola elektrycznego lub napięcia. Dodatkowo, w analizie stanu technicznego ogranicznika przepięć pojawiają się trudności polegające na prawidłowym oszacowaniu wartości prądu upływowego dla warunków odniesienia. Wynikają one z braku w literaturze i katalogach wyrobów odpowiednich współczynników poprawkowych pozwalających uwzględnić wpływ temperatury warystorów, wartości i kształtu napięcia sieciowego, a nawet wilgotności powietrza na wynik pomiaru prądu upływowego.

Obecnie wykorzystuje się zasadniczo 2 metody wyznaczania składowej rezystancyjnej prądu upływowego bez pomiaru napięcia:

- kompensacja wpływu trzeciej harmonicznej napięcia [Lundquist 1990],
- metoda przesunięcia prądu [Abul – Malek 2010], [Lee 2005].

Pierwsza metoda wymagająca zastosowania dodatkowej sondy pola elektrycznego (wprowadzającej dodatkowe błędy analizowane w p. 6.2. monografii [1]) pozwala na podstawie rejestracji prądu upływowego wyznaczyć trzecią harmoniczną składowej rezystancyjnej I_{3R} . Otrzymany wynik jest przeliczany na składową rezystancyjną I_R na podstawie udostępnionej przez producenta charakterystyki ogranicznika $I_R/I_{3R} = f(U_c/U_r)$, gdzie U_c i U_r oznaczają odpowiednio napięcie trwałej pracy i znamionowe ogranicznika.

W związku z znacznymi błędami obserwowanymi w pracach doświadczalnych podczas wyznaczania składowej rezystancyjnej wyłącznie na podstawie rejestracji prądu upływowego zaproponowałem w pracy [3] nową metodę opartą na zastosowaniu wektorów ortogonalnych. Opracowana metoda pozwala obliczyć składową czynną prądu upływowego dokładniej niż metoda przesunięcia – szczególnie, jeśli pomiar jest wykonywany w warunkach eksploatacyjnych, kiedy napięcie przyłożone do ogranicznika jest zazwyczaj niższe od napięcia trwałej pracy $U_c < U_r$. Dla przykładowej analizy ogranicznika przepięć względny błąd obliczeń, w stosunku do traktowanych jako wzorcowe wyników wartości składowej czynnej otrzymanych na podstawie oscylogramów napięcia i prądu ogranicznika, nie przekraczał 16%. W tym samym przypadku dla zastosowanej metody przesunięcia względny błąd obliczeń osiągał nawet 335,5%.

W odniesieniu do stanu wiedzy w tematyce wyznaczania i korekty składowej czynnej prądu upływowego ogranicznika moje **istotne osiągnięcia naukowe** opisane w monografii [1] i publikacjach [2, 3] polegają na:

- opracowaniu nowej metody wyznaczania składowej czynnej prądu upływowego ogranicznika bez konieczności pomiaru napięcia przez zastosowanie metody wektorów ortogonalnych,
- wprowadzeniu systemu korekty wyższych harmonicznych napięcia zasilającego poprzez opracowanie uproszczonego modelu ogranicznika.

4.2.1. Wyznaczanie składowej czynnej prądu upływowego metodą wektorów ortogonalnych

W warunkach eksploatacyjnych najprostszym sposobem wyznaczenia składowej czynnej prądu upływowego jest wyłączenie wykorzystanie przebiegu prądowego uzyskanego podczas pomiaru cęgowego na przewodzie uziemiającym ogranicznik przepięć.

Podczas stosowania metody regresji nieliniowej dla przebiegów prądu upływowego występowały problemy związane z obliczeniem poszukiwanych współczynników amplitud prądu czynnego i pojemnościowego dla poszczególnych składowych harmonicznych. W czasie wykonywania obliczeń okazało się, że ze względu na brak stabilności numerycznej procedur programu Matlab podczas rozwiązania układu równań nieliniowych, należy odpowiednio ograniczyć zakres niektórych poszukiwanych zmiennych oraz wprowadzić

warunki początkowe na ich wartości. W monografii [1] zaproponowałem nową procedurę, która w przypadku analizowanych ograniczników umożliwiała skuteczne wyznaczenie wartości wektorów ortogonalnych i ostatecznie obliczenie składowej czynnej prądu upływowego. Porównanie wyników obliczeń różnymi metodami pozwala stwierdzić, że metoda wektorów ortogonalnych, szczególnie przy niewielkich składowych czynnych, daje wyniki dokładniejsze i w związku z tym powinna być zalecana w praktyce eksploatacyjnej. Natomiast w przypadku znacznych uszkodzeń w strukturze stosu ZnO, powodujących duże wartości prądu upływowego i jego składowej czynnej na poziomie 1 mA, można z większą dokładnością stosować prostszą metodę przesunięcia prądu opisaną w [Abul – Malek 2010].

W praktyce eksploatacyjnej najprostsza metoda wyznaczenia składowej czynnej prądu upływowego polega na rejestracji wyłącznie przebiegu prądu i zastosowaniu specjalnych metod jego analizy [Abul – Malek 2010], [Lee 2005], [Lundquist 1990]. Można wówczas zrezygnować z kłopotliwego - szczególnie w sieciach SN i WN – pomiaru napięcia, co dodatkowo wyklucza problemy z zapewnieniem prawidłowych przesunięć fazowych między rejestrowanymi przebiegami $u(t)$ i $i(t)$ w zakresie wyższych harmonicznych. Przebieg prądu rejestruje się, mierząc bezpośrednio sygnał na rezystorze bezindukcyjnym lub wykonując pomiar metodą cęgową – w tym przypadku konieczne jest sprawdzenie charakterystyk cęgów i ich odpowiednie wykalibrowanie w celu poprawnego odtworzenia, kształtu prądu.

Do analizy sygnału prądowego zaproponowałem wykorzystanie metody wektorów ortogonalnych, która zakłada aproksymację za pomocą wzoru (1) przebiegu prądu upływowego $i(t)$ określoną liczbą harmonicznych H , z których każda ma dwie składowe: pojemnościową i czynną, przesunięte względem siebie o kąt $\pi/2$ (1):

$$i(t) = \sum_{k=1}^H (I_{kC} \cos(k\omega t + \phi_k) + I_{kR} \sin(k\omega t + \phi_k)) \quad (1)$$

gdzie:

I_{kC} – amplitudy składowych pojemnościowych poszczególnych harmonicznych rzędu k ,

I_{kR} – amplitudy składowych czynnych poszczególnych harmonicznych rzędu k ,

ϕ_k – kąt przesunięcia pomiędzy składową czynną i wypadkową prądu dla k -tej harmonicznej, równy kątowi przesunięcia pomiędzy harmonicznymi napięcia i prądu upływowego ogranicznika przy założeniu schematu zastępczego RC w układzie równoległym,

ω – pulsacja prądu.

