

Diagnostyka off-line stanu izolacji uzwojeń silników 6 kV z wykorzystaniem obrazowania akustycznego wylądowań niezupełnych

Streszczenie. W zakładach przemysłowych, w których kluczowe procesy produkcyjne są realizowane z wykorzystaniem silników średniego napięcia, dla których diagnostyka izolacji uzwojeń ma istotne znaczenie. W tym celu wykonuje się ocenę porównawczą wyników pomiarów wylądowań niezupełnych (WZN) wykonywanych dla jednostek tego samego typu, a jej skuteczność w znacznej mierze wynika z wieloletniego doświadczenia diagnosty. Dla opracowania wyników WZN stosuje się metodę fazowo-rozdzielczą PRPD, która wyznacza określone parametry WZN w funkcji fazy napięcia przemiennego. Dysponując określonymi wzorcami WZN można określić rodzaj wady izolacji silnika, bez możliwości lokalizacji jej występowania. W referacie omówiono nowe możliwości wspomagania diagnostyki off-line z wykorzystaniem kamery akustycznej, która analizuje widmo akustyczne WZN i lokalizuje miejsce ich występowania na optycznym obrazie badanego obiektu. Kamera akustyczna wykorzystuje szeroką gamę mikrofonów szerokopasmowych i wizualizuje sygnał akustyczny w wybranych zakresach częstotliwości.

Abstract. In industrial plants where critical production processes are carried out using medium-voltage motors, insulation winding diagnostics play a crucial role. To achieve this, a comparative assessment of partial discharge measurement results is conducted for units of the same type, and its effectiveness largely relies on years of diagnostic experience. To analyze the partial discharge results, the phase-resolved partial discharge (PRPD) method is employed, which determines specific parameters of partial discharges in relation to the phase of alternating voltage. By having established reference partial discharge patterns, it becomes possible to identify the type of insulation fault in the motor without pinpointing its location. This presentation discusses new opportunities for supporting offline diagnostics using an acoustic camera, which analyzes the acoustic spectrum of partial discharges and locates their occurrence on an optical image of the inspected object. The acoustic camera utilizes a wide range of broadband microphones and visualizes the acoustic signal within selected frequency ranges. (Off-line diagnostics of insulation condition in 6kV motor windings using acoustic imaging of partial discharges).

Słowa kluczowe: silnik średniego napięcia, wylądowania niezupełne, diagnostyka off-line.

Keywords: medium voltage motor, partial discharges, off-line diagnostics..

Wstęp

Awaryjne silników średniego napięcia (SN), w szczególności zwarcia międzyfazowe i doziemne, są najbardziej niepożądanymi zdarzeniami z perspektywy procesu technologicznego, który w ich wyniku ulega zatrzymaniu do czasu usunięcia awarii. Do podstawowych działań ograniczających skalę wyłączeń z ruchu silników SN należą: monitorowanie stanu izolacji, planowe przeglądy obejmujące diagnostykę off-line, które odbywają się w trakcie zaplanowanych przerw w procesach technologicznych oraz okresowe remonty, podczas których dokonuje się przezwójowania zdegradowanych uzwojeń maszyn odtwarzając oryginalną izolację uzwojeń.

Badania i analiza wylądowań niezupełnych (WZN) jest szeroko stosowaną metodą oceny jakości izolacji silników SN [1]. Występowanie WZN jest objawem problemów spowodowanych mechanizmami starzenia wieloczynnikowego: naprężeń termicznych, elektrycznych, mechanicznych, przy dodatkowym wpływie środowiskowym z uwzględnieniem narażeń chemicznych. Układ izolacyjny silnika, na skutek niejednorodności wynikających z uwarunkowań technologicznych i projektowych, po doprowadzeniu napięcia do uzwojeń zawiera miejsca występowania WZN w strukturze izolacji międzyzwojowej i żłobkowej. Ich długotrwałe oddziaływanie prowadzi do mikro i makroskopowych zmian, a w efekcie końcowym do wylądowania zupełnego, związanego z przebicciem izolacji. Analiza WZN jest ważnym narzędziem diagnostyki silników SN, ponieważ pozwala identyfikować rodzaj i rozwój uszkodzeń w czasie eksploatacji. Tym sposobem można określić stopień starzenia izolacji i optymalnie dla procesu produkcji zaplanować odpowiedni zakres remontów silników.

W silnikach o napięciu znamionowym 6 kV, pracujących w klasie izolacji F, stosuje się zazwyczaj izolację typu Resin

Rich (RR) [2]. Uzwojenia stojana są wytwarzane przy użyciu prętów lub uformowanych gotowych cewek umieszczanych w żłobkach. Główna izolacja żłobkowa (*groundwall insulation*) składa się z wielu warstw taśmy mikowej, których grubość zależy od poziomu napięcia i technologii izolacji. Technologia RR wykorzystuje taśmy z miki na bazie włókna szklanego, używanego jako podłoże, z określoną zawartością żywicy epoksydowej i polega na nakładaniu, prasowaniu, utwardzaniu i hartowaniu kolejnych warstw taśmy, dla uzyskania korzystnie cienkiej warstwy izolacyjnej zajmującej mniej miejsca w żłobkach. Taka izolacja dobrze przylega do uzwojenia oraz, dodatkowo, posiada lepszy współczynnik oddawania ciepła. Na izolację RR nawijana jest taśma wykończeniowa, a całość jest wygrzewana w piecu [3].

