

Politechnika Opolska

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki
Przemysłowej



ROZPRAWA DOKTORSKA

Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin-Rich

Autor pracy:

mgr inż. Wojciech Kandora

Promotor:

dr hab. inż. Sławomir Szymaniec prof. P.O.

Opole 2012

Praca została napisana w ramach realizacji projektu badawczego własnego Nr N N510 536639 „Czujniki do pomiarów off-line i on-line wyładowań niezupełnych w silnikach elektrycznych oraz system kalibracji torów pomiarowych. Projekt finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Spis treści

1. Wstęp.....	1
2. Stojany wysokonapięciowych maszyn wirujących.....	2
2.2. Układy izolacyjne wysokonapięciowych maszyn wirujących.....	7
2.3. Materiały izolacyjne wysokonapięciowych maszyn wirujących.....	8
2.4. Problemy związane z eksploatacją układów izolacyjnych turbogeneratorów oraz silników wysokonapięciowych	15
2.4.1. Narażenia termiczne	17
2.4.2. Narażenia mechaniczne.....	17
2.4.3. Czynniki środowiskowe	18
2.4.4. Starzenie wieloczynnikowe.....	19
3. Diagnostyka wysokonapięciowych układów elektroizolacyjnych	20
3.1. Schemat zastępczy modelu układu izolacyjnego	23
3.2. Diagnostyka izolacji napięciem stałym – test Meggera.....	25
3.3. Badanie układu izolacyjnego napięciem stałym według metody prof. Tadeusza Glinki.....	31
3.4. Metoda rampy wysokonapięciowej	36
3.5. Wysokonapięciowa metoda impulsowa – test Bakera.....	38
3.6. Metoda spektroskopii niskoczęstotliwościowej.....	41
3.7. Pomiar współczynnika strat dielektrycznych oraz pojemności	42
4. Pomiar wyładowań niezupełnych.....	45
4.1. Schemat zastępczy układu izolacyjnego z wtrąciną gazową	46
4.2. Wielkości oraz parametry opisujące wyładowania niezupełne.....	49
4.3. Aparatura oraz układy pomiarowe wyładowań niezupełnych metodami elektrycznymi.....	52
4.4. Zakłócenia w pomiarach wyładowań niezupełnych	56

5. Diagnostyka układów izolacyjnych wykonanych w technologii Resin Rich	
w przemyśle	61
5.1. Modele fizyczne defektów układu izolacyjnego.....	62
5.2. Diagnostyka uzwojeń wysokonapięciowych maszyn wykonanych	
w technologii Resin-Rich.....	66
5.2.1. Analiza defektu izolacji typu kawerna.....	69
5.2.2. Analiza defektu izolacji typu rozwarstwienie	80
5.2.3. Analiza defektu typu zanieczyszczenie powierzchniowe izolacji.....	87
5.2.4. Analiza defektu typu nieciągłości w zewnętrznej ochronie	
przeciwjarzeniowej pręta	91
5.2.5. Analiza defektu izolacji typu uszkodzenie wewnętrznej ochrony	
przeciwjarzeniowej.....	95
6. Próba starzeniowa izolacji typu Resin-Rich.....	105
7. Kondensatory do pomiaru wznz wysokonapięciowych silników elektrycznych.....	112
8. Wnioski	117
9. Bibliografia	122

Wykaz ważniejszych skrótów oraz oznaczeń

- A – stała materiałowa,
 AC – napięcie przemienne
 B, F, H – klasy ciepło-odpornościowe izolacji
 C - pojemność
 c – prędkość światła
 DC – napięcie stałe
 DD – depolaryzacja dielektryka
 DFL – współczynnik diagnostyczny izolacji
 E – natężenie pola elektrycznego
 ε - przenikalność elektryczna
 f – częstotliwość, kąt fazowy
 F – iskiernik
 G – przewodność materiału
 GND – masa układu
 γ – konduktywność
 HV – wysokie napięcie
 i – prąd
 IR – izolacja rezystancji
 j - operator na płaszczyźnie liczb zespolonych
 k – współczynnik absorpcji izolacji, stała Boltzmana
 k_{75} – współczynnik temperaturowy izolacji
 Ku – kurtoza
 L – czas życia izolacji, indukcyjność
 l – długość fali
 μ – średnia arytmetyczna
 N – całkowita liczba zarejestrowanych impulsów
 n – średnia liczba impulsów wnz
 OB – obiekt badań
 P – moc czynna
 $PBiP$ – Plan Badań i Prób
 PI – współczynnik polaryzacji izolacji

q – ładunek elektryczny

ρ – opór właściwy

R_{15}, R_{60}, R_{600} – wartości rezystancji izolacji po 15s, 60s, 600s.

RDT – rezystancyjny czujnik temperatury

$RFCT$ – przekładnik prądowy wysokich częstotliwości

RR – z ang. Resin-Rich

S – moc pozorna

sk - współczynnik skrośności

SV – test napięciem schodkowym

σ – konduktywność, odchylenie standardowe

t – czas

T – temperatura, przedział czasu

t – stałą czasowa

$tg\delta$ – współczynnik strat dielektrycznych

TP – transformator probierczy

VPI – z ang Vacuum Pressure Insulation

W – energia aktywacji cząstki, energia układu

WN – wysokie napięcie

wnz – wyładowanie niezupełne

Z_m – impedancja pomiarowa

ω – pulsacja

1. Wstęp

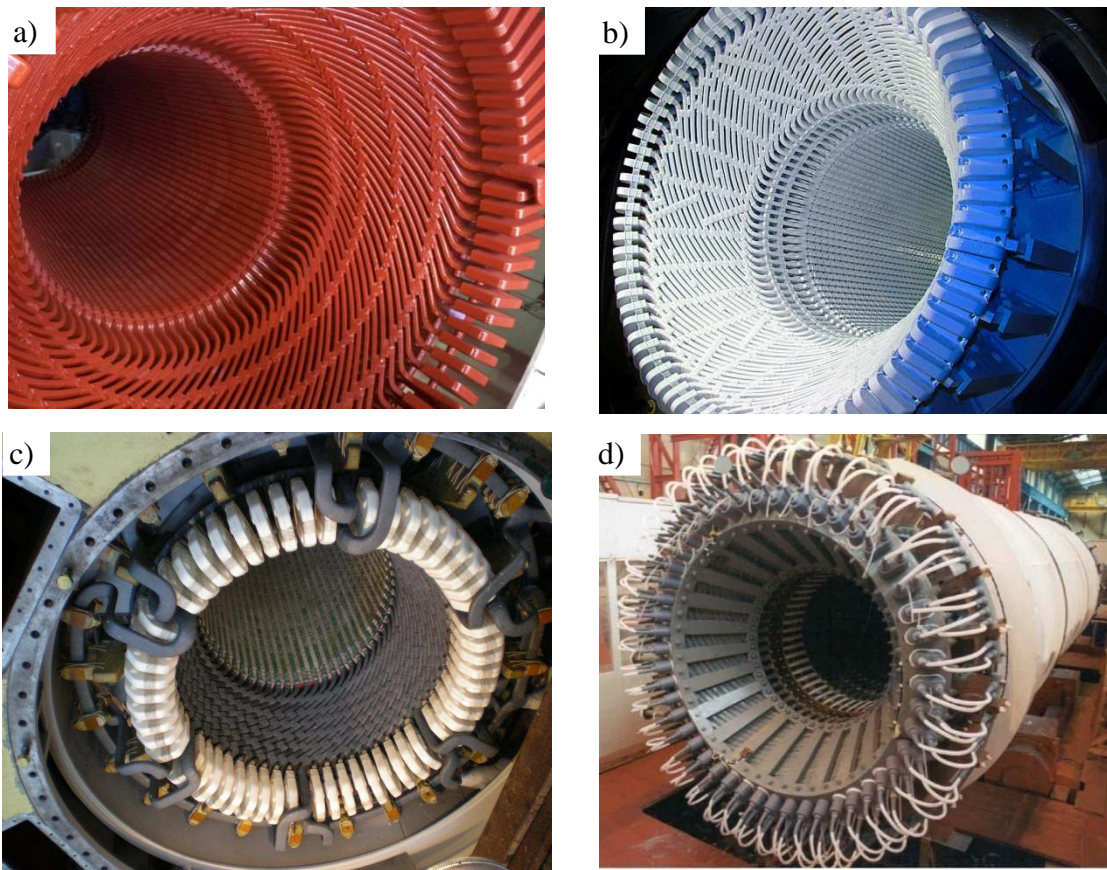
Turbogeneratory są i w najbliższym czasie pozostaną podstawowym źródłem energii elektrycznej. Zwiększające się zapotrzebowanie na energię elektryczną musi być pokrywane za pomocą generatorów o coraz większej mocy. Współcześnie produkowane są stojany o mocy powyżej 2GW, w projektowaniu zaś są coraz to większe jednostki. Przy tak wielkiej koncentracji mocy szczególnego znaczenia nabiera niezawodność i trwałość maszyn. Zapewnienie należytej niezawodności układu elektroizolacyjnego jest bardzo złożonym zagadnieniem konstrukcyjnym, materiałowo technologicznym, a także eksploatacyjnym, gdyż sposób oraz warunki eksploatacji, zwłaszcza bardzo dużych maszyn mają istotny wpływ na narażenia izolacji, a co za tym idzie na zmniejszenie wytrzymałości elektrycznej. Badania teoretyczne, laboratoryjne, jak i doświadczalne analizy zjawisk w układach elektroizolacyjnych maszyn elektrycznych wysokiego napięcia zmierzają do określenia wskaźników diagnostycznych opisujących stopień zużycia izolacji [2,4,20,21,22,23,27,32,35,37,42,61,62,63,75,83,86]. Działania te stanowią podstawowe cele prac w dziedzinie diagnostyki wysokonapięciowej. Niniejsza praca ma charakter technologiczno badawczy. Autor na co dzień zajmuje się diagnostyką wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Jako cel pracy postawił sobie opracowanie efektywnej diagnostyki off-line uzwojeń wysokonapięciowych maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin-Rich dla potrzeb projektowania, produkcji, eksploatacji i remontów maszyn elektrycznych. W oparciu o przeprowadzone liczne badania uzwojeń wysokonapięciowych silników oraz generatorów autor przedstawia następujące tezy pracy:

- jest możliwe opracowanie efektywnej metody diagnostyki off-line izolacji uzwojeń typu pręty oraz cewki maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin-Rich w oparciu o pomiar i analizę sygnału wnz.
- w sygnale wnz zawarte są informacje na temat rodzaju występującego defektu izolacji głównej uzwojeń wysokonapięciowych maszyn elektrycznych. Metody diagnostyczne prądu stałego mogą być istotnym uzupełnieniem pomiarów wnz.
- jest możliwe zaprojektowanie i zbudowanie w warunkach krajowych czujników do pomiarów wyładowań niezupełnych silników elektrycznych WN typu kondensatory pomiarowe.