Wyznaczone metodą aproksymacji wartości I_{kC} , I_{kR} , ϕ_k pozwoliły mi na obliczenie składowej czynnej i pojemnościowej prądu upływowego z uwzględnieniem rzędów harmonicznych występujących we wzorze (1). Na podstawie wykonywanych analiz stwierdziłem, że metoda wektorów ortogonalnych cechuje się znacznie większą dokładnością w stosunku do metody przesunięcia, szczególnie w warunkach odkształceń napięcia zasilającego. Metodę tę zastosowałem do wyznaczania składowej prądu upływowego ograniczników przebieg po raz pierwszy w 2012 roku [3]. W tym samym roku ukazała się też praca [Xu 2012], w której zestawiono błędy pomiarowe przy wyznaczaniu składowej czynnej, uzyskiwane dla odkształconej, głównie trzecią harmoniczną, krzywej napięcia przemienne. Autorzy w celu określenia błędu wyznaczania składowej czynnej prądu upływowego ogranicznika analizowali kilka podstawowych metod:

- składowych harmonicznych;
- określenia wartości prądu dla maksymalnej wartości napięcia;
- *Point-On-Wave*, (wyznaczenie w półokresie napięcia punktów czasowych t_1 i t_2 , dla których $u(t_1) = u(t_2)$ i podobnie $i_R(t_1) = i_R(t_2)$, a $i_C(t_1) = -i_C(t_2)$, co pozwala obliczyć $i_R(t_1) = i_R(t_2) = 0,5 \cdot (i(t_1) + i(t_2))$;

Ol

- wektorów ortogonalnych, użytej jednak zgodnie z równaniami (2)–(4), dla których konieczna jest rejestracja napięcia $u(t)$.

$$i_R(t) = i(t) - Ci'_C(t) \quad (2)$$

$$i'_C(t) = \sum_{k=1}^H k\omega U_k \sin(k\omega t + \phi_k + \frac{\pi}{2}) \quad (3)$$

$$C = \frac{\int_0^T i'_C(t)i(t)dt}{\int_0^T i'_C(t)^2 dt} \quad (4)$$

gdzie (zgodnie z [Xu 2012]):

$i(t)$ – przebieg prądu upływowego,

$i'_C(t)$ – składowa pojemnościowa prądu upływowego przypadająca na pojemność jednostkową $C=1$ F ogranicznika,

$i_R(t)$ - przebieg składowej czynnej prądu upływowego,

U_k, ϕ_k – napięcia i kąty przesunięcia poszczególnych harmoniczných otrzymane w analizie FFT przebiegu napięcia $u(t)$ na ograniczniku.

Porównanie przez autorów publikacji [Xu 2012] wymienionych metod przy obecności trzeciej harmonicznej w napięciu zasilającym wskazuje jednoznacznie na najmniejsze błędy (<1%) przy stosowaniu metody wektorów ortogonalnych. Okazuje się, że przy metodzie kompensacyjnej lub przejścia prądu przez zero przy zaledwie 2% zawartości trzeciej harmonicznej napięcia obserwuje się około 20% błąd wyznaczenia pierwszej harmonicznej składowej rezystancyjnej prądu upływowego.

W moich analizach [1, 3] zaproponowałem metodę wektorów ortogonalnych wyłącznie do analizy przebiegu prądu upływowego bez konieczności pomiaru napięcia. Poprzez zastosowanie regresji nieliniowej przebiegu prądu upływowego zależnością wektorów ortogonalnych (1) uzyskałem nowy sposób wyznaczania składowej rezystancyjnej prądu upływowego, dotychczas niestosowany w praktyce. Ze względu na prowadzenie analizy wyłącznie na podstawie przebiegu prądu upływowego metoda ta jest w warunkach eksploatacji prostsza w realizacji w stosunku do analogicznej metody podanej przez [Xu 2012], która wymaga rejestracji zarówno napięcia ogranicznika $u(t)$, jak i jego prądu upływowego $i(t)$.

W praktyce podczas wyznaczania niewiadomych w równaniu (1) mogą występować pewne trudności wynikające z podania niepoprawnych warunków granicznych dla poszukiwanych zmiennych. Do aproksymacji numerycznych stosowałem narzędzie *cftool* programu Matlab, które wykorzystuje metodę najmniejszych kwadratów w dwóch dostępnych algorytmach:

- obszaru zaufania, polegającym na iteracyjnym rozwiązywaniu prostszych zadań (*Trust-Region*), który zastąpił starsze algorytmy z ograniczonym krokiem (z lat 70. XX w.);
- Levenberga-Marquardta, który jest iteracyjnym algorytmem optymalizacji nieliniowej, bazującym na metodach największego spadku i Gaussa-Newtona.

W czasie rozwiązywania zagadnienia regresji nieliniowej podanymi metodami w celu znalezienia współczynników równania (1) bazowałem na metodzie obszaru zaufania bez stosowania dostępnej w programie opcji tzw. metody najmniejszych przyciętych kwadratów, w której oblicza się odchylenia, a następnie po usunięciu tych największych ponownie estymuje się współczynniki w równaniu (1). Postępowanie takie prowadziło do uzyskiwania wyraźnie lepszej stabilności numerycznej i szybkości procesu obliczeń.

4.2.2. Współczynniki korekcyjne dla wyznaczania prądu upływowego i jego składowej czynnej

W związku z cząstkowymi informacjami zawartymi w publikacjach [Hinrichsen 1997], [Fernando 2000], [Zhu 2001] dotyczącymi wpływu napięcia, temperatury i zawartości wyższych harmonicznych w napięciu na prąd upływowy w monografii oceniłem skuteczność posługiwania się uśrednionymi charakterystykami prądu upływowego zależnymi od temperatury, napięcia i zawartości jego składowych harmonicznych. Charakterystyki te są konieczne do prawidłowego przeliczania zmierzonego prądu upływowego na warunki odniesienia. Analizowałem także wpływ odkształceń napięcia zasilającego w sieci na pracę ograniczników przepięć głównie w zakresie zmian prądu upływowego oraz poziomu składowej rezystancyjnej i traconej mocy w stosie warystorowym [1].