W przypadku występowania lokalnych defektów, przy diagnostyce pomiaru WZN metodą elektryczną uzyskuje się wykresy fazowo – rozdzielcze. Najczęstszą metodą identyfikacji defektów podtrzymujących WZN jest metoda pomiarów fazowo-rozdzielczych PRPD (ang. *Phase Resolved Partial Discharge*), polegająca na wyznaczeniu liczby wylądowań oraz średniej i maksymalnej wartości ładunku pozornego w funkcji fazy napięcia przemiennego. Tak uzyskane przebiegi zawierające zbiory WZN mogą być analizowane statystycznie pod kątem szeregu wskaźników: wartości średniej, odchylenia standardowego, skośności czy kurtozy, osobno dla wylądowań o biegunowości dodatniej i biegunowości ujemnej. Analizując kształt zarejestrowanych przebiegów, wskaźniki statystyczne czy symetrię/asymetrię dodatniego i ujemnego rozkładu impulsów WZN, można dla określonych technologii wykonania izolacji podać kształt wzorców PRPD związanych z określonymi defektami. Pojedyncza typologia defektu może niekiedy generować więcej niż jeden wzorzec PRPD, co może wynikać z geometrii defektu i miejsca jego

lokalizacji oraz odmiennych warunków wykonywania pomiarów (temperatura, czas eksploatacji, środowisko, odkształcenia napięcia). Przykładem możliwości uzyskania różnych wzorców PRPD jest wpływ różnego pochodzenia naprężeń na taśmę stopniującą natężenie pola (*stress grading tape* [5]) w połączeniach czołowych cewki. Inne wzorce WNZ będą występowały na powierzchni tej taśmy, a inne na styku taśmy oraz głównej izolacji żłobkowej, inne w płaskich szczelinach powietrznych spowodowanych oderwaniem taśmy, a inne w makro wtrącinach przestrzennych, spowodowanych pęcznieniem taśmy. Wymienione problemy dotyczą zarówno izolacji zestarzonej długotrwale pracą silnika, jak i nowej, w przypadku silnika przezebranego czy nowo wyprodukowanego [2]. Norma IEE Std.1434-2014, dotycząca pomiaru WNZ w silnikach prądu przemiennego [6], opisuje metody on-line oraz off-line wykrywania uszkodzeń uzwojeń, a także procedury testów kontroli jakości pojedynczych zwojów, nowych oraz odtwarzanych w procesie przewijania stojana.

W niniejszym artykule przedstawiono wstępne wyniki badań porównawczych WNZ, na stanowisku badawczym zawierającym dwie próbki wyciętego stojana silnika SN, który uległ awarii. W pierwszej próbie pozostawiono dwie nieuszkodzone cewki oryginalne badanego silnika z zestarzoną izolacją RR, a w drugiej próbie wykonano nowo zaizolowaną cewkę, modelującą przezwojony stojan. W referacie omówiono nowe możliwości wspomagania diagnostyki off-line z wykorzystaniem kamery akustycznej Fluke ii900, która lokalizuje miejsca występowania dźwięku pochodzącego od WNZ, w odniesieniu do obrazu optycznego badanego obiektu uzyskanego w świetle widzialnym. Kamera akustyczna wykorzystuje szeroką gamę mikrofonów szerokopasmowych i jest w stanie wyświetlać sygnał akustyczny w wybranych zakresach częstotliwości w zakresie dźwiękowym i ultradźwiękowym. Zastosowanie mikrofonów kierunkowych, w celu dokładniejszej lokalizacji miejsc występowania WNZ było już opisywane w literaturze [9]. WNZ generują większą ilość sygnału w zakresie ultradźwięków, zwłaszcza w obszarze 35 - 50 kHz. Uzyskiwany stosunek sygnału WNZ do szumu w kierunkowych mikrofonach ultradźwiękowych jest na akceptowalnym, wysokim poziomie [9]. Niemniej jednak dotychczas zawsze były problemy z precyzyjną lokalizacją ze względu na rozszerzające się pole widzenia wraz z odległością oraz odbicia od twardych, płaskich powierzchni [7], [9].

Mechanizmy WNZ w silnikach 6 kV

WNZ w izolacji stojana występują w obszarach występowania krytycznych poziomów pola elektrycznego przekraczających wytrzymałość izolacji gazowej wynikającej z prawa Paschena. Lokalne wyładowania w miejscach niejednorodności układu izolacyjnego - nieciągłościach między warstwami izolacji cewki, w styku izolacji z stojanem lub w obszarze wyprowadzenia uzwojenia ze strefy żłobka. Powszechnym mechanizmem awarii silników jest uszkodzenie pogorszonej izolacji międzyzwojowej spowodowanej przepięciem łączeniowym lub piorunowym nałożonym na sinusoidalne napięcie zasilające stojan. W zakładach przemysłowych występowanie przepięć ma zewnętrzne (wyładowania atmosferyczne, stany nieustalone powodowane zwarciami i procesami łączeniowymi po stronie energetyki zawodowej) i wewnętrzne źródła pochodzenia wynikające z aktywności łączeniowej zakładu. Na rysunku 1a pokazano przykłady zarejestrowanych przebiegów napięć fazy L1 i L2 oraz ich wartości skuteczne w momencie wystąpienia uszkodzenia izolacji kabli zasilających w skrzynce przyłączeniowej (rys.1b) silnika typu SCDdm134u 6 kV, 1250 kW/ 1485

obr/min. Przy widocznym na rysunku 1a zwarciu w fazie L1 objawiającym się głębokim zapadem napięcia U_{L1} , napięcie fazy L2 nie dotkniętej zwarciem wzrasta blisko $\sqrt{3}$ razy.

W obserwacji przebiegu impulsów wyładowań, dominacja impulsów o polaryzacji ujemnej zazwyczaj wskazuje na występowanie WNZ blisko powierzchni przewodnika, wewnątrz izolacji. Takie WNZ mogą być wynikiem wtrącin powietrznych i mikropęknięć (rozwarstwień) wytworzonych w nieprawidłowym procesie produkcyjnym, skutkiem starzenia termicznego lub cykli termicznych przy synergicznym oddziaływaniu pola elektrycznego, co skutkuje pojawieniem się krytycznych naprężeń elektrycznych pomiędzy przewodnikiem a pierwszymi warstwami taśmy mikowej izolacji międzyzwojowej. Po latach eksploatacji, nawet prawidłowo wykonane (impregnowane) uzwojenie, również może wykazywać oznaki problemów w tym zakresie. Ze względu na lokalizację wtrącin i rozwarstwień blisko prętów miedzianych, nie istnieją skuteczne mechanizmy naprawcze dla rozwiązania tego problemu. Jeżeli wymienione nieciągłości układu izolacyjnego między zwojami nie znajdują się blisko zewnętrznej powierzchni przewodnika, wyładowania niepełne nie będą wówczas objawem awarii związanej ze wzrostem napięcia. Aktywność wyładowań niepełnych wewnątrz głównej izolacji żłobkowej jest procesem dynamicznym, którego intensywność zależy od współczynnika przepięcia (stosunku przyłożonego napięcia do napięcia początkowego wyładowań niepełnych). W przypadku badań laboratoryjnych off-line, kształt wzorców PRPD oraz amplituda WNZ mogą zmieniać się w trakcie wielominutowego procesu kondycjonowania podwyższonym napięciem, aż do osiągnięcia stanu ustalonego.