2. Stojany wysokonapięciowych maszyn wirujących

Pomimo dużej różnorodności generatorów elektrycznych wszystkie one bazują w działaniu na jednej zasadzie elektromechanicznego przetwarzania energii wykorzystującej oddziaływanie pola elektromagnetycznego wytworzonego przez wzbudnik z polem elektromagnetycznym powstałym w wyniku przepływu prądu przez twornik [19]. Stojany turbogeneratorów klasyfikowane są głównie ze względu na sposób chłodzenia. Wyróżnia się trzy podstawowe typy chłodzenia [12,63, 84] :

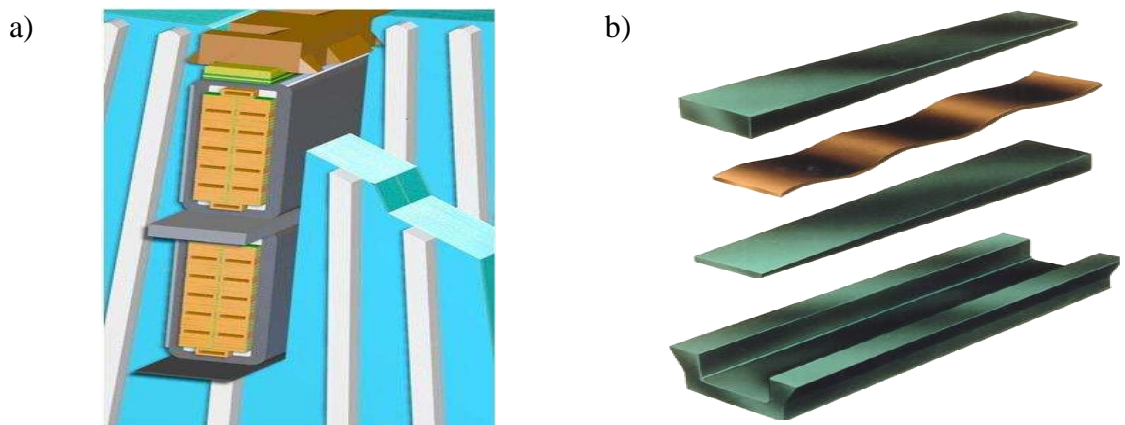
- chłodzenie powietrzne rys. 2.1 a),
- chłodzenie wodorowe rys. 2.1 b),
- chłodzenie wodno wodorowe rys. 2.1 c,d).



Rys. 2.1. Stojany generatorów, a) T237-268, $U=11,5$ kV, $S=94,35$ MVA chłodzenie powietrzne, b) TGH-120 $U=13,8$ kV, $P=120$ MW, c) TWW-200, $U=15,75$ kV, chłodzenie wodorowe $P=200$ MW, chłodzenie wodno wodorowe, d) $U=22$ kV, $S=500$ MVA, chłodzenie wodno wodorowe

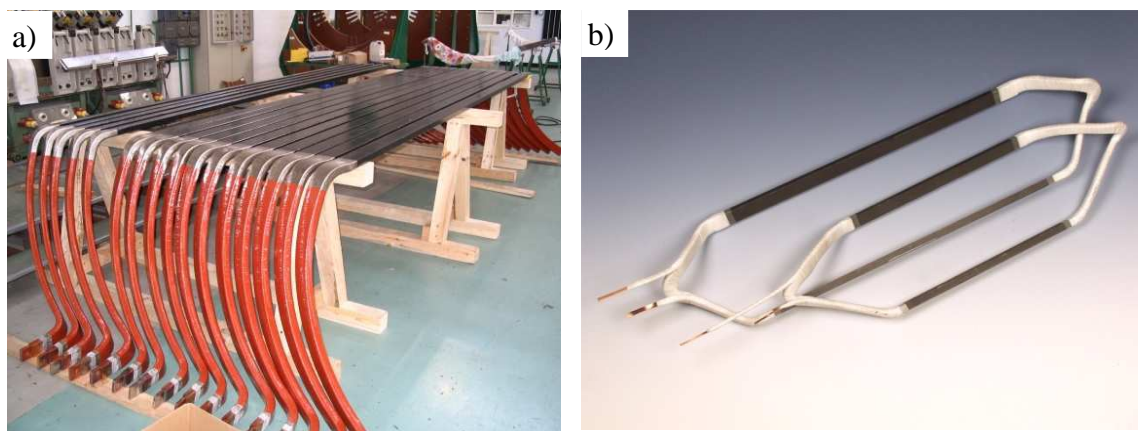
Pierwszy rodzaj chłodzenia stosowany jest w generatorach małych mocy. Zastosowanie wodoru, jako czynnika chłodzącego zdecydowanie poprawiło sprawność systemu chłodzenia generatora. Współczynnik wnikania wodoru o czystości 97% jest około 1,35 razy większy od odpowiedniego współczynnika dla powietrza. Wprowadzenie do chłodzenia wodoru zmniejszyło również straty wentylacyjne, bowiem gęstość wodoru jest około 10-krotnie mniejsza od gęstości powietrza [12,19]. Generatory z chłodzeniem wodorowym osiągają znacznie większe moce w porównaniu z chłodzonymi powietrzem. Wytrzymałość elektryczna wodoru jest prawie o połowę mniejsza od wytrzymałości powietrza, jednak praca z nadciśnieniem gazu powyżej 3 bar poprawia właściwości dielektryczne otoczenia. Na podstawie porównania wyników badań wzn generatorów metodami off-line i on-line stwierdzono również, że obecność wodoru powoduje zmniejszenie intensywności wzn w porównaniu z chłodzeniem powietrznym. Wzrost mocy generatorów wymaga podwyższenia napięcia stojana a co za tym idzie zwiększenie grubości izolacji. Prowadzi to do zwiększenia gradientu temperatury pomiędzy pakietem stojana a miedzią pręta. Wymusza to stosowanie wydajniejszego systemu chłodzenia uzwojenia a takim jest chłodzenie wodno wodorowe. W tym rozwiązaniu oprócz klasycznego chłodzenia wodorem uzwojenie chłodzone jest bezpośrednio destylatem, który przepływa przez miedziane rurki w prętach generatora. W porównaniu z wodorem, pojemność cieplna wody jest około 3770 razy większa a przy tej samej prędkości przepływu współczynnik wnikania ciepła jest ponad 2,5 razy większy [12]. Praca z nadciśnieniem wodoru wymaga szczelnego i pewnego odseparowania wnętrza stojana od powietrza ze względu na wybuchowość wodoru. Obecność wody stwarza kolejne zagrożenie spowodowane nieszczelnościami układu chłodzenia. W praktyce obserwuje się częste przypadki uszkodzenia rurek chłodzących wewnątrz uzwojenia, ich pękanie w strefie połączeń prętów górnej i dolnej warstwy jak i wycieki destylatu z wewnętrznych połączeń wodnych stojana [19,84]. Lokalne zawilgocenie izolacji prowadzi do zmniejszenia rezystancji izolacji. Przyspieszona lokalna degradacja wraz ze zmniejszoną wytrzymałością elektryczną prowadzi do szybkiej awarii stojana W korpusie na tak zwanych belkach ustalających układany jest pakiet żelaza czynnego wykonany z segmentów blach zimnowalcowanych. Blachy te pokryte są cienką warstwą wysoko wytrzymałościowego lakieru elektroizolacyjnego, co jest konieczne, aby zapobiec powstawaniu prądów wirowych w pakiecie. Pakiet stojana może być chłodzony promieniowo, osiowo lub może mieć kombinowany układ chłodzenia.

W niedowzbudzonym stanie pracy generatora zmianie ulegają drogi dla strumieni rozproszenia połączeń czołowych stojana oraz wirnika [12], wzrastają wówczas składowe osiowe wypadkowych strumieni rozproszenia powodujące znaczny wzrost strat mocy w skrajnych elementach rdzenia stojana. Pole to jest osłabiane poprzez stopniowanie skrajnych segmentów rdzenia, stosowanie skrajnych blach z wzdłużnymi nacięciami na zębach oraz poprzez stosowanie dodatkowych przekładek izolacyjnych w tych segmentach. Pakiet stojana zakończony jest tzw. palcami dociskowymi wykonanymi ze stopów paramagnetycznych które zapobiegają drganiom zębów rdzenia. Zewnętrzne płyty dociskowe utrzymują pakiet stojana pod stałym naciągami mechanicznym [12]. Opisana powyżej technologia wykonania pakietów zapobiega rozpadaniu się pakietu na skutek jego poluzowania oraz uszkodzeniom izolacji elementarnych blach na skutek przetarcia. Luźne segmenty blach w powiązaniu z wibracjami przecinają izolację stojana co w następstwie powoduje jej uszkodzenie. Uszkodzenie izolacji pomiędzy sąsiednimi blachami skutkuje dużymi lokalnymi stratami mocy na skutek prądów wirowych oraz podwyższeniem temperatury rdzenia w miejscu uszkodzenia nawet o 60K [84]. Tak wysoki przyrost temperatury prowadzi do szybkiej degradacji izolacji. Aby zapewnić stabilność prętów w żłobku uzwojenie musi zostać skutecznie usztywnione. Sposób osadzenia pręta w żłobku przedstawiony jest na rys. 2.2. Cewki są usztywniane klinami wykonanymi z wytrzymałych kompozytów elektroizolacyjnych jak np. płyta szkło-epoksyd. Zwiększenie niezawodności usztywnienia uzyskuje się dzięki klinom zbieżnym lub sprężystym podkładowi falistym (rys. 2.2.). Usztywnienie boku cewki uzyskuje się poprzez wkładanie płyt półprzewodzących pomiędzy pręt a rdzeń lub też poprzez zastosowanie specjalnych mat półprzewodzących. Luźne uzwojenie wibruje w żłobku co prowadzi do szybkiego uszkodzenia zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej pręta. Uszkodzenie powłoki ochronnej przekłada się na zwiększone wyładowania niezupełne przyspieszające osłabienie izolacji.



Rys. 2.2. Uzwojenie zamontowane w rdzeniu stojana a) oraz widok klina zbieżnego b)

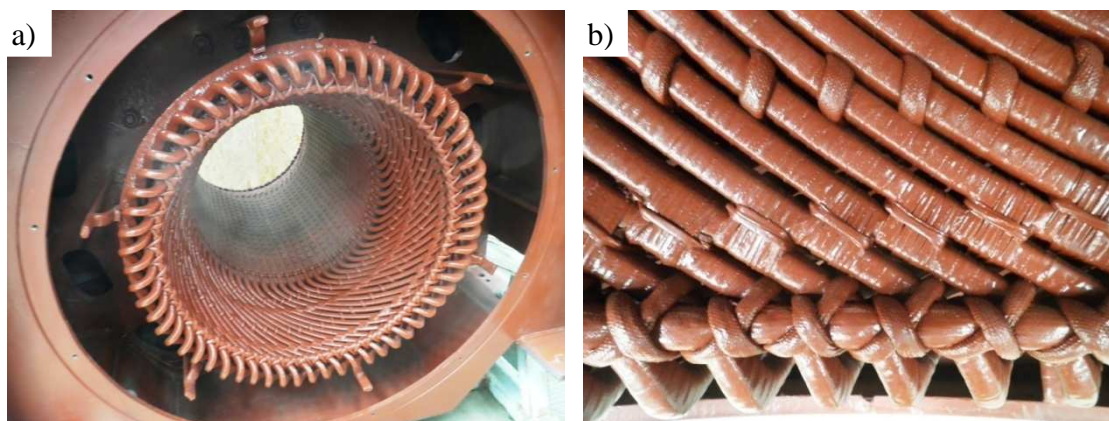
Uzwojenia stojanów wysokonapięciowych generatorów wykonane są najczęściej jako prętowe dwuwarstwowe (rys. 2.3. a), a w generatorach małej mocy oraz w stojanach silników wysokonapięciowych stosowane są uzwojenia cewkowe (rys. 2.3. b). Uzwojenia prętowe zwane są potocznie prętami stojana a uzwojenia cewkowe cewkami stojana. Znaczącą różnicą uzwojeń cewkowych jest fakt posiadania oprócz izolacji głównej, izolacji zwojowej. Izolacja zwojowa cewek stojana jest narażona na działanie silnego pola elektrycznego oraz wszelkiego rodzaju przepięć [20,36].