W monografii [1] na podstawie przeprowadzonych badań określiłem wpływ nieuwzględnienia współczynników poprawkowych dotyczących temperatury i napięcia na zmierzoną wartość prądu upływowego, co dotychczas nie było analizowane w publikacjach [Abdul – Malek 2008], [Souza 2004] dotyczących problematyki pomiaru prądów upływowych. Okazuje się, że błędy wprowadzane przez zmianę temperatury w zakresie do 388 K (115°C) przy napięciu na poziomie $0,8U_c$ zazwyczaj wynoszą do 20%.

Na podstawie wprowadzonych modeli i badań określiłem wpływ wyższych harmonicznych napięcia zasilającego na wartość prądu upływowego [1]. Wniosek dotyczący niewielkiego wpływu wyższych harmonicznych napięcia na składową czynną prądu upływowego zasadniczo upraszcza diagnozowanie ograniczników w warunkach występowania wyższych harmonicznych. Tego rodzaju badania powinny być prowadzone dalej w kierunku określenia poziomu składowej czynnej prądu upływowego przy współdziałaniu harmonicznych różnych rzędów w napięciu zasilającym. Można w tym przypadku wykorzystać źródła napięciowe o regulowanej zawartości wyższych harmonicznych i wzajemnych przesunięciach między nimi. Badania tego typu umożliwiłyby sprawdzenie w praktyce poprawności wprowadzonych modeli przy dość złożonych narażeniach sinusoidalnych o różnych częstotliwościach. Potwierdzeniem znikomego wpływu przebiegów zakłóceń o wyższych częstotliwościach [1, 3] na wynik składowej czynnej prądu upływowego jest zaproponowany przeze mnie sposób korekty prowadzący do uwzględnienia w obliczeniach tylko kilkunastu harmonicznych nieparzystych i podstawowej. Przykładowo wykluczenie z obliczeń harmonicznych powyżej 13 – rzędu miało niewielki wpływ na poziom składowej czynnej prądu upływowego. Porównanie wartości składowej czynnej prądu upływowego I_R obliczonego różnymi metodami:

- na podstawie przebiegów napięcia i prądu dla pierwszej harmonicznej,

- metodą mocy czynnej – z zależności: $P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n i_n$ jako sumę iloczynów wartości chwilowych prądu $i(t)$ i napięcia $u(t)$ w czasie próbkowania zawierającym całkowitą liczbę okresów napięcia,

- z korektą wpływu harmonicznych napięciowych wyższych rzędów na podstawie zaproponowanego modelu ogranicznika,

pozwała zauważyć, że wartości składowej czynnej prądu upływowego nie różnią się więcej niż o 5%, pod warunkiem zastosowania powyższych metod przy napięciach niższych od U_c oraz składowej czynnej nie przekraczającej 25% wartości prądu upływowego. W związku z tym wymienione metody wyznaczania składowej czynnej prądu upływowego mogą być stosowane zamiennie co pozwala np. stosując metodę mocy czynnej znacznie uprościć obliczenia.

W treści monografii także lepiej wyjaśniłem problem zależności prądu upływowego od temperatury i napięcia. Na podstawie wykonanych badań ograniczników pochodzących od

różnych producentów ustaliłem, że charakterystyki korekcyjne wpływu temperatury różnią się między sobą. Cechą serii ograniczników może być znaczny rozrzut zarówno wartości prądu upływowego, jak i uśrednionych wartości współczynnika k_T . Zachowanie takie powoduje konieczność stosowania charakterystyk pasmowych z charakterystyką uśrednioną na podstawie przebadania znacznej liczby próbek. Dodatkowym problemem jest występowanie szczególnie dużych rozrzutów współczynnika temperaturowego dla ograniczników o niewielkich gabarytach, stosowanych w aplikacjach niskonapięciowych.

Analiza ograniczników o różnych napięciach trwałej pracy tego samego producenta wskazuje na istotne różnice w przebiegu charakterystyk korekcyjnych. Przy niższych napięciach U_C współczynniki korekcyjne osiągają większe wartości, co może mieć związek z łatwiejszym nagrzewaniem mniejszej objętościowo struktury warystora w czasie przepływu prądów upływowych.

Istotnym osiągnięciem naukowym w przedstawionej monografii jest opracowanie kompleksowej metodyki wyznaczania składowej czynnej prądu upływowego ogranicznika poprzez wykorzystanie składowych ortogonalnych harmonicznych prądu upływowego ogranicznika. Na podstawie wykonanych badań prądu upływowego w różnych warunkach podałem odpowiednią procedurę matematyczną oraz zaproponowałem sposób przeliczania otrzymanych wartości składowej czynnej prądu upływowego ogranicznika przepięć na parametry odniesienia wynikające z amplitudy, kształtu napięcia oraz temperatury warystorów.

4.3. Istotne osiągnięcie naukowe dotyczące tematyki diagnostyki izolacji kondensatorów niskiego napięcia - omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników

Dotychczasowe metody oceny jakości kondensatorów z izolacją polipropylenową wymagają uciążliwych prób starzenia długotrwałego. Wyniki tego rodzaju prób są przedstawiane cząstkowo w materiałach technicznych producentów kondensatorów. W literaturze nie publikuje się wyników prób starzeniowych partii kondensatorów o dużej liczebności (rzędu kilkudziesięciu) i w związku z tym brakuje wiarygodnych metod statystycznych analizy ich stanu technicznego. Fakt ten potwierdzają wnioski pracy przeglądowej – [Huai Wang 2013]. W dołączonej do publikacji listy 56 artykułów można znaleźć zaledwie dwie pozycje prezentujące metody wyznaczenia współczynnika ESR (zastępczej rezystancji szeregowej zależnej od temperatury i częstotliwości napięcia przyłożonego do izolacji), który ma wpływ na czas życia izolacji kondensatora. W publikacjach tych nie przedstawiono wyników statystycznych badań oraz nie wykonywano starzenia długotrwałego.