Obiekt badań

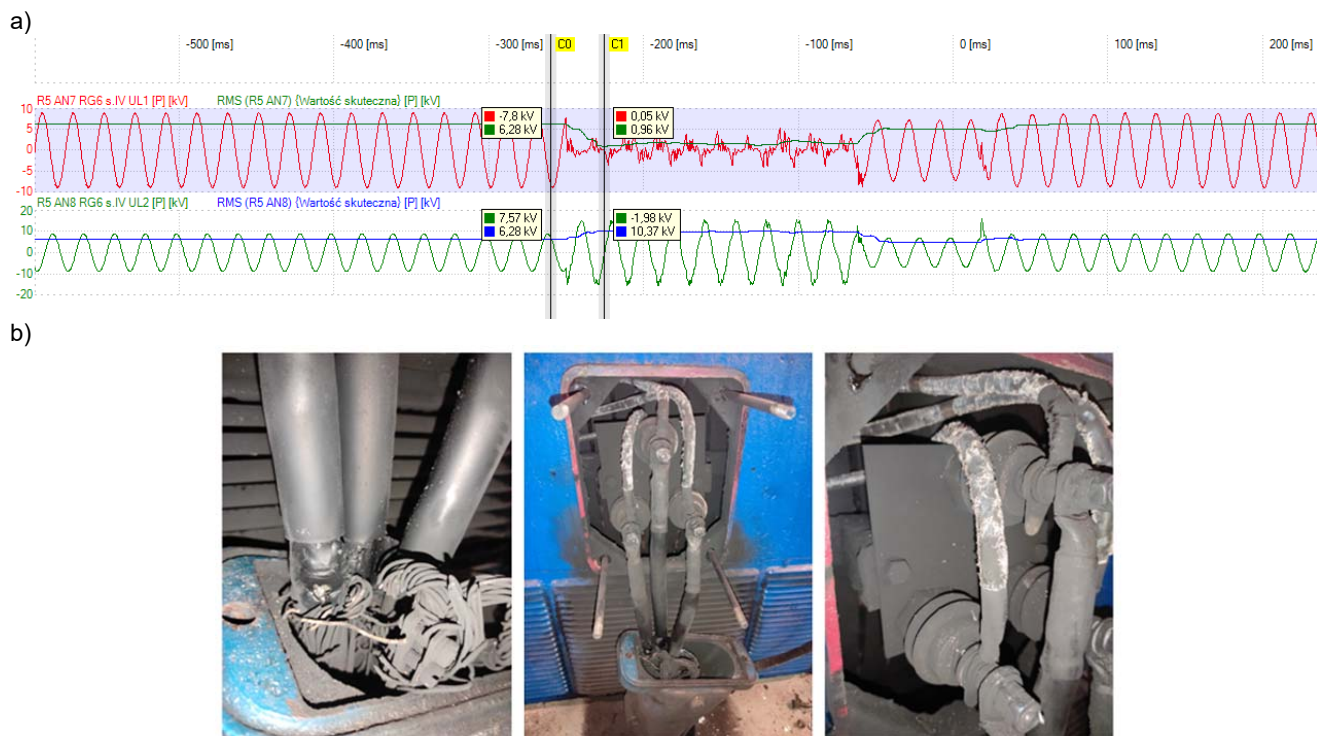
Do celów badań WNZ przygotowano dwa modele fragmentów stojana silnika 6kV typu SCDdm114s produkcji EMIT (1973 r.) o mocy 250 kW dla 1485 obr/min na napięcie 6000 V $\cos\varphi=0,86$, $f=50$ Hz o uzwojeniach stojana połączonych w gwiazdę. Do przygotowania stanowiska wybrano silnik po awarii - zwarcie międzyfazowe podczas eksploatacji. Wygląd silnika oraz wycięty kawałek stojana z wybraną oryginalną nieuszkodzoną cewką pokazano na rysunku 2.

W pierwszym modelu, w wyciętym fragmencie rdzenia stojana w żłobkach umieszczono cewkę oryginalnie zamontowaną jeszcze w 1973 roku, z izolacją wykonaną w technologii RR. Oryginalne uzwojenie DNSS 1x6,5 o długości pręta 424 mm zawierało 18 pętli pręta miedzianego układanych z poskokiem 12. W drugim modelu umieszczono cewkę z nową izolacją, również wykonaną w technologii RR. Oba rozwiązania modelowe zestawiono na stanowisku badawczym pokazanym na rysunku 3.

Aparatura pomiarowa i metodyka badań

A. Analizator WNZ Doble Lemke typ LDS-6

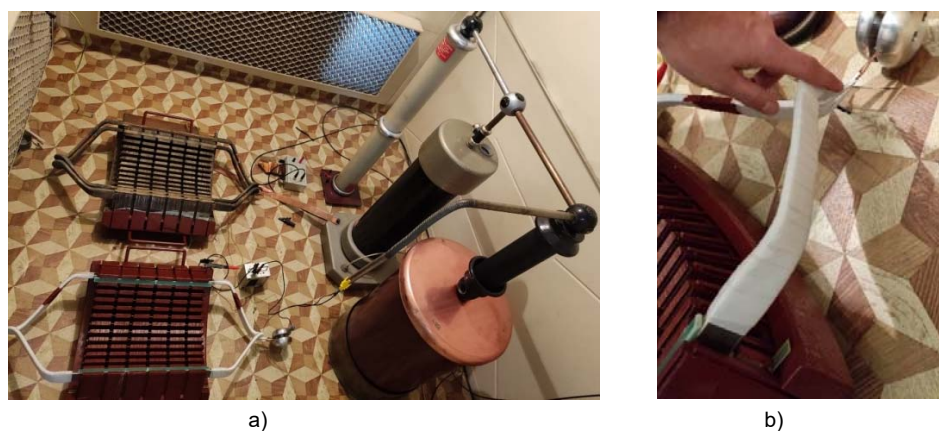
Analizator wyładowań niepełnych typu LDS-6 generuje 3 wykresy: (1) przebieg liczby wyładowań, (2) przebieg ładunku chwilowego oraz (3) przebieg ładunku uśrednionego w funkcji fazy przyłożonego napięcia. Kolorem niebieskim oznaczone są wyładowania o polaryzacji ujemnej, a kolorem czerwonym wyładowania o polaryzacji dodatniej. Przebiegi można za pomocą oprogramowania producenta poddawać analizie statystycznej poprzez określenie dla obydwu biegunowości wyładowań: wartości maksymalnej i minimalnej przebiegu, odchylenia standardowego, współczynnika skośności, współczynnika koncentracji oraz korelacji wzajemnej.