Rys. 2.3. Uzwojenie prętowe stojana a), uzwojenie cewkowe stojana b)

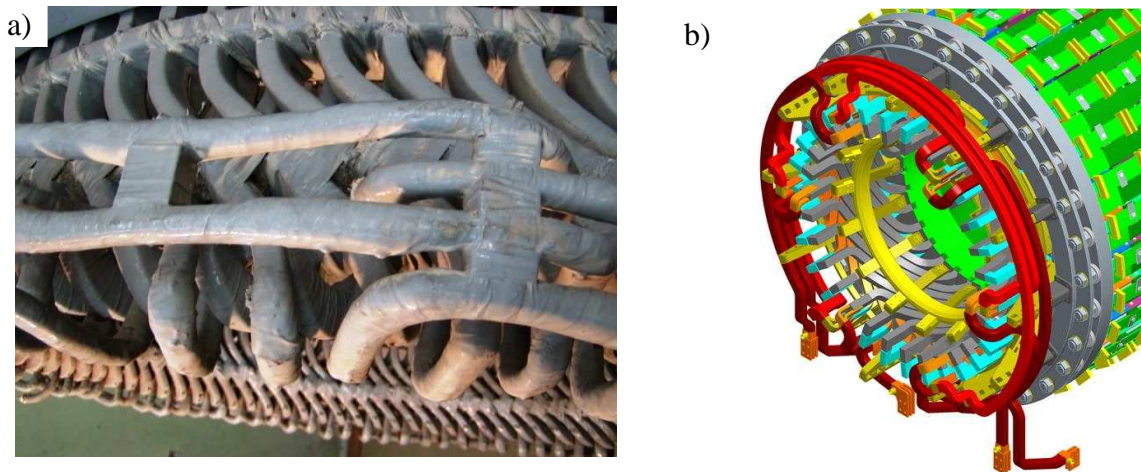
Stojany wysokonapięciowych silników elektrycznych wykonane są najczęściej jako maszyny z chłodzeniem powietrznym i pracują w otwartym bądź zamkniętym układzie chłodzenia. Napięcia stojana współczesnych silników sięgają nawet $U=18\text{kV}$ a moce silników sięgają kilkunastu megawatów. W przemyśle krajowym najczęściej stosowane są silniki indukcyjne klatkowe na napięcie $U=6\text{kV}$. Stojany silników wykonywane są podobnie jak stojany generatorów w technologii VPI oraz Resin-Rich. Uzwojenia

silników wykonane są głównie jako cewkowe co stwarza konieczność diagnostyki izolacji nie tylko głównej ale i zwojowej. Silniki często pracują jako kluczowe maszyny w zakładach produkcyjnych i narażone są niejednokrotnie na przepięcia, przeciążenia i zanieczyszczenia o poziomach znacznie wyższych niż te, które występują w turbogeneratorach [36]. Częstym problemem diagnostyki stojanów silników wysokonapięciowych jest brak możliwości pomiaru kondycji izolacji poszczególnych faz ze względu na fabrycznie wykonane nierozłączalne połączenia faz uzwojenia.



Rys. 2.4. Stojan silnika SYJd-142th/13 o mocy $P=3150\text{kW}$ na napięciu $U=6\text{kV}$: a) część czołowa uzwojeń, b) wiązania czoł uzwojenia

Część czołowa uzwojeń musi zostać dobrze usztywniona ze względu na bardzo duże siły elektrodynamiczne występujące podczas zwarć oraz podczas ciężkich rozruchów silników wysokonapięciowych. Usztywnienie takie uzyskuje się dzięki wiązaniom cewek do wsporników oraz pomiędzy sobą kordlami bądź taśmami nasączonymi żywicami epoksydowymi (rys. 2.4. b). Dodatkowym wzmocnieniem mogą być pierścienie usztywniające dociskające uzwojenie do wsporników. Poszczególne grupy uzwojenia połączone są z izolatorami przepustowymi szynami usytuowanymi na zewnętrznych częściach wsporników (rys. 2.5. a, b).



Rys. 2.5. Strefa połączeń czołowych: a) silnika MAEB 1120X o mocy $P=4400$ kW,
b) turbogeneratorsa TWW-560 o mocy $P=560$ MW

Naturalny powolny proces degradacji układu izolacyjnego stojana może trwać nawet kilkadziesiąt lat. Aby zapewnić tak długi, bezawaryjny stan pracy maszyny należy w pierwszej kolejności wykonać uzwojenie stojana o niskiej stratności dielektrycznej i bez wnz a następnie utrzymywać generator lub silnik w stanie niepowodującym przyspieszonej degradacji uzwojenia. Wszelkie uszkodzenia stojana powinny zostać wykryte oraz w możliwym stopniu naprawione podczas planowanych przeglądów maszyny.

2.2. Układy izolacyjne wysokonapięciowych maszyn wirujących

Układ izolacyjny – jest to struktura przestrzennie złożona z materiałów nośnych, izolacyjnych i przewodzących zapewniających odpowiednią wytrzymałość elektryczną i funkcjonalność urządzenia [30,31]. Izolacja uzwojeń w maszynach elektrycznych – zwana często „złem koniecznym”, jest elementem wymagającym zwiększenia gabarytów maszyny lub zmniejszenia jej mocy przy zachowaniu dotychczasowych wymiarów [67]. Izolacja utrudnia odprowadzanie ciepła z maszyny, nie jest elementem konstrukcyjnym ani częścią obwodu magnetycznego. Powyższe czynniki w powiązaniu ze znaczącymi kosztami wykonania układu elektroizolacyjnego sprawiają, że konstruktorzy maszyn elektrycznych dążą do zmniejszenia ilości izolacji przy zachowaniu jak największej jej trwałości. Maszyny elektryczne produkowane są na coraz to większe moce a co z tym idzie budowane są na coraz to wyższe napięcia. Pierwsze generatory wytwarzające energię elektryczną pod koniec XIX wieku wytwarzały napięcie na poziomie zaledwie setek woltów [52, 80].

Pół wieku później produkowano już generatory na napięcie 6300V a następnie stopniowo zwiększano napięcie stojana na 10500V, 13800V, 15750V 18000V 20000V. Obecnie produkuje się generatory na napięcia sięgające 30000V oraz silniki sięgające napięć 20000V. Izolacja w maszynach wysokonapięciowych pracuje w znacznie trudniejszych warunkach niż w maszynach niskonapięciowych głównie z powodu działania silnego pola elektrycznego na izolację oraz przemieszczeń izolacji pod wpływem wydłużeń cieplnych uzwojeń o znaczącej długości. Budowa maszyn na tak wysokie napięcia stojana wymusza stosowanie dodatkowych zabiegów technologicznych mających na celu ograniczenie lokalnych naprężeń elektrycznych poprzez stosowanie między innymi wewnętrznej oraz zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej. Obecny stan techniki wymaga wzmożonych prac nad doskonaleniem maszyn elektrycznych. Powstają nowe, coraz to lepsze materiały elektroizolacyjne lub też istniejące układy są tak modyfikowane, aby sprostać nowym standardom wykonania [75]. Wykonanie stojana z poprawnie zaprojektowaną i wykonaną ochroną przeciwjarzeniową, umożliwia uzyskanie wysokiego napięcia zapłonu wyładowań niezupełnych oraz małą intensywność wzn [2,4]. Wdrażanie nowych technologii wykonania układu izolacyjnego stanowi złożone zagadnienie z pogranicza nauki i techniki. Niejednokrotnie naukowe podejście do analizy określonego układu izolacyjnego jest trudne i wówczas podstawowe znaczenie ma tutaj doświadczenie zdobyte podczas produkcji, badań oraz remontów układów izolacyjnych maszyn.

2.3. Materiały izolacyjne wysokonapięciowych maszyn wirujących

Mika to podstawowy materiał w układach izolacyjnych maszyn wysokiego napięcia. Stosuje się ją jako izolację elektryczną i cieplną. Posiada strukturę warstwową, łupie się na cienkie i elastyczne płatki. Rozróżnia się wiele odmian tego materiału, natomiast największe znaczenie przemysłowe mają dwa gatunki miki - mika magnezowa (flogopit) oraz mika potasowa (muskowit) [13,28,67].

Mika charakteryzuje się [13]:

- dużą wytrzymałością elektryczną i cieplną;
- odpornością na gwałtowne zmiany temperatury;
- odpornością na wyładowania niezupełne;
- odpornością na starzenie.

Tabela 2.1 Własności dielektryczne miki [13].

Rodzaj miki	ρ_s [Ω m]	ϵ_w (50Hz)	$\text{tg } \delta$ (50Hz)	E_p [kV/cm]
Flogopit	10^{11}	6	0,005	800
Muskowit	10^{13}	7	0,0004	1300

Temperatura robocza miki nie może przekroczyć wartości: dla flogopitu – 900°C, a dla muskowitu – 540°C, ponieważ powyżej tej temperatury następuje odparowanie wody krystalicznej. Zastosowanie miki w postaci naturalnej stanowi niewielką część produkcji. Najczęściej wytwarza się mikanit, mikalex oraz papier mikowy [28]. Mikanit produkuje się w postaci folii lub płyt. Technologia wytwarzania polega na sklejanu drobnych płatków miki różnymi żywicznymi lepiszczami. W zależności od właściwości lepiszcza mogą stanowić materiał klasy : B - lepiszcze szelakowe, F - żywice epoksydowe, H - żywice silikonowe. Mikanity można podzielić na dwa rodzaje [13]:

- Mikanit twardy produkowany jest z flogopitu lub muskowitu bądź mieszaniny tych materiałów. Wytwarza się z niego: podkładki, przekładki, rury, tuleje, itp. Stosuje się je w aparatach elektrycznych jako elementy izolacyjne odporne na nagrzewanie. Napięcie przebicia mikanitu przekładkowego wynosi w zależności od grubości od 10 kV/mm do 20kV/mm .

- Mikanit giętki najczęściej wytwarzany jest z flogopitu w postaci arkuszy o grubości 0,15 ÷ 0,5 mm. Charakteryzuje się zdolnością do wyginania i kształtowania wykonuje się z niego izolację żłobkową i międzyzwojową maszyn elektrycznych. Napięcie przebicia mikanitu giętkiego wynosi 15 ÷ 22 kV/mm. Z mikanitu giętkiego produkuje się [13, 28,67]:

- Folie mikowe powstające w procesie nanoszenia na papierową taśmę pokrytą lakierem na gorąco i pod ciśnieniem warstwę miki, którą ponownie pokrywa się lakierem.
- Taśmy mikowe powstające z warstwy mikowej oklejanej dwustronnie papierem jedwabnym oraz szklanym, które stanowią warstwę nośną, osłonową i uzupełniającą (rys. 2.6. b). Materiałem wiążącym są najczęściej żywice epoksydowe. Własności układu izolacyjnego zależą od procesu utwardzania żywicy.

- Papier mikowy - produkowany jest z odpadów miki. Przy zastosowaniu odpowiedniego lepiszcza wykonuje się z niego mikanity i taśmę samikową.