W związku z brakiem dostępu do wyników badań długotrwałego starzenia izolacji polipropylenowej kondensatorów, przy współdziałaniu Katedry Metrologii i Optoelektroniki na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej oraz Zakładów Miflex w Kutnie prowadzono w Zakładach Miflex wielomiesięczne badania starzeniowe kondensatorów różnych typów pobranych z linii produkcyjnej według narażeń podanych w normie PN - EN 60384 - 14. W dalszym etapie badań wykonywałem na układzie izolacyjnym starzonych i nowych kondensatorów różne testy diagnostyczne poszukując efektywnej metody wykrywania wad technicznych. W początkowej fazie badań na podstawie starzenia długotrwałego próbowałem wytypować skuteczne metody diagnostyczne stanu technicznego izolacji stosując różne wskaźniki rezystancyjne i pojemnościowe oraz pomiar wyładowań niezupełnych (wnz). Doświadczenia te wykonane przeze mnie i dr inż. K. Józwiaka opisano w jednym z rozdziałów książki o zasięgu krajowym [5] oraz w artykule [8].

Podczas końcowego etapu produkcji najczęściej stosowaną metodą dopuszczającą kondensator do eksploatacji jest próba napięciowa. Próba ta polega na przyłożeniu do izolacji

kondensatora napięcia przemiennego lub stałego o ustalonej wartości przykładanego na określony czas - zazwyczaj do jednej minuty. Ponieważ w czasie eksploatacji – mimo stosowania testów napięciowych - dochodzi do nieoczekiwanych uszkodzeń kondensatorów podczas eksploatacji, podjąłem próbę skuteczniejszego wykrywania ukrytych wad. W tym celu na podstawie wstępnych badań izolacji kondensatorów poprzez pomiar wnz metodą akustyczną i elektryczną, pomiar $\text{tg}\delta$ oraz rezystancji izolacji wytypowałem jako najbardziej czułą metodę akustycznego pomiaru wnz [5].

Dodatkowo, otrzymane wyniki badań wskaźników rezystancyjnych i pojemnościowych, wskazują na szereg problemów w ocenie stanu zwijki kondensatorowej w gotowym wyrobie. Wynika to z faktu zastosowania napięć pomiarowych niższych od znamionowego, co powoduje, że pomiary rezystancji izolacji, czy współczynnika strat dielektrycznych charakteryzują się dużą niepewnością w wykrywaniu wadliwych kondensatorów. Znacznie lepsze możliwości daje pomiar wnz. Pełna wiedza o skuteczności metody elektrycznej i akustycznej pomiaru wnz była możliwa dopiero po wykonaniu dodatkowych pomiarów wnz po przeprowadzonych badaniach starzenia. Na ich podstawie stwierdzono, że kondensatory z zakładów Miflex są bardzo dobrej jakości, gdyż po standardowej 1000 h próbie starzenia nie obserwowano jakichkolwiek uszkodzeń. Po zakończeniu badań starzenia ze zbioru analizowanych metod pomiarowych jednoznacznie wskazałem jako obiecujące diagnostycznie wykonywane metodą elektryczną i akustyczną pomiary wnz.

Na podstawie dalszych szczegółowych badań i analiz badań starzeniowych prowadzonych w latach (2009 – 2012) udało się zaproponować następujące dwie nowe metody analizy (opatentowane w [C1, C2]):

- propozycja nowej, bardziej efektywnej metody analizy stanu technicznego połączenia metalizacji folii z czołem kondensatora, która może być stosowana podczas kontroli partii produkcji kondensatorów foliowych jako uzupełnienie metod długotrwałych [6],
- propozycja wykorzystania sygnału wnz mierzonych metoda akustyczną do prognozowania rezystancji izolacji kondensatora oraz czasu jego eksploatacji [7].

Nowa metoda badania stanu technicznego połączenia metalizacji folii z czołem kondensatora polega na wymuszeniu przepływu impulsów prądowych wytwarzanych przy napięciu niższym od napięcia progowego wyładowań niezupełnych w układzie izolacyjnym [6]. Sposób ten sprawdzono dla 40. kondensatorów o izolacji z metalizowanej folii polipropylenowej (pojemność $C = 470 \text{ nF}$ i $7,5 \mu\text{F}$). Jednym z problemów jakościowych kondensatorów metalizowanych jest jakość połączenia okładziny przewodzącej napyłonej na folii z metalicznym czołem zwijki kondensatorowej. Połączenia te poprzez technikę napyłania wykonano w zaniżonej, normalnej i podwyższonej temperaturze w stosunku do ustalonej dla procesu produkcyjnego. Połączenia badano w czasie 20 minut powtarzającymi się impulsami prądowymi charakteryzującymi się gęstością prądu $J_{\text{max}} = 150 \text{ mA/cm}$ i $J_{\text{rms}} = 5 \text{ mA/cm}$ na 1 cm długości okładziny kondensatora. W przypadku nieprawidłowo wykonanych połączeń w wyższych temperaturach obserwowano po wyładowaniach prądowych zmniejszenie pojemności. Mimo pogorszenia stanu technicznego próbek wadliwych (efekt uszkodzania słabych jakościowych połączeń elektrycznych wskutek przegrzania w czasie przepływu prądu) nie obserwowano pogorszenia pojemności dla próbek prawidłowych.

Podane wyżej zjawisko pogorszenia kontaktu między metalizacją folii a czołem zwijki kondensatorowej jest jedną z dwóch przyczyn zmniejszenia pojemności kondensatora, która nie powinna się w czasie eksploatacji obniżyć poniżej 90% pojemności znamionowej. Inną przyczyną jest zjawisko samoregeneracji wynikające z wyłączenia części folii na skutek

odparowania metalizacji wokół lokalnego przebicia dielektryka. W takich sytuacjach w praktyce próbuje się szacować stan techniczny kondensatora na podstawie wskaźników rezystancyjnych (zmiana rezystancji izolacji w funkcji napięcia stałego) i pojemnościowych (pojemność, współczynnik strat dielektrycznych). Stosując analizę statystyczną wykazano możliwość prognozowania krótszego czasu życia za pomocą uzyskiwanych relatywnie większych wartości $\text{tg}\delta$ i mniejszych rezystancji układu izolacyjnego. Z wzrostem czasu starzenia długotrwałego skuteczność takiego przewidywania zasadniczo się poprawia (współczynnik regresji wzrasta z $R=0,3$ do $0,54$ dla wskaźnika rezystancyjnego).