Rys. 1. Uszkodzenie izolacji kabli zasilających stojan przy puszcze zasilającej silnik turbo ssawy, typSCDdm134u, 6kV, 1250kW/1485obr/min: przebiegi napięć fazowych podczas zdarzenia (a) oraz widok uszkodzenia (b)



Rys. 2. Silnik 6 kV typu SCDdm114s wybrany do analizy i przygotowania badanego modelu: widok uszkodzenia (a); widok ogólny (b); wycięty fragment stojana z pozostawionymi oryginalnymi cewkami (c)



Rys. 3. Badane modele cewek ułożonych w żłobkach wyciętych fragmentów rdzenia stojana silnika 6 kV: oryginalna cewka z 1973 roku oraz nowa cewka z nowym uzwojeniem w technologii RR (a); zbliżenie na wyprowadzenia połączeń czołowych nowej cewki (b)

Na podstawie kształtu i analizy statystycznej poszczególnych przebiegów realizowane jest wnioskowanie odnośnie rodzaju występującego uszkodzenia silnika. Podstawą wnioskowania jest biblioteka wzorców gromadzona w bazie danych analizatora zawierająca przebiegi WNZ typowe uszkodzeń określonych obiektów izolacyjnych (np. silników, izolatorów przepustowych, kabli. Modeli układów izolacyjnych). Tworzenie wzorca odbywa się na zasadzie zarejestrowania i analizy przebiegów liczby wyładowań oraz ładunku chwilowego i uśrednionego wskazujących na wystąpienie uszkodzenia (tzw. *fingerprint* określony opisanymi wyżej parametrami statystycznymi), a następnie rozłożeniu silnika na części, szczegółowych oględzinach i opisaniu zlokalizowanego uszkodzenia. Na podstawie zgromadzonych wzorców algorytm wnioskujący wskazuje prawdopodobieństwo wystąpienia określonego uszkodzenia na podstawie zarejestrowanych przebiegów.



Rys. 4. Przykład lokalizacji koncentracji WNZ kamerą akustyczną Fluke ii900 dla oryginalnego eksploatowanego uzwojenia

B. Kamera akustyczna Fluke ii900

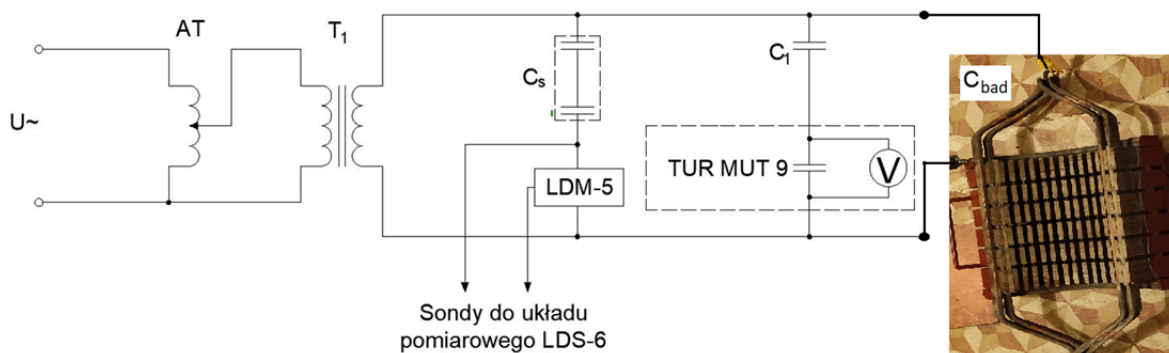
Do wspomagania diagnostyki badanych cewek silnika 6 kV wykorzystano kamerę akustyczną Fluke ii900, która umożliwia wykrywanie lokalizacji WNZ i obrazowanie WNZ w zakresie ultradźwięków. Urządzenie wytwarza obraz dźwiękowy PD na obiekcie testowym, podobnie jak kamera UV lokalizuje światło ultrafioletowe z PD na obrazie badanego obiektu [7]. Kamera składa się z 64 czujników ultradźwiękowych pracujących ze zmienną częstotliwością w dwóch zakresach: $2 \div 50$ kHz lub $2 \div 100$ kHz. Operator może wybrać szerokość pasma od 5 do 20 kHz i dowolną częstotliwość środkową w tym zakresie za pomocą ekranu dotykowego. Poziom dźwięku jest mierzony w dB. Kamera pokazuje kształt zarejestrowanych punktów przebiegu PRPD, wyrażonych w jednostkach względnych (bezwymiarowy), przy założeniu częstotliwości napięcia probierczego 50 Hz, jednakże nie posiada synchronizacji

kąta fazowego. A Widok kamery pracującej na stanowisku badawczym pokazano na rysunku 4.