Kolejną grupę materiałów izolacyjnych stanowią żywice. Obecnie ze względu na parametry elektryczne oraz klasę ciepłoodporności w wysokonapięciowych układach izolacyjnych wykorzystywane są wyłącznie żywice syntetyczne. Żywice syntetyczne to produkty modyfikacji żywic naturalnych i celulozy lub materiały uzyskane podczas polimeryzacji różnych związków organicznych. Żywice te są podstawą produkcji tworzyw organicznych. Używane jako lepiszcza wyrobów mikowych, oraz laminatów, a także jako komponenty w technologii próżniowego nasycania uzwojeń maszyn elektrycznych [13,28,67]. Najczęściej używane żywice syntetyczne to:

- Żywice lane, które są żywicami termoutwardzalnymi. W procesie utwardzania w wyniku reakcji chemicznej w obecności utwardzacza żywica przechodzi nieodwracalnie w stan stały. Z żywic lanych można odlewać grubościennne korpusy przy użyciu lekkich form. Produkt taki ma jednorodną strukturę bez wtrącin gazowych, ponieważ podczas reakcji nie wydzielają się żadne produkty uboczne.
- Żywice epoksydowe są najczęściej używanymi żywicami. Wytwarzane są w postaci gęstych cieczy lub łatwo topliwych ciał stałych. W skład żywicy epoksydowej wchodzi utwardzacz - substancja powodująca przyspieszenie procesu utwardzania i polepszania własności produktu. Żywice te cechują się doskonałymi własnościami elektrycznymi, mechanicznymi, małą kurczliwością oraz dużą odpornością na wpływy atmosferyczne. Właściwości tworzywa można zmieniać przez dodawanie modyfikatorów.

Roztwory żywic, asfaltów oraz olejów stanowią lakiery elektroizolacyjne. Lakiery służą do izolowania przewodów nawojowych (rys. 2.6. a), nasycania układu izolacyjnego oraz jako lepiszcze przy wytwarzaniu tworzyw warstwowych [13, 28, 67]. Lakiery powinny zapewnić:

- wysoki współczynnik wypełnienia przestrzeni nawojowej,
- dobre połączenie elementów w zwoju cewki silnika tworząc monolityczny blok,
- dobre własności dielektryczne,
- ułatwienie odprowadzania ciepła,
- odporność na temperaturę,

- odporność na czynniki chemiczne,

Lakiery elektroizolacyjne można podzielić na lakiery zawierające rozpuszczalnik (chude) i bezrozpuszczalnikowe (tłuste). Lakier zawierający rozpuszczalnik charakteryzuje się tym, że schnięcie polega na odparowaniu rozpuszczalnika, pozostałe składniki tworzą powłokę na lakierowanym przedmiocie. Natomiast w lakierach tłustych wysychanie to proces chemiczny, reakcja polimeryzacji i utleniania. Rozróżnia się także lakiery schnące na powietrzu oraz w podwyższonej temperaturze [13,28,67]. Lakiery te sklasyfikować można na:

- Lakiery pokrywające. W skład tego lakieru wchodzi takie materiały jak: żywica, rozpuszczalnik, plastyfikator (substancja nadająca elastyczność), sykatywy (substancja przyspieszająca schnięcie), pigmenty. Po wyschnięciu tworzy powierzchnię:
 - o dużej wytrzymałości elektrycznej i rezystywności,
 - nieprzenikliwą dla cieczy i gazów,
 - niezmienną właściwości mechanicznych pod działaniem temperatury,
 - mało wrażliwą na działanie wilgoci olejów i smarów,
 - o dobrej przyczepności do podłoża,
 - o większej odporności na starzenie,
 - o dobrej przewodności cieplnej.
- Lakiery nasycające służą do impregnacji izolacji przed zawilgoceniem oraz ochroną przed utlenianiem, a także do wypełnienia porów pomiędzy materiałami izolacyjnymi polepszając tym przewodność cieplną. Podstawowym składnikiem lakierów tych są nienasycone żywice poliestrowe o małej lepkości: estrowo - imidowe, epoksydowe, poliuretanowe, silikonowe.
- Lakiery klejące służą jako lepiszcza tworzyw układów warstwowych produkowanych najczęściej z miki oraz azbestu. Lakiery klejące można podzielić na: lakiery chude (roztwór szelaku w spirytusie, czarne lakiery asfaltowe, lakiery nitro) oraz lakiery tłuste (olej lniany rozcieńczony naftą).

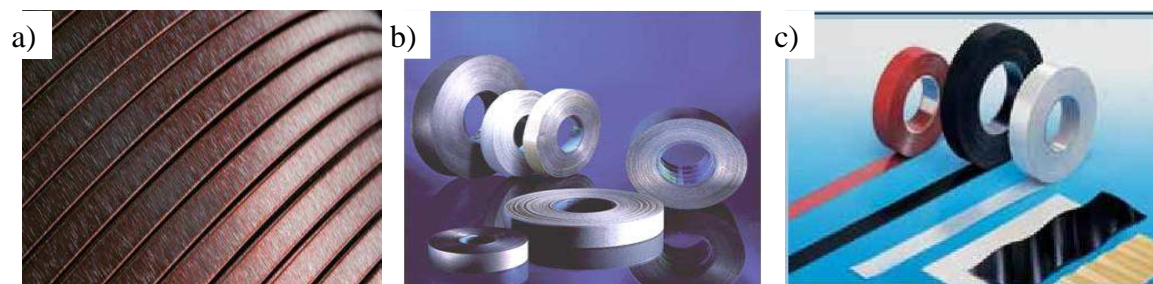
Materiały warstwowe (laminaty) są to materiały otrzymane przez złożenie i prasowanie wielu warstw w podwyższonej temperaturze. Składają się z materiałów o budowie włóknistej stosowanych jako warstwa nośna oraz materiałów przesyconych

żywicami syntetycznymi używanymi jako lepiszcze. Uzyskuje się wiele odmian laminatu o różnych właściwościach w zależności od zawartości lepiszcza w materiale czy też rodzaju papieru (nośnika) [13,28,67].

Kolejną grupę stanowią folie elektroizolacyjne. Materiały te wytwarzane są głównie z żywic termoplastycznych w postaci taśm i arkuszy jedno i wielowarstwowych. Stosuje się je celem lokalnego zwiększenia wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego oraz jako izolację zwojową [13]. Najczęściej stosowane folie elektroizolacyjne to:

- styrofleks, folia produkowana z żywicy polistyrenowej, temperatura pracy 75°C,
- folie teflonowe, temperatura pracy do 250°C,
- folie polietylenowa i poliamidowa, temperatura pracy 80°C,
- Estrofol, temperatura pracy do 130°C,
- Kapton, temperatura pracy do 250°C.

Uzupełnieniem materiałów do produkcji wysokonapięciowych układów elektroizolacyjnych są materiały wykończeniowe wykonane w postaci taśm silikonowych oraz lakierów elektroizolacyjnych o dużej rezystancji powierzchniowej jak i materiały przewodzące i półprzewodzące (rys. 2.6. c). Materiały przewodzące oraz półprzewodzące występują w postaci lakierów oraz taśm o różnych charakterystykach rezystancyjno napięciowych i są stosowane do wykonania wewnętrznej oraz zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej uzwojeń [28].

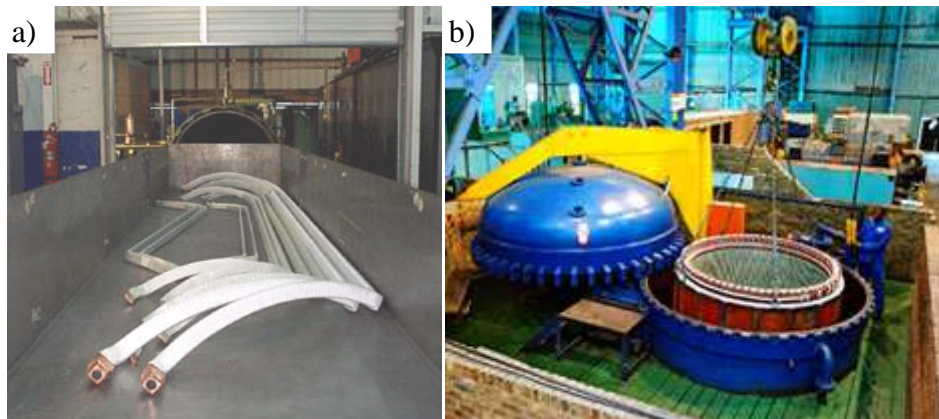


Rys. 2.6. Izolacja przewodu elementarnego pręta a), taśmy mikowe do produkcji izolacji w technologii Resin-Rich b), materiały wykończeniowe c)

Obecnie nowoczesne układy izolacyjne uzwojeń stojaków wysokonapięciowych maszyn wykonywane są w dwóch podstawowych technologiach, których wspólną cechą jest baza surowcowa czyli taśma mikowa na podkładzie z włókna szklanego [26, 30, 84].

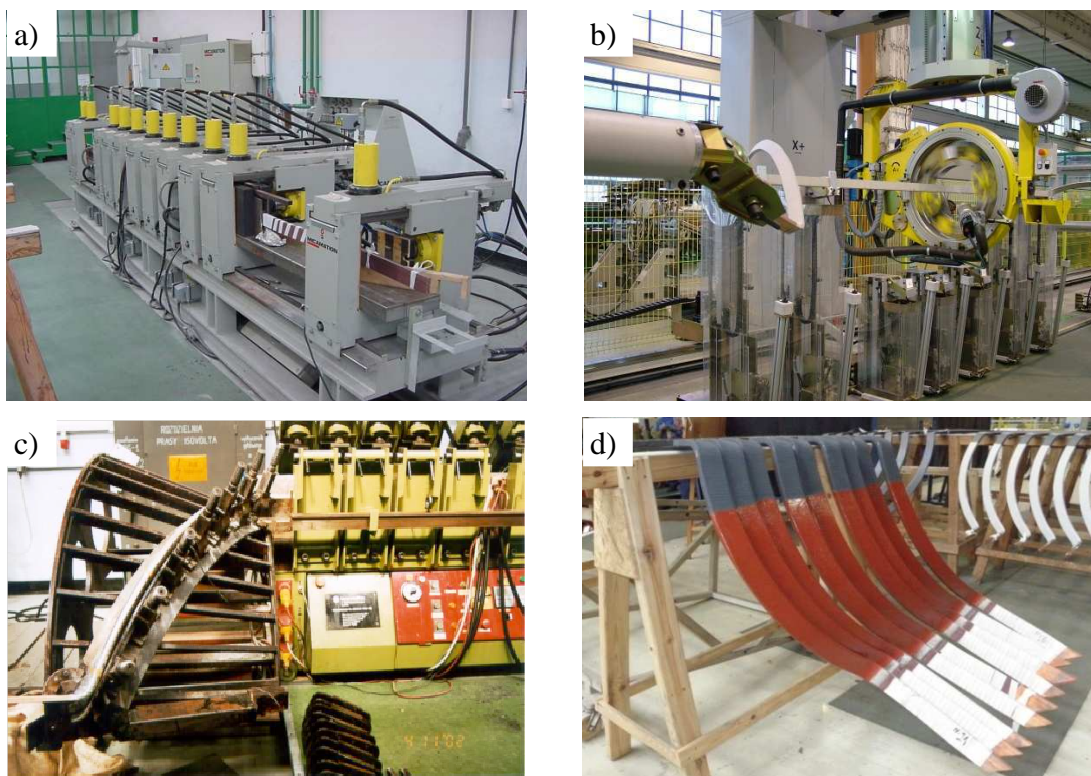
Technologiami tymi są:

- VPI (z ang. Vacuum Pressure Impregnation), cewki wykonane w tej technologii izolowane są porowatą taśmą mikową o małej zawartości lepiszcza ($4,5 \div 10\%$). Proces utwardzenia odbywa się po kontakcie żywicy klejącej z żywicą impregnującą w procesie ciśnieniowej impregnacji, po którym następuje próżniowe suszenie cewki. W technologii VPI poszczególne pręty mogą zostać poddane nasycaniu (rys. 2.7. a) lub też cały stojan po uzwojeniu zostaje impregnowany żywicą (Rys 2.7. b) [19,82,84].