Inna opatentowana w [C2] propozycja diagnostyki stanu technicznego kondensatora polega wykorzystania sygnałów wzn mierzonych metodą akustyczną do prognozowania rezystancji izolacji kondensatora oraz czasu jego eksploatacji [7]. W tym przypadku do oceny rezystancji izolacji kondensatora oraz jego czasu życia wykorzystalem rejestrowane czujnikami piezoelektrycznymi umieszczonymi na obudowie kondensatora przez 1 minutę sygnały akustyczne wyładowań niezupełnych, które występowały wewnątrz badanej izolacji przy określonym w normie napięciu probierczym. Na podstawie zmierzonych sygnałów wyznaczano częstotliwości charakterystyczne, odchylenie standardowe od wartości średniej $\sigma^2 = E[(x - E(x))^2]$ oraz współczynnik spłaszczenia (kurtoza) $\gamma_2 = \frac{E(x - E(x))^4}{\sigma^4} - 3$ opisane w dalszej części.

Metodą Welcha obliczono spektrum sygnału rejestrowanego. Widmo mocy wskazuje dominujące składowe częstotliwości przy zróżnicowanych amplitudach dla różnych próbek kondensatorów, które mogą być skutkiem różnych intensywności wewnętrznych wyładowań niezupełnych oraz wynikać z nieprzewidywalnych sprzężeń akustycznych między czujnikiem piezoelektrycznym i obudową kondensatora. Do porównania zaburzonych przebiegów emisji akustycznej analizowano prawdopodobieństwa odchylenia mierzonego sygnału od rozkładu Gaussa za pomocą kurtozy. Wzrost wartości kurtozy występuje, kiedy dwie lub trzy składowe harmoniczne dominują w krótkich odstępach rejestrowanego sygnału. Zastosowaną funkcją Matlab `specgram` obliczono dyskretną transformatę Fouriera sygnału akustycznego z wykorzystaniem okna przesuwego. Podstawowa składowa harmoniczna dla kondensatorów o pojemności 27 nF i 470 nF wynosi odpowiednio około 100 kHz i 200 kHz i jest odwrotnie proporcjonalna do grubości zastosowanego w konstrukcji dielektryka.

Na podstawie pomiaru wybranych parametrów kondensatorów szacowano jakość całej partii produkcyjnej. W wstępnym badaniu ustalono, że obie badane partie wytrzymały próbę 1000 h starzenia, mimo obecność wyładowań niezupełnych w wielu próbkach badanych wstępnie przed próbą trwałości. Obserwowane różne natężenia sygnału akustycznego mogą sygnalizować zróżnicowanie jakości partii kondensatorów. Po starzeniu zaobserwowano degradację różnych wskaźników jakości (pojemności, rezystancji izolacji, strat dielektrycznych), a następnie badano ich korelację z wybranymi parametrami sygnału akustycznego stosując współczynnik korelacji r_{xy} (5), [Bandat, Piersol 2000].

$$r_{xy} = \frac{\sum_{m=1}^M (x_m - \bar{x})(y_m - \bar{y})}{\left[\sum_{m=1}^M (x_m - \bar{x})^2 \cdot \sum_{m=1}^M (y_m - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (5)$$

Na podstawie wykonanych badań zaobserwowano, że parametry sygnału emisji akustycznej jedynie dla próbki kondensatorów 27 nF wykazują korelację z rezystancją izolacji kondensatorów oraz czasem ich starzenia. Natomiast nie stwierdzono statystycznie istotnej

an

korelacji między zmianą pojemności, strat dielektrycznych, czasem starzenia, a mierzonymi parametrami sygnałów akustycznych towarzyszących wnz.

Istotnym osiągnięciem naukowym przedstawionym w publikacjach [5-8] jest opracowanie nowych sposobów analizy izolacji kondensatorów polipropylenowych niskiego napięcia. Polegają one na wykorzystaniu nowej, bardziej efektywnej metody analizy stanu technicznego połączenia metalizacji folii z czołem kondensatora [6] oraz wykorzystania sygnału wnz mierzonych metodą akustyczną do prognozowania rezystancji izolacji kondensatora oraz czasu jego eksploatacji [7]. Podane metody zostały opatentowane [C1, C2] zespołowo i wdrożone w systemie oceny jakości kondensatorów foliowych w Zakładach Miflex w Kutnie. Jestem głównym pomysłodawcą patentu [C1] oraz współtwórcą obu patentów [C1, C2] poprzez wykonanie większości badań i ich analiz. W pracach [5 – 8] opracowywałem metodykę nadań, wykonywałem większość prac eksperymentalnych oraz analizowałem dane pomiarowe.

Literatura dodatkowa cytowana w punkcie 4

Do p. 4.2

[Abul – Malek 2008] Abdul-Malek Z., Aulia N.: *A new method to extract the resistive component of the metal oxide surge arrester leakage current*, 2nd IEEE Int. Conf. on Power and Energy, 2008, Johor Baharu, Malaysia, pp. 399 – 402.

[Abul – Malek 2010] Abdul-Malek Z. i in.: *Performance analysis of modified shifted current method for surge arrester condition monitoring*. International Conference on High Voltage Engineering and Application 2010.

[Fernando 2000], Fernando S. N., Raghuvier M. R.: *Technique to examine the influence of voltage harmonics on Leakage Current Based MOSA Diagnostic Indicator*, 2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 15-18 October 2000, vol. 2, ISBN 0-7803-6413-9, pp. 596 – 599.

[Hinrichsen 1997] Hinrichsen V., *Monitoring of high voltage metal oxide surge arresters*, VI Jornadas Internacionales de Aislamiento Eléctrico, Bilbao, 22./23.10.1997, Paper 6.4.

[Lee, Kang 2005] Lee B., Kang S.M.: *A new on-line leakage current monitoring system of ZnO surge arresters*. Materials Science and Engineering: B 2005, vol. 119, pp. 13–18.

[Lundquist 1990] Lundquist J. i in.: *New Method for Measurement of the Resistive Leakage Currents of Metal-Oxide Surge Arresters in Service*. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 5, no. 4, 1990, pp. 1811–1822.