Opis układu pomiarowego

Układ pomiarowy analizatora wyładowań niezupełnych LDS-6 wykorzystuje szerokopasmowy miernik ładunku pozornego wyładowań niezupełnych, który rejestruje i analizuje impulsy występujące na impedancji pomiarowej LDM-5. Przedstawiony na rysunku 5 schemat opiera się na tzw. metodzie równoległej pomiaru, w której izolacja badana jest włączona bezpośrednio pod zaciski transformatora probierczego T_1 , a impedancja pomiarowa LDS-5 pracuje szeregowo z kondensatorem sprzęgającym C_s . Pomiar WNZ polega na rejestracji impulsów napięcia δU na impedancji LDM-5 w chwili pojawienia się WNZ w obiekcie badanym. Poziom rejestrowanego napięcia, związany jest z wartością ładunku pozornego wraz z dodatkowym określeniem fazy wystąpienia impulsu. Transformator probierczy T_1 o maksymalnym napięciu wyjściowym 50 kV jest zasilany z autotransformatora „AT”. Impedancja pomiarowa LDM-5 posiada 2 wyprowadzenia, z których jedno wprowadza sygnał związany z ładunkiem WNZ, a drugie wartość chwilową napięcia probierczego. Dodatkowo, w układzie pomiarowym napięcie probiercze mierzone niezależnym woltmierzem przyłączonym do dzielnika pojemnościowego składającego się z kondensatora wysokonapięciowego C_1 szeregowo połączonych z pojemnością wejściową woltmierzem MUT9.

Impulsy wyładowań niezupełnych pojawiają się w układzie izolacyjnym w przypadku przekroczenia krytycznych poziomów pola elektrycznego w miejscach niejednorodności izolacji zawierających np. pęcherzyki gazowe, rozwarstwienia lub zestawienia elementów izolacyjnych o różnych przenikalnościach elektrycznych. Impulsy te mają charakter przypadkowy, a otrzymane podczas pomiaru amplitudy oraz chwile czasowe wystąpienia zależą od rodzaju, kształtu i rozmiaru wad w izolacji badanego obiektu, w tym przypadku izolacji stojana maszyny elektrycznej. Wartość prądu wyładowań niezupełnych $i(t)$ zależy od stosunku pojemności sprzęgającej do pojemności badanej (izolacji cewki) C_s/C_{bad} . Ładunek niezbędny do wyrównania napięcia po wystąpieniu wyładowania niezupełnego w kondensatorze (pojemności badanej) C_{bad} jest pobierany z kondensatora C_s . Największą czułość układu uzyskuje się przy warunku $C_s \gg C_{bad}$. Warunek ten w praktyce jest trudny do realizacji szczególnie podczas badania obiektów o znacznych pojemnościach. W takich przypadkach zamienia się miejscami kondensatory C_s i C_{bad} uzyskując tzw. układ szeregowy o znacznie większej czułości pomiaru, ale niestety grozący uszkodzeniem układu pomiarowego w chwili wystąpienia przebiecia izolacji badanej.



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego, $U\sim$ - napięcie wejściowe, AT - autotransformator, T_1 - transformator, C_1 - kondensator WN dzielnika 60 pF, C_s - kondensator sprzęgający 2×1000 pF, TUR MUT 9 - układ pomiarowy, C_{bad} - pojemność obiektu badanego

Omówienie wyników badań

W Tabeli 1 pokazano wyniki pomiarów inicjacji oraz wygaszenia WNZ wykonane dla cewki nowej oraz cewki eksploatowanej, metodą elektryczną w systemie LDS-6. Cewka eksploatowana, zgodnie z przypuszczeniami charakteryzuje się dość niskim poziomem napięcia zapłonu wyładowań, PDIV=1,2 kV, przy którym obserwowano maksymalne wartości ładunku pozornego na poziomie około 2 pC. Przebieg wartości maksymalnych tych wyładowań podczas inicjacji był zbliżony do przebiegów pokazanych w Tabeli 2, przy napięciu 1,7 kV. Cewka nowa posiada wyższe napięcie zapłonu, PDIV=2,3 kV. Przy tym napięciu pojawiają się wyładowania o ładunku maksymalnym około 20 pC, co może być wynikiem zastosowania materiału dielektrycznego o wyższej wartości przenikalności elektrycznej lub aktywowania WNZ w większych geometrycznie szczelinach w porównaniu do cewki eksploatowanej. Porównując dane zawarte w Tabelach 2 i 3 dla obu cewek, można zauważyć bardzo duże różnice pomiędzy wartościami maksymalnymi i średnimi wyładowań, nawet jeśli rejestrowano je przy tym samym napięciu. Tego rodzaju zachowanie może być wynikiem występowania w przypadku cewki eksploatowanej wtrącin o mniejszych wymiarach, zawierających rozwarstwienia usytuowane poprzecznie do linii sił pola elektrycznego, dla których typowe są niższe napięcia zapłonu przy występowaniu relatywnie mniejszych wartości ładunku pozornego wyładowań. Natomiast w cewce nowej sytuacja jest odwrotna - mamy do czynienia, na skutek błędów technologicznych, z dużymi rozwarstwieniami lub szczelinami, o geometrii poprzecznej do linii sił pola elektrycznego, które charakteryzują się wyższym napięciem zapłonu przy większej wartości ładunku pozornego wyładowań.

Metoda elektryczna, w porównaniu do akustycznej, charakteryzuje się dużo większą czułością. Lokalizacja wyładowań w metodzie akustycznej jest możliwa dopiero przy wyższych napięciach doprowadzonych do badanego obiektu, kiedy natężenie dźwięku przekracza poziom 20 dB. Dla obu badanych uzwojeń możliwość lokalizacji wystąpiła dopiero przy napięciu 3,5 kV (Rys. 6 oraz Rys. 7). Równolegle do zdjęć, wizualizujących miejsca dużego natężenia dźwięku na badanym obiekcie, kamera akustyczna Fluke ii900 wykonuje wykres emisji akustycznej w funkcji kąta fazowego, niestety, jak zostało wspomniane, bez synchronizacji z przebiegiem napięcia zasilającego, o czym również świadczy porównanie wykresów fazowo rozdzielczych z obu przyrządów pokazane w Tabelach 2 i 3. W przypadku cewki eksploatowanej, przy napięciu 1,7 kV (Tabela 1), kiedy występował niski poziom ładunku pozornego, kamera akustyczna wskazuje wyłącznie szum pomiarowy. Dopiero przy wyższym napięciu o wartości 2,5 kV widoczne są impulsy dźwięku, które wskazywałyby na możliwość wykrycia w obiekcie wyładowań odpowiadających ładunkowi pozornemu około 20 pC z metody elektrycznej.