Rys. 2.7. Pręty stojana generatora w technologii VPI przed procesem impregnacji a) oraz stojan generatora podczas procesu globalnej impregnacji b)

- RR (z ang. Resin Rich), technologia ta została wdrożona w latach 90-tych w zakładzie remontowym Energoserwis S.A. Lubliniec (obecnie TurboCare Poland S.A). W tej technologii jako materiał elektroizolacyjny stosowana jest taśma mikowa z dużą zawartością lepiszcza. Taśma mikowa nanoszona jest mechanicznie (rys. 2.8. b) na wstępnie utwardzony i przygotowany pręt (rys. 2.8.a) Utwardzenie izolacji następuje w procesie termo utwardzenia podczas prasowania izolacji (Rys 2.8.c). Na pręt nakładane są następnie taśmy wykończeniowe, po czym następuje hartowanie całości w piecu [19,82,84].



Rys. 2.8. Wstępne prasowanie pręta a), proces nakładania izolacji b), prasowanie izolacji c), pręty gotowe do prób końcowych d)

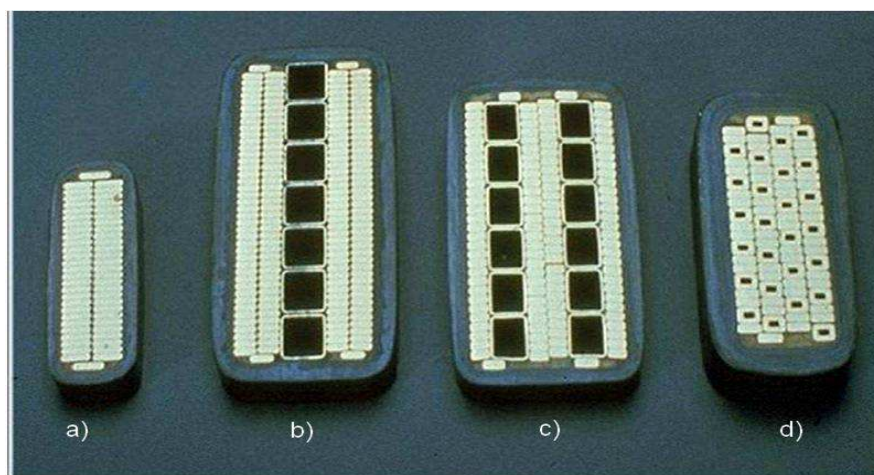
Ze względu na właściwości konstrukcyjne układu izolacyjnego można wyróżnić następujące rodzaje izolacji[26]:

- izolację mieszaną (tulejową) – inna w części żłobkowej niż w części czołowej uzwojenia,
- izolację ciągłą – jednolitą wzdłuż całego uzwojenia.

Zaletą izolacji mieszanej jest możliwość uzyskania większej elastyczności uzwojenia w strefie czół, wadą jest z kolei osłabienie układu izolacyjnego w strefie wyjścia pręta ze żłobka. Izolacja ciągła jest bardziej nowoczesna, niezawodna i znajduje obecnie powszechne zastosowania w standardowych rozwiązaniach konstrukcyjnych turbogeneratorów. Problemem technologicznym izolacji wysokonapięciowych maszyn elektrycznych jest zapewnienie struktury niesprzyjającej inicjacji wnz:

- wewnętrznych w obrębie przeplotów Roebła,
- wewnętrznych w izolacji głównej,
- zewnętrznych w strefie wyjścia uzwojenia ze żłobka,
- zewnętrznych w strefie połączeń czołowych uzwojenia stojana.

Strukturę taką uzyskuje się stosując specjalne zabiegi technologiczne mające na celu zmniejszenie gradientu pola elektrycznego. Złagodzenie rozkładu pola uzyskuje się poprzez stosowanie wypełnień oraz wykończeń izolacji wykonanych z materiałów przewodzących lub półprzewodzących o różnych charakterystykach rezystancyjno – napięciowych.



Rys. 2.9. Przekroje prętów stojana generatora: a) z chłodzeniem powietrznym, b, c) z chłodzeniem wodorowym, d) z chłodzeniem wodno - wodorowym

2.4. Problemy związane z eksploatacją układów izolacyjnych turbogeneratorów oraz silników wysokonapięciowych

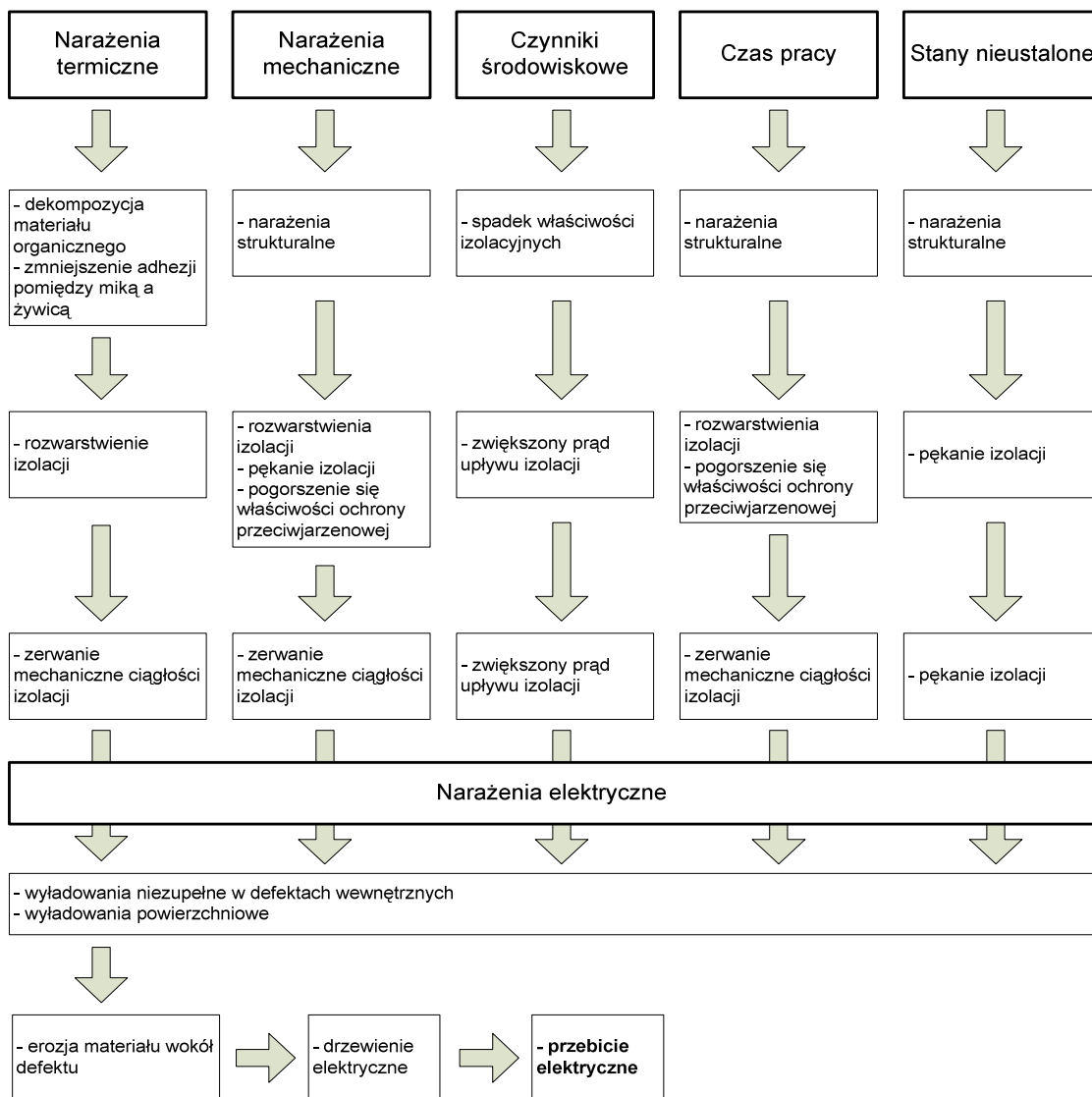
Układ elektroizolacyjny pracuje w ekstremalnie trudnych warunkach wieloczynnikowych narażeń pola elektrycznego, pola temperaturowego, sił mechanicznych oraz czynników środowiskowych. Dodatkowe czynniki mające bezpośredni wpływ na proces degradacji izolacji to:

- liczba godzin pracy,
- liczba rozruchów,
- stany nieustalone, w tym stany zwarciove,
- praca asynchroniczna generatora.

W wyniku kombinacji wyżej wymienionych czynników może nastąpić gwałtowny proces starzenia się i degradacji układu elektroizolacyjnego maszyny. Proces ten został zilustrowany na rys. 2.10.

Aktywacja procesów degradacji oznacza inicjowanie przemian w strukturze materiałów, przy czym są to [27,31]:

- przemiany fizyczne występujące na poziomie nanomolekularnym,
- przemiany chemiczne, na przykład utlenianie, polimeryzacja, depolimeryzacja.



Rys. 2.10. Schemat wieloczynnikowego narażenia układu izolacyjnego

2.4.1. Narazenia termiczne

Temperatura ma istotny wpływ na czas życia izolacji. Związek określający zależność czasu życia izolacji od jej temperatury można wyrazić równaniem Arrheniusa [67]:

$$L = A \cdot e^{\left(\frac{W}{T \cdot k}\right)} \quad (2.1)$$

gdzie:

L – czas życia izolacji,

A – stała materiałowa,

W – energia aktywacji cząstki,

k – stała Boltzmana.

Narazenia termiczne mogą mieć charakter ciągły, kiedy to na skutek strat w maszynie izolacja jest poddana ciągłemu działaniu wysokiej temperatury lub też charakter lokalny jak np. na skutek miejscowego uszkodzenia pakietu blach stojana, zatkania kanałów wentylacyjnych, zwarć zwojowych uzwojeń oraz stanów przejściowych maszyny.

Wraz ze wzrostem temperatury zmniejsza się wytrzymałość elektryczna układu izolacyjnego. Równocześnie wzrasta współczynnik strat dielektrycznych. Zachodzące pod wpływem temperatury zmiany fizykochemiczne powodują pogorszenie właściwości mechanicznych izolacji [67,82,84].