[Souza 2004], R. T. De Souza, i inni, *A virtual bridge to compute the resistive leakage current waveform in ZnO surge arrester*, IEEE/PES Trans. And Distr. Conf. and Exposition: Latin America, pp. 255 – 259.

[Xu 2012] Xu Z. et al.: *A current ortogonality metod to extract resistive leakage current of MOSA*. IEEE Trans. Power Delivery 2013, vol. 28, no. 1, pp. 93–101.

[Zhu 2001] Zhu H., Raghuvier M. R., *Influence of representation model and voltage harmonics on metal oxide surge arrester diagnostics*, IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 16, no. 4, 2001.

Do p. 4.3

[Huai Wang 2013], Huai Wang, *Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters – An Overview*, IEEE Trans. on Industry Applications, 2013.

[Bandat, Piersol 2000], J. Bendat, A. Piersol, *Random Data: Analysis & Measurement Procedures*, Wiley & Sons, New York, 2000.

5. Pozostałe osiągnięcia naukowo w dziedzinie badania zjawisk starzeniowych w polietylenie sieciowanym w obecności drzewienia elektrycznego

W latach 2003 – 2007 opublikowałem w czasopiśmie recenzowanym z grupy B (Przegląd Elektrotechniczny) cykl autorskich publikacji dotyczących analizy wyładowań niezupełnych towarzyszących rozwojowi drzewka elektrycznego w polietylenie sieciowanym oraz określenia wielkości ładunku pułapkowanego w obszarach przyelektrodowych:

Olesz M.: Oddziaływanie napięcia na poziom ładunku w obszarze wady polietylenu sieciowanego, Przegląd Elektrotechniczny. Konferencje. Vol. R. 5, nr 3 (2007), s. 169-172, [E40],

Olesz M.: Charakterystyka wyładowań niezupełnych w izolacji polietylenowej przy nakładaniu udarów łączeniowych na napięcie przemienne, Przegląd Elektrotechniczny. Vol. R. 4, nr 1 (2006), s. 186 -189, [E42],

Olesz M.: Wpływ drzewienia elektrycznego na poziom ładunku w obszarze przyelektrodowym izolacji polietylenowej, Przegląd Elektrotechniczny. Vol. R. 4, nr 1 (2006), s. 182-185, [E43],

Olesz M.: Oddziaływanie przepięć łączeniowych na izolację kabli polietylenowych, Przegląd Elektrotechniczny, Konferencje, 2005 (2005), s. 189-192, [E45],

Olesz M.: Wpływ drzewienia elektrycznego na prądy polaryzacyjne i depolaryzacyjne w izolacji polietylenowej, Przegląd Elektrotechniczny, s. 193-196, (2005), [E46],

Olesz M.: Analiza impulsów prądowych towarzyszących rozwojowi drzewienia elektrycznego, Prz. Elektrotech. 2004 nr 10 s. 1029-1032, (2004), [E47],

Olesz M.: Zjawiska przyelektrodowe w procesie degradacji izolacji polietylenowej, (2004), Prz. Elektrotech. 2004 R. Konferencje nr 1 s. 175-178 [E48],

Olesz M.: Wpływ przepięć na pułapkowanie i relaksacje ładunku w folii polietylenowej, Prz. Elektrotech. 2003 R. 1 Konferencje nr 1, IX Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia EUI '03, Zakopane 09-11.10.2003 r., (2003) [E53].

5.1. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowych w dziedzinie badania zjawisk starzeniowych w polietylenie sieciowanym w obecności drzewienia elektrycznego

Jednym z procesów starzenia długotrwałego izolacji polietylenowej kabli elektroenergetycznych występującym w warunkach krytycznego pola elektrycznego jest drzewienie elektryczne. W warunkach eksploatacyjnych głównymi czynnikami przyspieszającymi propagację gałęzi drzewka są amplituda i biegunowość przepięcia łączeniowego. Przepięcie łączeniowe nałożone na robocze napięcie przemienne sieci wprowadza ładunek elektryczny o określonej biegunowości w obszar przyelektrodowy wady izolacji, który zmienia istotnie natężenie pola elektrycznego, a nawet może zapoczątkować przedwczesne uszkodzenie przy naprężeniach poniżej zaprojektowanej wartości. Poziom pułapkowanego ładunku zależy od rodzaju styku (metal – dielektryk, dielektryk – dielektryk), przyłożonego napięcia, temperatury, oraz morfologii polimeru.

Znane w świecie publikacje jakże publikacje, dotyczące oddziaływania napięcia na rozwój drzewienia elektrycznego w izolacji polietylenowej dotyczą zazwyczaj czasu życia wyłącznie dla napięcia przemienne lub udarowego [Vogelsang 2002], [Shanmuga 2013], [Guastavino 2003], [Person 2004], [Qureshi 2012]. Tematyka nakładania przepięć łączeniowych na napięcie robocze jest poruszana w literaturze jedynie w kontekście wyznaczania czasu do przebicia próbek kablowych lub propagacji drzewienia jednak bez

analizy charakterystyk wyładowań niezupełnych w czasie starzenia [Kubota 1994], [Murata 1996], [Wang 1999].

Opublikowane w Przeglądzie Elektrotechnicznym autorskie prace [E40, E42, E43, E45 – E49, E53, E56, E57] były istotnym rozszerzeniem tematyki badań wykonanych podczas realizacji pracy doktorskiej omawiającej warunki propagacji drzewienia elektrycznego w polietylenie sieciowanym przy oddziaływaniu przepięć łączeniowych nakładanych na sieciowe napięcie przemienne. Warunki te określono poprzez aktywność wnz oraz pomiary prądów depolaryzacyjnych w badanych układach izolacyjnych, co stanowi nowe ujęcie problematyki drzewienia elektrycznego.

W opublikowanych artykułach dla zebranych w określonych przedziałach trwania zaburzenia napięciowego wyładowań niezupełnych określiłem ich parametry statystyczne. Następnie poszukiwałem korelacji pomiędzy parametrami statystycznymi wyładowań niezupełnych, a kształtem i rozmiarem drzewka elektrycznego [E42, E45]. Prowadzone badania miały charakter podstawowy, a wyniki zebranych, unikalnych doświadczeń opisałem w autorskich publikacjach [E42, E45, E47, E48, E53], gdzie przedstawiłem ideę metody diagnostycznej polegającej na zastosowaniu napięcia probierczego w postaci cyklicznie nakładanych udarów łączeniowych nakładanych na napięcie przemienne. Udarы umożliwiły wprowadzenie ładunku przestrzennego w obszar wady polietylenu, a równoległa rejestracja pojawiających się wyładowań niezupełnych w obszarze przyelektrodowym pozwalała kontrolować aktywność rozwoju drzewienia.