Tab. 1. Zmierzone wartości napięcia początkowego wystąpienia wyładowań niepełnych (PDIV) i napięcia wygaszenia wyładowań niepełnych (PDEV).

		Model z nową cewką	Model z cewką z 1973 roku
Napięcie początkowe WNZ	PDIV	2,3 kV	1,2 kV
Napięcie wygaszenia WNZ	PDEV	2,5 kV	1,3 kV



Rys. 6. Lokalizacja WNZ w cewce z 1973 roku przy napięciu przemennym 3,5 kV (znamionowe napięcie fazowe $U_{IN} = 3,46$ kV)



Rys. 7. Lokalizacja WNZ w cewce nowej, nieprawidłowo impregnowanej, przy napięciu 3,5 kV (znamionowe napięcie fazowe $U_{IN} = 3,46$ kV)

Dla cewki nowej przy napięciu 2,5 kV i również wyższym 3 kV kamera akustyczna, mimo rejestracji impulsów akustycznych, nie daje możliwości wskazania miejsca koncentracji, która dopiero występuje przy napięciu 3,5 kV, bliskim znamionowemu fazowemu (Rys. 6, Rys. 7).

Podsumowanie i wnioski

Badania WNZ przeprowadzono na dwóch modelach izolowanych cewek silnika o znamionowym napięciu fazowym 3,46 kV, umieszczonych w żłobkach dwóch fragmentów rdzenia, wyciętych z silnika 6 kV. Intencją autorów było przedstawienie stanowiska pomiarowego w sposób wystarczający do powtórzenia pomiarów w podobnych warunkach. W tym celu w artykule zawarto wyczerpujące informacje o wykorzystanych dzielnikach napięciowych i ustawieniach aparatury pomiarowej. Badania przeprowadzono przy napięciach wyższych niż nominalne napięcie cewek. Spodziewano się występowania WNZ na krawędziach taśmy uzwojeń czołowych. Na podstawie analizy statystycznej wyników badań WNZ modeli cewek umieszczonych w żłobkach stojana, z wykorzystaniem wyłącznie analizatora LDS-6, stwierdzono rzeczywiście przebiegi wskazujące na występowanie wyładowań powierzchniowych ślizgowych na połączeniach czołowych cewek.

Wykonane w kolejnym etapie badania z wykorzystaniem łącznie metody elektrycznej (analizator LDS-6) i akustycznej (kamera Fluke ii900) zmieniły początkową tezę o lokalizacji wad w izolacji. Obserwacja kamerą akustyczną wskazała jednoznacznie na występowanie WNZ w izolacji żłobkowej, co wskazuje, że analiza WNZ metodą elektryczną, na podstawie analizy statystycznej, może prowadzić do błędnego wnioskowania co do rodzaju wady izolacji.

Tabela 2. Pomiary dla modelu z cewką eksploatowaną (z 1973 r) analizatorem LDS-6 z kalibracją toru pomiarowego 500 pC