2.4.2. Narazenia mechaniczne

Rdzeń stojana przewodzi sinusoidalnie zmienny strumień magnetyczny (o indukcji sinusoidalnie rozłożonej na obwodzie pakietu) wirujący z prędkością $n=f$ [obr/s], gdzie f – częstotliwość napięcia stojana. W osi, w której wartość indukcji magnetycznej jest maksymalna powstaje największa siła przyciągająca pomiędzy biegunami wirnika a rdzeniem stojana. Na skutek tego zjawiska powstaje naciąg magnetyczny przekraczający w dużych jednostkach wartość $F= 200\text{kN}$, który deformuje kształt rdzenia stojana pierścieniowego do eliptycznego. Oś elipsy wiruje z prędkością obrotową $n=f$ [obr/s] i z prędkością kątową $\omega =2 \cdot \pi \cdot f$. Skutkuje to drganiami stojana o częstotliwości $f=100$ [Hz] [12]. Drgania te przenoszą się na część czołową uzwojeń, powodują korozję blach pakietu stojana i prowadzą do uszkodzenia zawieszenia żelaza czynnego oraz innych elementów konstrukcyjnych; są też źródłem hałasu. Drgania zębów pakietu powodują z kolei cykliczne

wycieranie się klinów uzwojenia, co powoduje poluzowanie się uzwojenia w żłobku. Uszkodzenie żelaza skutkuje lokalnym wzrostem temperatury, który może przekraczać jej dopuszczalne przyrosty. Luźne blachy stojana mogą również przeciąć izolację główną pręta stojana. Poluzowanie uzwojenia na skutek jego drgań może powodować wycieranie się zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej uzwojenia, co skutkuje przyspieszoną degradacją na skutek występowania wyładowań niezupełnych. Podczas zwarć udarowych generatora ogromne siły działające na uzwojenie mogą powodować pęknięcia oraz przerwania ciągłości izolacji zwłaszcza w obszarze połączeń czołowych uzwojeń. Drgania mogą spowodować również uszkodzenie chłodnic wodoru bądź rurek chłodzących w prętach stojana. Wydostająca się woda powoduje szybkie pogorszenie wytrzymałości elektrycznej układu elektroizolacyjnego. Istotnym problemem są też ruchy dylatacyjne uzwojeń zarówno stojana jak i wirnika będące skutkiem różnych rozszerzalności cieplnych izolacji oraz miedzi. Układ izolacyjny stojana posiada dostateczną elastyczność pozwalającą na równoczesną zmianę jej długości wraz ze zmianą długości miedzi. Należy jednak zaznaczyć, że w wyniku licznych cyklicznych przemieszczeń może nastąpić rozwarstwienie izolacji pręta stojana.

2.4.3. Czynniki środowiskowe

Czynniki środowiskowe działające na układ elektroizolacyjny generatorów można podzielić następująco [27,31,82]:

- pyły oraz inne zanieczyszczenia przemysłowe,
- pary olejów,
- pył grafitowy ze szczotek grafitowych,
- agresywne związki chemiczne,
- wilgotność,
- ciśnienie atmosferyczne.

Duże turbogeneratory mają zwykle zamknięte układy chłodzenia, co pozwala odseparować się od części zewnętrznych czynników. Jednak często w generatorach występuje zanieczyszczenie powierzchniowe parami oleju pochodzącymi z układu uszczelnień wału bądź jego łożysk. Film olejowy na powierzchni uzwojenia w połączeniu z pyłami tworzy osad o stosunkowo dużej konduktywności, który przyczynia się do pogorszenia stanu izolacji układu oraz sprzyja powstawaniu wyładowań powierzchniowych w częściach czołowych uzwojeń stojana.

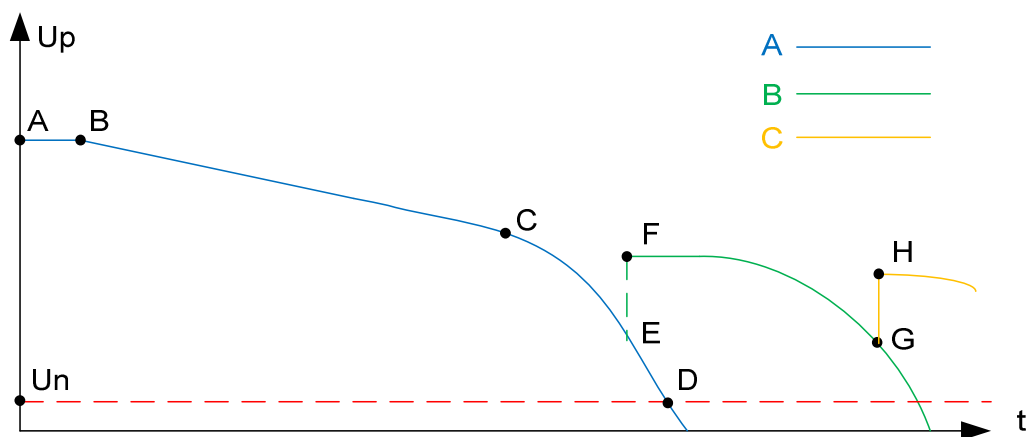
2.4.4. Starzenie wieloczynnikowe

Starzenie wieloczynnikowe występuje w przypadku oddziaływania zespołu kilku narażeń, które wpływają na procesy starzeniowe. W praktyce starzenie izolacji jest złożonym procesem, a wystąpienie uszkodzenia w postaci awarii układu izolacyjnego jest spowodowane efektem oddziaływania kilku czynników, nawet w przypadku, gdy jeden z czynników narażeń jest czynnikiem dominującym (rys. 2.9.). Czas życia izolacji jest funkcją sumy poszczególnych narażeń jednak istotne są interakcje pomiędzy poszczególnymi grupami narażeń [27,31]. Praktycznym podejściem do oceny stopnia wieloczynnikowej degradacji izolacji jest diagnostyka oparta na obowiązujących normach oraz wiedzy eksperckiej.

3. Diagnostyka wysokonapięciowych układów elektroizolacyjnych

Diagnostyka układów izolacyjnych turbogeneratorów oraz silników WN obejmuje metodykę podejmowania decyzji o aktualnym stanie urządzenia pod względem niezawodnego spełnienia jego funkcji eksploatacyjnych, planowaniu napraw mających na celu poprawę kondycji układu izolacyjnego oraz przewidywaniu czasu dalszej jego eksploatacji [27]. Turbogeneratory są kluczowymi maszynami wytwarzającymi energię elektryczną. Ich niezawodność w znaczący sposób wpływa na pewność zasilania w energię elektryczną. Wymagania techniczne stawiane turbogeneratorom określa się nie tylko na podstawie warunków i ekonomiki ich produkcji, ale również uwzględniając warunki pracy w systemie elektroenergetycznym. Uszkodzenia maszyn elektrycznych mogą być natury mechanicznej (uszkodzenia wału, kołpaków, rdzenia, korpusu) lub też natury elektrycznej (uszkodzenie izolacji głównej, zwojowej uzwojeń stojana i wirnika). Defekty mechaniczne mogą bezpośrednio przyczynić się do uszkodzenia izolacji uzwojeń stojana i wirnika. Wykrywanie defektów w początkowym stadium ich występowania i wykrycie ich przyczyn jest podstawowym zagadnieniem technicznej diagnostyki stanu turbogeneratorów. Z analizy przebiegu ciężkich awarii stojanów wysokonapięciowych maszyn wynika, że sytuacja awaryjna zazwyczaj nie występuje nagle [11,83,84]. Dlatego też przez ciągłą czy też okresową kontrolę podstawowych parametrów charakteryzujących kondycję maszyny można zapobiec awarii co uzasadnia konieczność monitorowania stanu turbogeneratorów [84]. W celu utrzymania poprawnego stanu układu izolacyjnego maszyny należy okresowo przeprowadzać próby i pomiary elektryczne, które pozwolą ustalić tendencję zmian struktury izolacji a także pozwolą wykryć defekty, które mogą się rozwijać oraz przyczynić się do skrócenia czasu życia układu izolacyjnego. Na rys. 3.1. przedstawiono krzywą „czasu życia” układu izolacyjnego maszyny. Dla nowo uzwojonego generatora, napięcie przebicia uzwojenia stojana może sięgać nawet sześciokrotnej wartości napięcia znamionowego (informacje z niepublikowanych badań autora). Krzywa A przedstawia zależność wartości napięcia przebicia izolacji stojana w funkcji czasu eksploatacji układu izolacyjnego w przypadku naturalnego procesu degradacji izolacji. W pierwszym etapie (odcinek AB) następuje właściwe utwardzenie się układu elektroizolacyjnego maszyny. W tym przypadku parametry elektroizolacyjne często nie

ulegają zmianie a w niektórych przypadkach następuje ich polepszenie. Po procesie utwardzenia następuje powolna naturalna degradacja układu izolacyjnego – prosta BC a następnie proces przyspieszonej degradacji izolacji – krzywa CD. W punkcie D napięcie przebicia izolacji jest równe napięciu pracy maszyny i dochodzi do awarii. Celem okresowych przeglądów maszyny oraz pomiarów diagnostycznych jest wykrycie wad mających bezpośredni wpływ na czas eksploatacji maszyny oraz ich usunięcie lub zminimalizowanie wpływu na dalszą pracę maszyny.



Rys. 3.1. Krzywa „czasu życia” izolacji A – proces naturalnego starzenia, B – krzywa po regeneracji izolacji podczas remontu, C – krzywa po kolejnej regeneracji

Degradacja izolacji uzwojeń jest nieunikniona jednak niektóre rodzaje defektów i uszkodzeń izolacji można wykryć i usunąć, wydłużając tym samym czas bezawaryjnej pracy maszyny. Wynikiem poprawnie przeprowadzonej diagnostyki w pkt. E rys. 3.1. powiązanej z naprawą słabych miejsc układu elektroizolacyjnego jest przejście pkt. E do pkt. F co ma wpływ na wydłużenie czasu bezawaryjnej pracy maszyny zgodnie z krzywą FG. Dalszy przyspieszony proces degradacji wymusza częstsze przeglądy oraz naprawy. Zaplanowany remont nie generuje jednak tak ogromnych kosztów jak nieplanowany przestój spowodowany awarią.

Diagnostyka komponentów turbogeneratorsa na etapie ich wytwarzania towarzyszy niemalże każdemu kluczowemu krokowi produkcji. Rezultatem diagnostyki jest decyzja która wynika z pomiarów w ramach których mierzy się określoną wielkość a wynik porównuje z wartościami dopuszczalnymi. Istotne jest aby w przypadku negatywnego wyniku badań wskazać możliwą przyczynę występowania usterki celem poprawy procesu technologicznego.

Obecnie stosuje się pomiary diagnostyczne przy prądzie stałym, przemiennym o częstotliwości sieciowej oraz napięciem wolnozmiennym [20,25,30,37,39,40,42,53,54, 71,75,79,83,89,90,92]. Autorowi znane są następujące metody diagnostyki wysokonapięciowych układów elektrycznych maszyn:

- metoda w oparciu o pomiary IR, k, PI, C, SV, DD - test Meggera,
- wielokryterialna metoda prof. Tadeusza Glinki na podstawie pomiarów napięciem stałym,
- pomiar wyładowań niezupełnych,
- pomiar współczynnika strat dielektrycznych oraz pojemności uzwojeń,
- metoda impulsowa,
- pomiar prądu absorpcji przy liniowej lub skokowej rampie napięciowej,
- metoda spektroskopii niskoczęstotliwościowej,
- pomiar izotermicznych prądów relaksacji (metoda PDC),
- pomiar napięcia powrotnego (metoda RMV),
- pomiar zespolonej stałej dielektrycznej w zakresie ultra niskich częstotliwości (metoda FDS),

Diagnostyka izolacji powyższymi metodami opiera się na porównaniu określonych wartości oraz współczynników będących skutkiem przyłożonego napięcia stałego z wartościami zawartymi w normach oraz poradnikach branżowych. Dopuszczalne wartości oraz parametry izolacji określa się na podstawie szeregu badań i obserwacji trendu zmian danych parametrów.