Na podstawie wykonanych doświadczeń i analiz wymienioną metodą podałem następujące jakościowe kryteria procesu degradacji izolacji podczas drzewienia elektrycznego:

- największa aktywność wnz ma miejsce na czole udaru łączeniowego,
- większe wartości wnz przy udarach dodatnich wynikają z pułapkowanego w izolacji ujemnego ładunku przestrzennego,
- na grzbiecie udarów dodatnich nakładanych przy przejściu napięcia przez zero obserwowałem większe wartości prądu maksymalnego wnz, co wiąże się z usuwaniem ładunku z głębokich stanów pułpkowych,
- na grzbiecie udarów ujemnych nakładanych przy kącie fazowym 90° większe wartości prądu średniego wnz co wiąże się z usuwaniem ładunku z płytkich stanów pułpkowych,
- dla kolejnych etapów rozwoju drzewka stwierdziłem, że w miarę postępu degradacji izolacji (rozwój drzewka) wzrastają wartości prądów wnz w fazie składowej udarowej jak i przejściowej.

W innych pracach opisałem metodę wyznaczania poziomu ładunku w obszarze pojedynczego drzewka za pomocą izotermicznej analizy prądu relaksacyjnego [E40, E43]. Metodę tę od lat 90 – tych powszechnie używano m. in. do diagnostyki stanu technicznego linii kablowych. Polega ona na zmierzeniu prądu depolaryzacyjnego w izolacji kabla, a następnie jego aproksymowania wzorem (6), przez wyznaczenie stałych a_i oraz stałych czasowych relaksacji ładunków τ_i sumy funkcji wykładniczych zgodnie z teorią podaną w [Simons 1973]:

$$I(t) = I_0 + \sum_{i=1}^3 a_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (6)$$

Znając stałe a_i oraz τ_i można wyznaczyć z zależności (7) i (8) wartość ładunku pułapkowanego w obszarach granicznych $Q(\tau_2)$ oraz uszkodzeń $Q(\tau_3)$:

$$Q(\tau_2) = a_1\tau_1\left(1 - e^{-\frac{\tau_2}{\tau_1}}\right) + a_2\tau_2\left(1 - \frac{1}{e}\right) + a_3\tau_3\left(1 - e^{-\frac{\tau_2}{\tau_3}}\right) \quad (7)$$

$$Q(\tau_3) = a_1\tau_1\left(1 - e^{-\frac{\tau_3}{\tau_1}}\right) + a_2\tau_2\left(1 - e^{-\frac{\tau_3}{\tau_2}}\right) + a_3\tau_3\left(1 - \frac{1}{e}\right) \quad (8)$$

Na podstawie wykonywanych obliczeń dla różnych wielkości drzewka elektrycznego o długości 1,5 mm stwierdziłem wyższy poziom zgromadzonego ładunku przy ujemnym napięciu ostrza względem uziemionej elektrody płaskiej. Wartości ładunku przy napięciu 5 kV wynoszą odpowiednio około 500 pC i 1300 pC w przestrzeniach granicznych i defektach dla ostrza ujemnego. Dla ostrza dodatniego ładunki te wynoszą 160 pC na granicy elektroda – polimer oraz 500 pC dla zadrzewionej części izolacji. W zakresie poziomu ładunku w obszarze powierzchnia - polimer uzyskałem wyniki w przybliżeniu zgodne z badaniami termicznie stymulowanej depolaryzacji [Fukuzawa 1999] wykonanych w równoległym połączeniu igieł w układzie ostrze – płyta uziemiona w polietylenie LDPE.

Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość wykorzystania analizy metodą prądów stymulowanych termicznie do niewielkich rozmiarowo wad w układzie izolacyjnym pod warunkiem, zastosowania odpowiednio czulej aparatury pomiarowej. Dodatkowo stwierdziłem opisaną wcześniej aktywność wzn przy udarach dodatnich, która wynika z łatwiejszego pułapkowania ładunku przestrzennego w obszarze przyelektrodowym wady izolacji. Zastosowane nowe metody badawcze umożliwiły mi jakościową, a częściowo również ilościową charakterystykę starzenia izolacji polietylenowej podczas propagacji drzewienia elektrycznego aktywowanego udarami łączeniowymi nakładanymi na napięcie przemienne. Metody te wskazują na możliwość obserwacji procesów starzeniowych w polimerze na poziomie nawet pojedynczego drzewka elektrycznego. Uzyskana wiedza pozwala jednoznacznie wykazać związki pomiędzy aktywnością burzową w czasie miesięcy letnich, a zwiększoną awaryjnością linii kablowych średnich napięć. Wskazuje również na przyspieszanie rozwoju wad kabli w czasie procedur diagnostycznych zarówno napięciem stałym jak również metodą OWTS polegającą na wytwarzaniu przebiegów oscylacyjnych napięcia i przykładaniu ich do izolacji kablowej w celu określenia poziomu i miejsca występowania wylądowań niezupełnych.

Literatura dodatkowa cytowana w punkcie 5

- [Fukuzawa, 1999] Fukuzawa M., Iwamoto M., *TSC Measurement of space charge in low-density PE under a needle-plane electrode system*, IEEE Trans. On DEI, vol. 6, no. 6, (1999), 858-863.
- [Guastavino 2003] F. Guastavino; B. Cerutti, *Tree growth monitoring by means of digital partial discharge measurement*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, Volume: 10, Issue: 1, pp 65 – 72.
- [Kubota, 1994] Kubota T., Takahashi Y., *Development of 500 kV XLPE cables and accessories for long distance underground transmission line*, 1994 IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, pp. 361 – 365.
- [Murata, 1996] Murata Y. Katakai S., Kanaoka M., *Impulse Breakdown Superposed on ac voltage in XLPE cable insulation*, 1996, IEEE Trans. on DEIS, Vol. 3, No. 3, pp. 361 – 365.
- [Person 2004] T. J. Person; A. Mendelsohn, *Laboratory aging of TR-XLPE cables at 500 Hz*, Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2004, pp. 518 – 522.