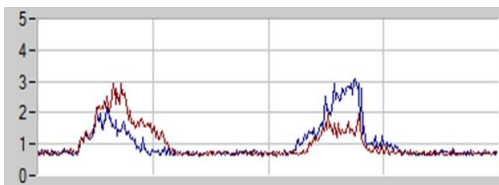
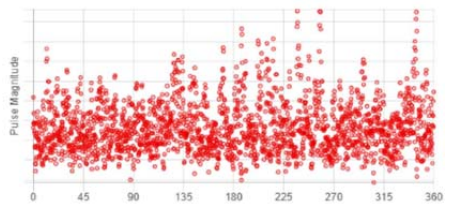
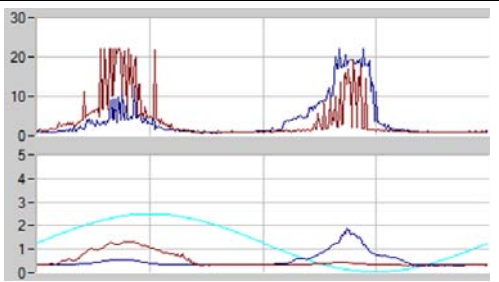
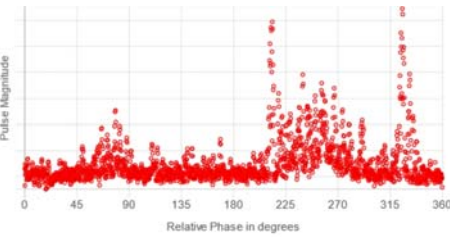
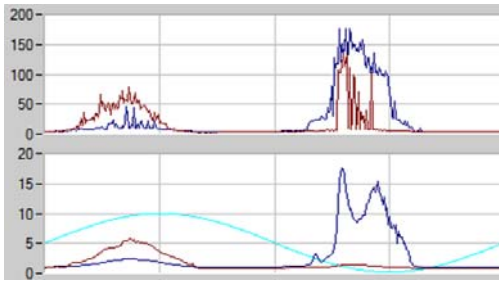
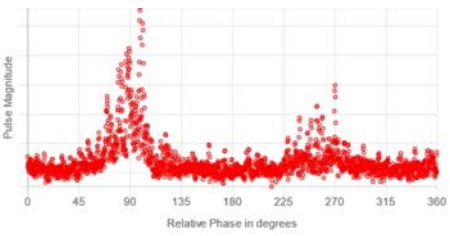
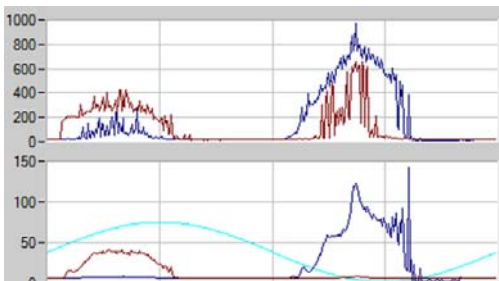
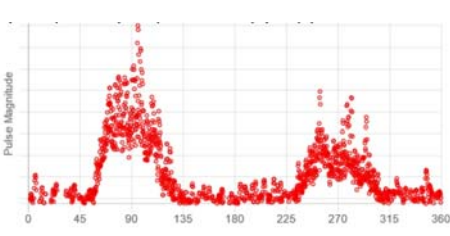
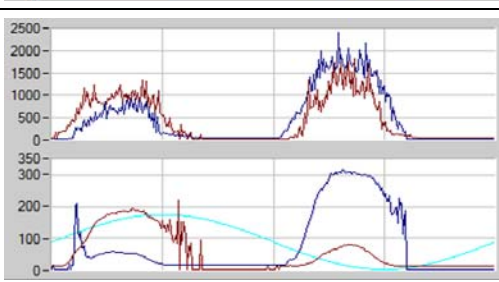
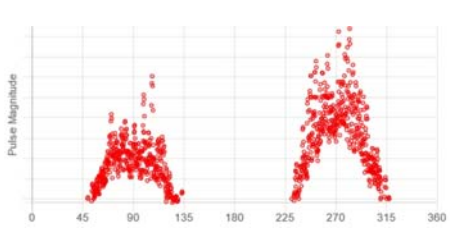
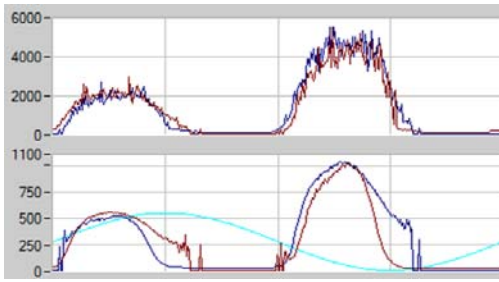
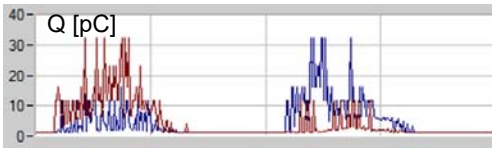
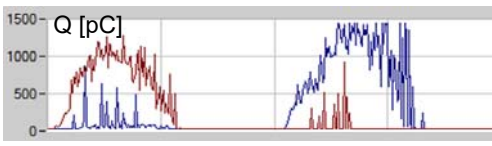
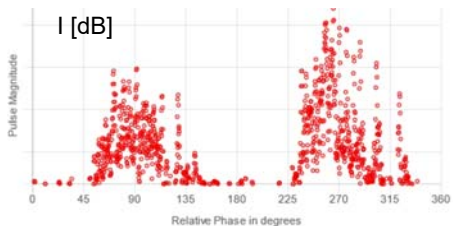
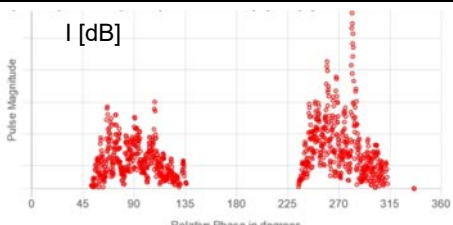
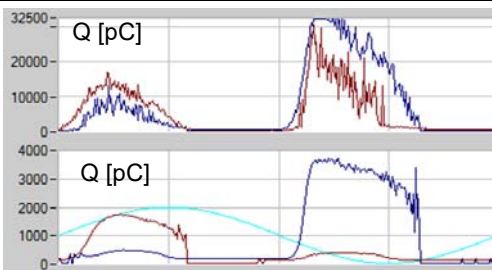
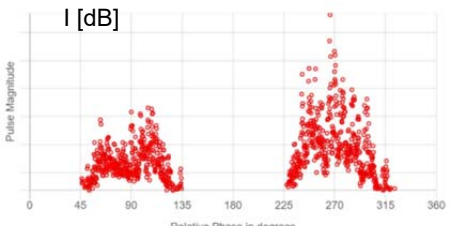
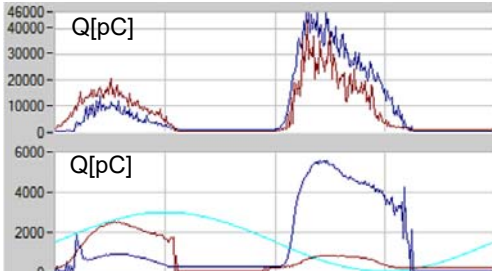
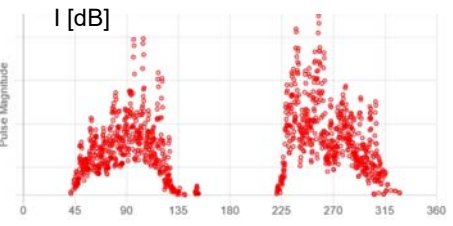
Napięcie próby	Ładunek pozorny WNZ (max./średni)	Rozkład WNZ z analizatora LDS-6	Natężenie dźwięku WNZ (max.)	Rozkład WNZ z kamery akustycznej Fluke ii910
1,7 kV	$Q_{\max} = 3 \text{ pC}$		$I_{\max} = 10 \text{ dB}$	
2,5 kV	$Q_{\max} = 22 \text{ pC}$		$I_{\max} = 12 \text{ dB}$	
3 kV	$Q_{\max} = 175 \text{ pC}$ $Q_{\text{sr}} = 18 \text{ pC}$		$I_{\max} = 12 \text{ dB}$	
3,5 kV	$Q_{\max} = 1000 \text{ pC}$ $Q_{\text{ave}} = 140 \text{ pC}$		$I_{\max} = 20 \text{ dB}$	
4 kV	$Q_{\max} = 2500 \text{ pC}$ $Q_{\text{sr}} = 300 \text{ pC}$		$I_{\max} = 29 \text{ dB}$	
4,5 kV	$Q_{\max} = 5800 \text{ pC}$ $Q_{\text{sr}} = 1000 \text{ pC}$			Brak rejestracji

Tabela 3. Pomiary dla układu modelu z cewką o nowej izolacji analizatorem LDS-6 z kalibracją toru pomiarowego 500 pC