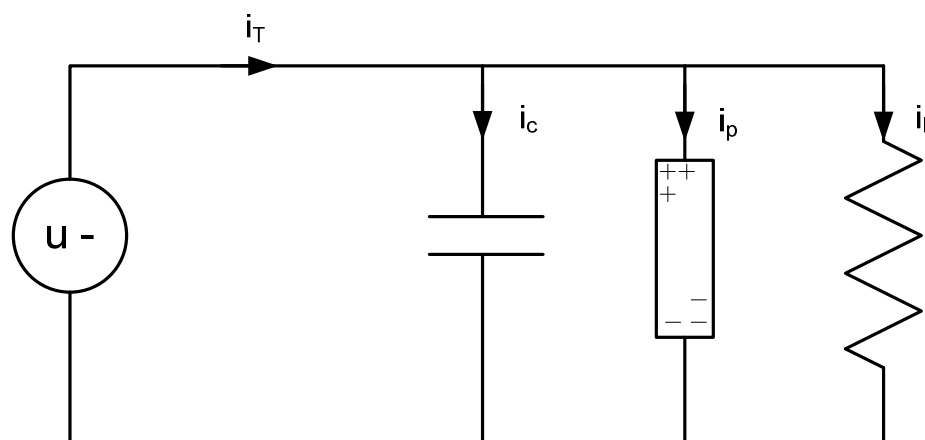
Prostota pomiaru napięciem stałym, małe gabaryty sprzętu pomiarowego oraz szybkość otrzymania wyników sprawia, że metody te są powszechnie stosowane do ogólnej a nawet zaawansowanej oceny stopnia zużycia izolacji [22, 37, 79]. Zaletą tych metod pomiaru jest również duża odporność na zakłócenia zewnętrzne [37]. Napięcia przemiennie zalecane są do prób napięciowych, ponieważ odpowiadają one narażeniom występującym podczas normalnej eksploatacji maszyny i odzwierciedlają naprężenia stosowane w fabrycznych testach jakościowych. Wykonanie testów napięciem przemiennym o częstotliwości sieciowej wymaga wysokonapięciowego źródła zasilania napięcia przemiennego. Do diagnostyki stojanów turbogeneratorów wykorzystywane są transformatory probiercze zasilane z regulowanego źródła napięcia bądź też układy rezonansowe. Gabaryty zestawów probierczych są duże a ich waga często przekracza kilka

ton. Stosunkowo duże prądy po stronie wysokiego napięcia – sięgające kilku amperów wymuszają stosowanie drogich układów rezonansowych z szeregową bądź równoległą kompensacją bierną indukcyjną. Duża moc układu probierczego sprawia, że w przypadku osłabionej izolacji podczas przeskoku napięcia następuje nieodwracalne uszkodzenie układu izolacyjnego. Kolejną wadą opisywanych metod diagnostycznych jest duży wpływ na zakłócenia zewnętrzne, co ma szczególne znaczenie w pomiarze wyładowań niezupełnych. Powyższe czynniki sprawiają, że metody diagnostyczne są kosztowne i czasochłonne w porównaniu z diagnostyką izolacji przy napięciu stałym.

Autor z powodzeniem praktykuje równoległe większość z opisanych powyżej metod pomiarowych, największą uwagę poświęcając jednak diagnostyce izolacji metodą wyładowań niezupełnych. Metoda ta zostanie opisana szerzej w osobnym, czwartym rozdziale pracy.

3.1. Schemat zastępczy modelu układu izolacyjnego

Odpowiedź układu na przyłożone napięcie związana jest bezpośrednio z parametrami schematu zastępczego układu izolacyjnego (rys 3.2) [1,65,47,53].



Rys. 3.2. Uproszczony schemat zastępczy układu izolacyjnego

Na prąd całkowity płynący w badanym obwodzie i_T składają się następujące prądy [70, 53,37]:

- prąd pojemnościowy i_c jest prądem ładowania izolacji i zależy od pojemności badanego obiektu C oraz pochodnej napięcia u . Prąd ładowania i_c wiąże się z polaryzacją sprężystą (jonową i elektronową), a jego energia jest wydatkowana na zmagazynowanie energii potencjalnej w polu elektrycznym

kondensatora [35]. Polaryzacja sprężysta trwa bardzo krótko, bo od 10^{-15} do 10^{-12} s. Po tym czasie prąd ładowania $i_c(t)$ zanika, osiągając wartość zerową [70].

$$i_c = C \cdot \frac{du}{dt} \quad (3.1.)$$

- prąd polaryzacji (absorpcji) i_p - powodowany przez ładunki w materiale izolatora poruszane pod wpływem pola elektrycznego lub dipole molekuł ustawiające się zgodnie z liniami przyłożonego pola. Proces zajmuje dużo więcej czasu niż ładowanie pojemnościowe, które wynosi od milisekund do kilku godzin, a nawet dłużej dla niektórych dielektryków. W rzeczywistym dielektryku zwykle jednocześnie funkcjonuje wiele mechanizmów relaksacyjnych. Pełną charakterystykę rzeczywistego dielektryka można odwzorować, jeżeli w układzie zastosuje się wiele gałęzi równoległych szeregowego połączenia C_p i R_p o różnych stałych czasowych [53,70].

$$i_p(t) = \sum_{n=1}^{j=n} i_{p0j} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_j}\right) \quad (3.2.)$$

gdzie:

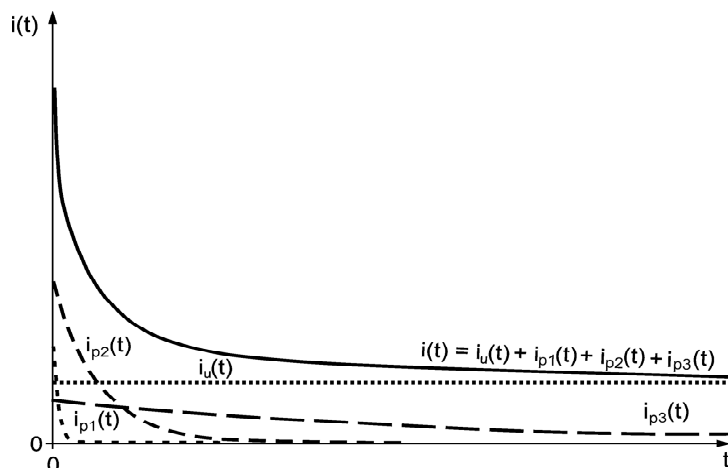
i_{p0} - wartość początkowa prądu i_p ,

τ_r - stałą relaksacji.

Spadek prądu absorpcji i późniejszy quasi-ustalony stan przewodzenia prądu są na ogół uważane za przejaw różnych mechanizmów takich jak:

- szybka i wolna orientacja dipoli,
 - polaryzacja elektrod,
 - zjawisko pułapkowania ładunku,
 - wstrzykiwanie ładunku do objętości dielektryka,
 - tunelowanie ładunku z elektrody do pustych pułapek,
 - hoppingowanie nośników ładunków [70].
- prąd upływu i_L - prąd płynący w izolacji głównej oraz po powierzchni izolacji. Przepływowi tego prądu towarzyszy ciągła zamiana energii elektrycznej na ciepło w materiale izolacyjnym. Warstwa powierzchniowa dielektryka, będącego

w kontakcie ze środowiskiem również o właściwościach dielektrycznych, może mieć inne właściwości przewodzące niż pozostałe głębsze warstwy. Jest to spowodowane oddziaływaniem środowiska (wilgoć i zanieczyszczenia) na powierzchnię dielektryka [53,70].



Rys. 3.3. Składowe prądu przy pomiarze rezystancji układu izolacyjnego napięciem stałym. $i_{p1}(t)$, $i_{p2}(t)$, $i_{p3}(t)$ – składowe polaryzacji orientacyjnych; $i_u(t)$ – prąd upływu; $i(t)$ – prąd całkowity [25, 50]

3.2. Diagnostyka izolacji napięciem stałym – test Meggera

Pomiar rezystancji izolacji jest pomiarem fundamentalnym dającym w szybki sposób pogląd na ogólną kondycję układu izolacyjnego. Pomiaru dokonuje się przy stałej wartości napięcia testera. Informację na temat wartości napięcia testu można znaleźć w publikacjach, poradnikach oraz normach [1,47,49,79]. Obrazuje je też poniższa tabela 3.1.

Tabela 3.1. Wartości napięć probierczych w pomiarze stanu izolacji wysokonapięciowych maszyn elektrycznych [1,47,49]

Napięcie znamionowe uzwojenia [V]	Napięcie pomiaru [V]
< 1000	500
1000 do 2500	500 do 1000
2501 do 5000	1000 do 2500
50001 do 12000	2500 do 5000
>12000	5000 do 10000

Z pomiarem rezystancji izolacji związane są następujące wartości oraz współczynniki [47,79]:

- wartość minimalna rezystancji izolacji po czasie $t=60s$:

$$R_{60|40C} > 100 \text{ M}\Omega \quad [47] \quad (3.3.)$$

$$R_{(60|75^{\circ}C)} > k_{75} \frac{U_n}{1000 + 10 \cdot S_n} \quad [79] \quad (3.4.)$$

gdzie :

k_{75} – współczynnik temperaturowy izolacji podany w normie [79]

U_n – napięcie znamionowe maszyny wyrażone w V,

S_n - znamionowa moc pozorna maszyny wyrażona w MVA.

- współczynnik absorpcji k oraz polaryzacji PI

$$k = R_{60} / R_{15}, \quad (3.5.)$$

$$PI = R_{600} / R_{60}, \quad (3.6.)$$

gdzie:

R_{15}, R_{60}, R_{600} – wartości rezystancji izolacji po 15s, 60s, 600s.

Współczynnik absorpcji w stosunkowo krótkim czasie daje poglądową informację na temat stanu zanieczyszczenia czy też zawilgocecia izolacji. W przypadku izolacji zanieczyszczonej / zawilgoconej duże prądy upływu izolacji maskują zjawisko absorpcji a charakterystyka izolacji w funkcji czasu jest płaska. Dla układu izolacyjnego klasy F przyjęte są następujące wartości współczynnika absorpcji determinujące kondycję izolacji pod kątem ww. czynników [47,79,92].

$$k > \begin{array}{l} 1,5 \text{ przy temperaturze } 20^{\circ}\text{C} \\ 1,4 \text{ przy temperaturze } 40^{\circ}\text{C} \\ 1,3 \text{ przy temperaturze } 60^{\circ}\text{C} \end{array} \quad (3.7.)$$

Pomiar współczynnika polaryzacji daje podobne rezultaty jak w przypadku współczynnika absorpcji jednak pomiar ten nie jest obarczony tak dużym błędem temperaturowym. Dlatego też wartość współczynnika PI może być używana do pomiarów okresowych celem obserwacji trendu zmian. Tabela 3.2. przedstawia minimalne wartości współczynnika PI dla izolacji klasy F [79,92].

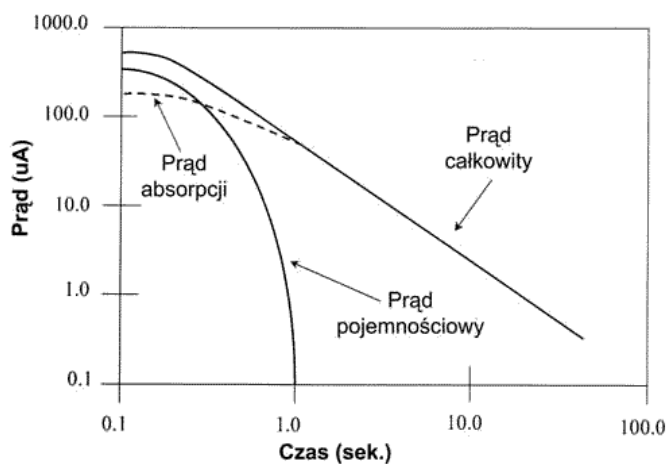
Tabela 3.2. Kryteria oceny kondycji izolacji uzwojenia w klasie F na podstawie pomiaru współczynnika polaryzacji

Wynik pomiaru <i>PI</i>	Stan izolacji
<1,0	Zły
1,0÷2,0	Wątpliwy
2,0÷4,0	Dobry
>4.0	Bardzo dobry

Przy interpretacji wyników pomiarów *PI*, szczególnie gdy znamy historie badanego obiektu, istnieją dwa charakterystyczne stany, których znajomość jest przydatna [1,64]:

- sucha, skruszała izolacja może dawać wysoką wartość współczynnika *PI* ale przebijać w stanach narażeń,
- uszkodzona jedna z warstw w izolacji wielowarstwowej w sytuacji gdy pozostałe utrzymują wysoką rezystancję. W efekcie mierzony prąd będzie dążył do zwiększenia wartości *PI* mogąc maskować problemy upływności powierzchniowej powodowane przez zabrudzenia i zanieczyszczenia.
- współczynnik depolaryzacji dielektryka *DD*.