[Qureshi 2012] M. I. Qureshi, N. H. Malik and A. A. Al-Arainy, *Investigation of electrical treeing in cable grade crosslinked polyethylene (XLPE) insulations*, International Journal of the Physical Sciences Vol. 7(1), pp. 132 - 138, 2 January, 2012 Available online at <http://www.academicjournals.org/IJPS> DOI: 10.5897/IJPS11.917 ISSN 1992-1950 ©2012 Academic Journals.

[Simons, 1973] Simons J. G., Tamm M. C., *Theory of isothermal currents and direct determination of trap parameters in semiconductors and insulators containing arbitrary trap distributions*, Physical Rev., vol. 7, No 8 (1973).

[Shanmuga 2013] K. G. Shanmuga Priya; R. Raja Prabu; C. L. G. Pavan Kumar; R. Sarathi, *Understanding treeing phenomena in XLPE cable insulation under composite voltages*, 2013 IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems, pp. 100 – 104.

[Vogelsang 2002] R. Vogelsang, B. Fruth, T. Farr, K. Fröhlich, *Detection of electrical tree propagation by partial discharge measurements*, 15th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2002, August 2002, Brugge – Belgium.

[Wang 1999], Wang H. i inni, *Electrical tree inception characteristics of XLPE insulation under power-frequency voltage and superimposed impulse voltage*, High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467).

5.2. Podsumowanie

W dodatkowych obszarach aktywności naukowej przedstawionych w p. 5.1 dotyczących zjawisk starzeniowych w izolacji polietylenowej kabli elektroenergetycznych osiągnęłam wartościowe wyniki prac doświadczalnych dotyczących starzenia długotrwałego i ich analizy. Na podstawie obserwacji rozwoju drzewienia elektrycznego i impulsów wyładowań niezupełnych jemu towarzyszących opisałam dynamikę zmian wartości impulsów wzn podczas wprowadzania ładunku elektrycznego w obszar wady izolacji polietylenowej. Ładunek ten mierzyłem pośrednio metodami analizy izotermicznej prądu rozładowania dielektryka oraz termicznie stymulowanej depolaryzacji. Uzyskane rezultaty badań umożliwiły mi w przypadku kabli elektroenergetycznych dokładniejsze określenie stanu izolacji na podstawie pomiarów prądów rozładowania dielektryka i pomiaru wyładowań niezupełnych.

6. Podsumowanie działalności naukowej, dydaktycznej i eksperckiej

Pełne zestawienie moich osiągnięć na polu naukowym, dydaktycznym i eksperckim zawarłem w załączniku 3.

Mój dorobek naukowy po doktoracie zawiera 175 prac, których większość napisałem samodzielnie (tabela 1). Aż 81 artykułów opublikowano w czasopismach recenzowanych zagranicznych i krajowych (sumaryczny IF 4,176).

Baza Web of Science indeksuje 9 publikacji (jedna przed doktoratem), które są cytowane 8 razy (w tym 7 bez autocytowań). Baza Scopus indeksuje tę samą liczbę publikacji cytowanych 21 razy (20 razy bez autocytowań). Sumaryczny IF dla publikacji z listy JCR wynosi – 4,176.

Moja aktywność w środowisku naukowym wynika z czynnego uczestnictwa w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych, z których najważniejsze to: Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia, Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć, International Conference on Electromagnetic Disturbances. Przygotowałem także recenzje artykułów dla wydawnictwa z bazy JCR - Metrology and Measurement Systems – 3 oraz innych czasopism IET

Generation Transmission & Distribution - 2, Przegląd Elektrotechniczny - 3, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej – wielokrotnie.

Tabela 1. Zestawienie dorobku publikacyjnego

Rodzaj wydawnictwa	Liczba publikacji przed doktoratem	Liczba publikacji po doktoracie
artykuły JCR		8
Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne		21
Udzielone patenty międzynarodowe i krajowe		2
ekspertyzy		17
Publikacje w wydawnictwach recenzowanych – razem 81 pozycje		
monografia		1
rozdział w książce o zasięgu krajowym		1
publikacje w wydawnictwach recenzowanych	6	60
Publikacje elektroniczne recenzowane	1	2
publikacje w wydawnictwach zbiorowych recenzowanych		17
Publikacje o charakterze dydaktycznym		
skrypty		6
Publikacje nierecenzowane (nie umieszczone w spisie literatury)		
publikacje w wydawnictwach zbiorowych nierecenzowanych		22
Raporty techniczne		
Raporty techniczne	10	18
RAZEM	17	175

Aktywnie promowałem wiedzę naukową poprzez organizację konferencji (Seminarium Jakości Energii – około 250 uczestników), współorganizację Gdańskich Dni Elektryki oraz tłumaczenie i redagowanie artykułów - dla czasopisma Utrzymanie Ruchu (Redaktor działu).

W czasie okresu zatrudnienia uczestniczyłem w projektach naukowych, aparaturowych i edukacyjnych.

Dużo energii poświęciłem dydaktyce głównie w zakresie techniki wysokich napięć, oceny zgodności produktów i jakości energii elektrycznej. Opracowałem autorskie wykłady i stanowiska laboratoryjne z 10 różnych przedmiotów. Jestem współautorem skryptów Laboratorium Techniki Wysokich Napięć oraz Laboratorium Przekładników Indukcyjnych.

Uczestniczyłem także w zaprojektowaniu laboratoriów wysokonapięciowych oraz opracowałem autorski skrypt z TWN dla Akademii Rybołówstwa i Nauk o Morzu w Namibe ramach dużego projektu edukacyjnego Navimor'u w kooperacji z Akademią Morską w Gdyni.

Za dokonania w naukowe i dydaktyczne byłem wielokrotnie nagradzany nagrodą Rektora, medalami i dyplomami.

Przez wiele lat uczestniczyłem w poważnych pracach na rzecz uznanych i ważnych producentów i firm z których największe dotyczą firm polskich Energa, PTPiREE, PERN, Elektrobudowa, Aparator, Miflex, SAG, Elbud, Group Base i zagranicznych ABB, Aseco. Prace te związane były z zagadnieniami technicznymi w obszarze wysokich napięć i aparatów elektrycznych, ochroną przeciwporażeniową, oceną zgodności produktów i jakości energii elektrycznej.