Napięcie próby	Ładunek pozorny WNZ (max./średni)	Rozkład WNZ z analizatora LDS-6	Natężenie dźwięku WNZ (max.)	Rozkład WNZ z kamery akustycznej Fluke ii910
2,5 kV	$Q_{\max} = 30 \text{ pC}$		$I_{\max} = 10 \text{ dB}$	brak detekcji
3 kV	$Q_{\max} = 1500 \text{ pC}$		$I_{\max} = 20 \text{ dB}$	
3,5 kV	$Q_{\max} = 16500 \text{ pC}$		$I_{\max} = 22 \text{ dB}$	
4 kV	$Q_{\max} = 32500 \text{ pC}$ $Q_{\text{sr}} = 3800 \text{ pC}$		$I_{\max} = 26 \text{ dB}$	
4,5 kV	$Q_{\max} = 46000 \text{ pC}$ $Q_{\text{sr}} = 5750 \text{ pC}$		$I_{\max} = 27 \text{ dB}$	

Chociaż wykazano, że metoda elektryczna charakteryzuje się znacznie wyższą czułością w stosunku do analizy kamerą akustyczną, to stosowanie jednocześnie innych, dodatkowych metod w celu uzyskania wiedzy występowania WNZ i ich lokalizacji wydaje się bardzo korzystne [8]. Obserwowane WNZ w izolacji żłobkowej w nowej cewce są spowodowane niewystarczającą impregnacją, która zostanie poprawiona w kolejnej wersji modelu. Podczas nieprawidłowego technologicznie procesu impregnacji przypadkowo mogą występować wtrąciny w warstwie izolacyjnej. Wymienić tu należy niewystarczający poziom próżni lub ciśnienia, niewłaściwą lepkość żywicy, nieodpowiedni zakres temperatur, nierówności taśmy lub występowanie obcych przedmiotów w taśmie. Po

przyłożeniu napięcia probierczego mogą występować na skutek krytycznych poziomów pola elektrycznego wyładowania częściowe we wtrącinach powodując erozję wnek, jej propagację, a po określonym czasie do uszkodzenia izolacji. Może to prowadzić do zwarcia przewodów lub zwojów w cewkach wielowarstwowych jeśli wtrąciny są blisko przewodów miedzianych, a w dalszej perspektywie czasowej do uszkodzenia izolacji żłobkowej.

Wpływ powietrza i blach maszyny elektrycznej, zwłaszcza podczas badania gotowego silnika na stanowisku pracy, będzie miał istotny wpływ na propagację fal dźwiękowych i ostatecznie na powstawanie ciśnienia akustycznego na powierzchni badanego silnika. Kamera akustyczna pokazuje wyłącznie rozkład natężenia dźwięku

zawsze na analizowanej powierzchni. Jeśli kilka miejsc w silniku generuje dźwięk wskazane jest wykonanie zdjęć z różnych odległości aby eliminować wpływ środowiska zewnętrznego, obudowy i obiektów pobliskich. Wykorzystując kamerę do identyfikacji miejsc występowania WNZ stwierdzono, że taka możliwość ma miejsce wyłącznie przy przekroczeniu pewnej wartości natężenia dźwięku dochodzącego do wbudowanych mikrofonów. Odległość i poziom emisji akustycznej z miejsca występowania WNZ mają znaczenie. W przypadku badanych próbek, lokalizując kamerę w różnych miejscach względem obserwowanego obiektu, z uwagi na pracę w ograniczonej przestrzeni (komora ekranująca) w przeprowadzonych w niniejszym artykule badaniach nie stwierdzono istotnego wpływu położenia kamery na wynik lokalizacji wady. Podsumowując, diagnostyka nowych układów izolacyjnych wymaga połączenia kilku metod pomiarowych. Zazwyczaj wykonuje się próbę napięciową izolacji rozszerzoną o pomiar wyładowań niepełnych. Treść artykułu koncentruje się na możliwościach lokalizacji miejsc występowania WNZ z wykorzystaniem kamery akustycznej. Pokazano, że w przypadku stosowania wyłącznie analizy rozkładów amplitudowo fazowych WNZ, przeprowadzone badania mogą implikować błędne wnioski.

Autorzy: mgr inż. Marcin Gulczyński, Politechnika Gdańska Szkoła Doktorska Wdrożeniowa, Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego i Konwersji Energii, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: marcin.gulczynski@pg.edu.pl; dr hab. inż. Marek Adamowicz, Politechnika Gdańska, Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego i Konwersji Energii, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: marek.adamowicz@pg.edu.pl; dr hab. inż. Marek Olesz, Politechnika Gdańska, Katedra Elektrotechniki i Inżynierii Wysokich Napięć, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: marek.olesz@pg.edu.pl

LITERATURA

- [1] Gulski, E., Diagnostowanie wyładowań niepełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Elektryka*, Zeszyt 128, Oficyna wydawnicza PW, Warszawa 2023.
- [2] Contin A., Piccolo A., PD acceptance tests for new bars and coils, *Proc. IEEE Electrical Insulation Conference EIC*, 2016, 243-247
- [3] Szymaniec S., Kandora W. Diagnostyka izolacji uzwojeń wysokonapięciowych maszyn elektrycznych wykonanych w technologii RESIN-RICH na etapie produkcji i remontu. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*, 3(100/1), 2013, 189-194
- [4] Contin A. Identification of Defects Supporting PD in Rotating Machines with Different Insulation Technologies, *Proc. IEEE 2nd International Conference on Dielectrics ICD*, 2018, 1-5
- [5] Kim Y. M., Kim M., Stress Grading Performance Analysis of Stator Coil Considering the Manufacturing Method and the Insulation Design, *IEEE Access*, 10(2022), 76493-76503
- [6] IEEE Std 1434-2014, IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery, 2014
- [7] Stone G. C., Sasic M., Wendel C., Shaikh A., Initial experience with acoustic imaging of PD on high voltage equipment, *Proc. IEEE Electrical Insulation Conference EIC*, 2021, 13-17
- [8] Glinka T., Szymaniec S., Eksploatacja i diagnostyka maszyn elektrycznych i transformatorów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019
- [9] R. Van Haeren i in., "Preventing failure in outdoor distribution class metalclad switchgear", *IEEE Trans Power Apparatus and Systems*, 10(1985), 2701-2712.