W odróżnieniu od innych metod mierzących prądy płynące w czasie procesu ładowania dielektryka w metodzie *DD* mierzony jest prąd płynący podczas rozładowania dielektryka. Rys. 3.4 przedstawia prąd płynący w izolacji podczas rozładowania dielektryka.



Rys. 3.4. Prąd płynący w izolacji podczas rozładowania dielektryka [1,92]

Podczas pomiaru parametru DD pojemność izolacji jest ładowana przez długi czas (zalecane około 30 minut) [1]. Po tak długim czasie zakończony jest proces ładowania i polaryzacji. W izolacji „aktywny” jest tylko prąd upływnościowy izolacji. Następnie izolacja jest rozładowywana. Pomiar prądu rozpoczyna się po upływie 1 minuty aby wyeliminować składową rozładowania pojemności. Wskaźnik DD określany jest ze wzoru:

$$DD = \frac{I_{1\min}}{U \times C} \quad (3.8.)$$

gdzie:

$I_{1\min}$ - prąd po 1 minucie od rozpoczęcia rozładowywania izolacji,

U - napięcie pomiarowe cyklu ładowania,

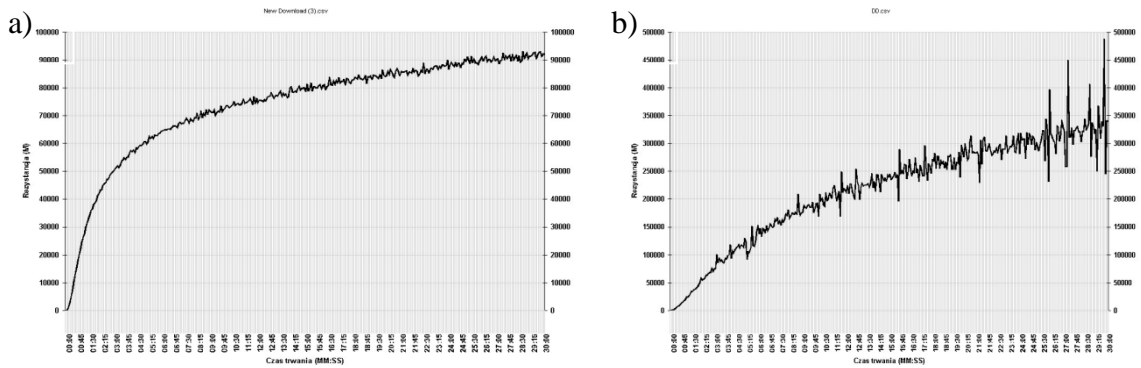
C - pojemność badanego układu izolacji.

Tabela 3.3. Wielkości określające stan izolacji silników WN dla wskaźnika DD

Wynik pomiaru DD	Stan izolacji
>7	Zły
>4	Wątpliwy
$2 \div 4$	Dobry
< 2	Bardzo dobry

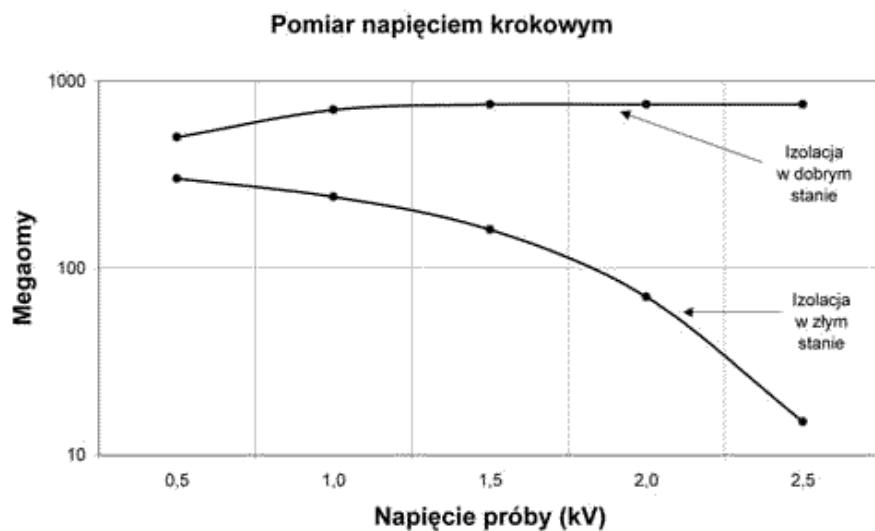
Pomiar wskaźnika DD jest szczególnie przydatny przy ocenie stanu izolacji maszyn elektrycznych WN mających izolację wielowarstwową. W wielowarstwowym izolatorach uszkodzenie jednej z warstw nie będzie dostrzeżone jeżeli pozostałe warstwy mają wysoką rezystancję. Mierzona jest absorpcja dielektryka badanego obiektu przy zignorowaniu efektu równoległych upływów od ścieżek powierzchniowych [25].

Podczas prób napięciem stałym możliwa jest ciągła rejestracja wyników pomiarów. Analiza wykresu czasowego może również dostarczać cennych informacji na temat kondycji izolacji. Kiedy w układzie izolacyjnym ustaną procesy relaksacyjne (czas ten wynosi nawet kilkadziesiąt minut) w przypadku zdegradowanego układu izolacyjnego można zaobserwować wyładowania mostkowe. rys. 3.5. przedstawia wyniki badań [95] układu izolacyjnego dwóch identycznych silników o mocy 400kW na napięciu 6kV w klasie izolacji B wykonanych przez tego samego producenta.



Rys. 3.5. Wykresy pomiaru rezystancji izolacji stojana silnika 6kV a) izolacja w dobrej kondycji, b) izolacja w której występują wnz [95]

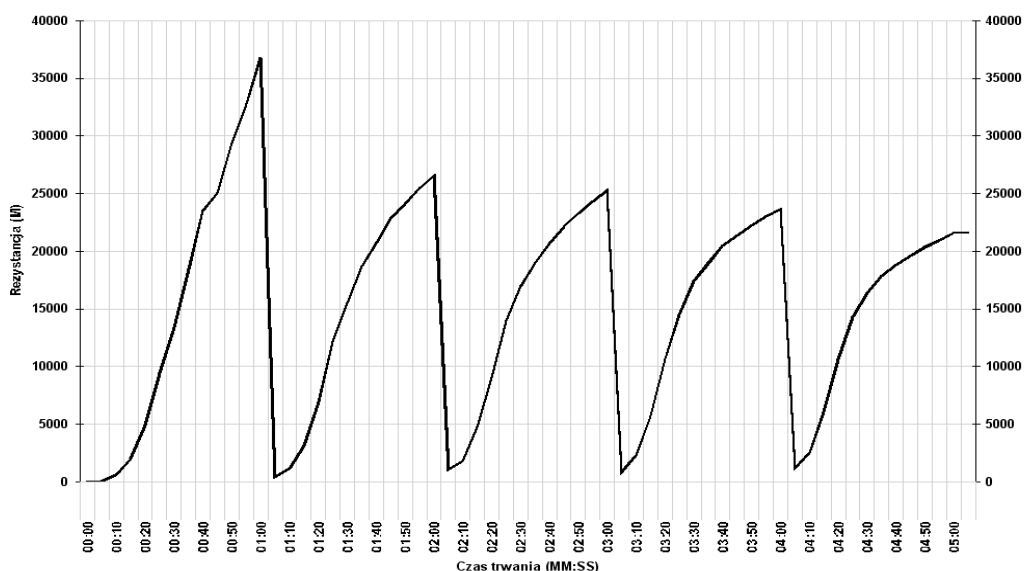
Dla układu izolacyjnego w dobrej kondycji wartość rezystancji izolacji nie zależy w znaczący sposób od wartości przyłożonego napięcia. Amplituda składowych polaryzacyjnych także wykazuje liniową zależność. Układ izolacyjny lub materiał o gorszych własnościach izolacyjnych będzie wykazywał stopniowy spadek rezystancji (i wzrost prądu upływu) w miarę wzrostu napięcia, co wiąże się ze znaczną skalą zjawisk nieliniowych, wynikających z obecności zanieczyszczeń, lokalnych deformacji pola elektrycznego, obecności ładunku przestrzennego czy też wyładowań niezupełnych. Celem metody jest określenie rozbieżności pomiędzy liniowym modelem, którego występowanie można założyć na najniższym poziomie napięcia, oraz wartościami prądów określonymi na podstawie pomiarów przy wyższych poziomach napięcia [10,25,30,63]. Nie jest konieczne osiągnięcie napięcia roboczego danej izolacji aby tego rodzaju defekty stały się widoczne [1,25,92].



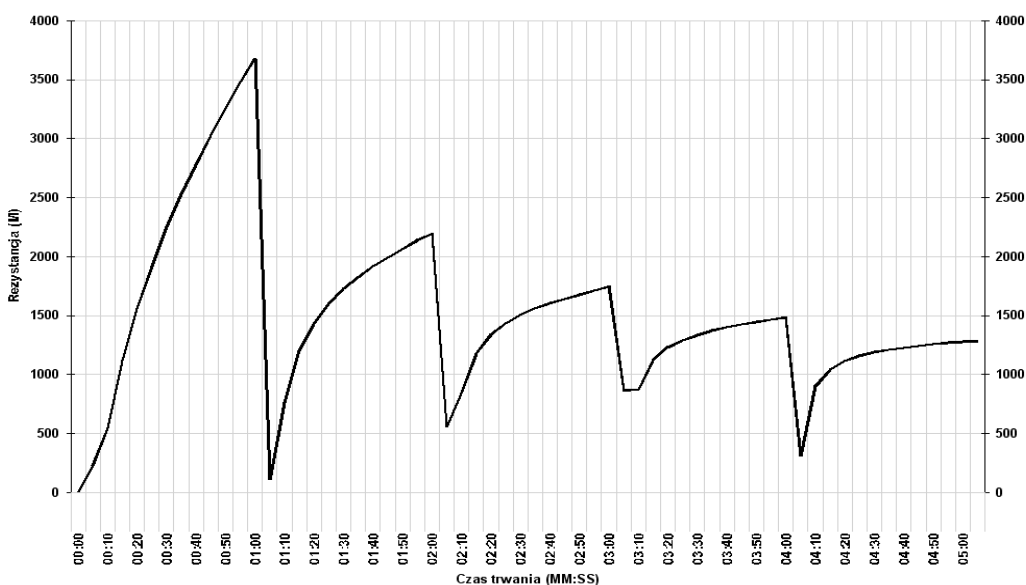
Rys. 3.6. Rezystancja izolacji w funkcji napięcia probierczego [25]

W pomiarze metodą SV dokonuje się ciągłej rejestracji wartości rezystancji izolacji a napięcie jest schodkowo podnoszone co minutę w pięciu równych krokach.

Poniżej przedstawione zostały przykładowe wyniki pomiarów przeprowadzonych metodą SV.



Rys. 3.7. Rezystancja izolacji w funkcji napięcia probierczego – izolacja w dobrym stanie technicznym [92]

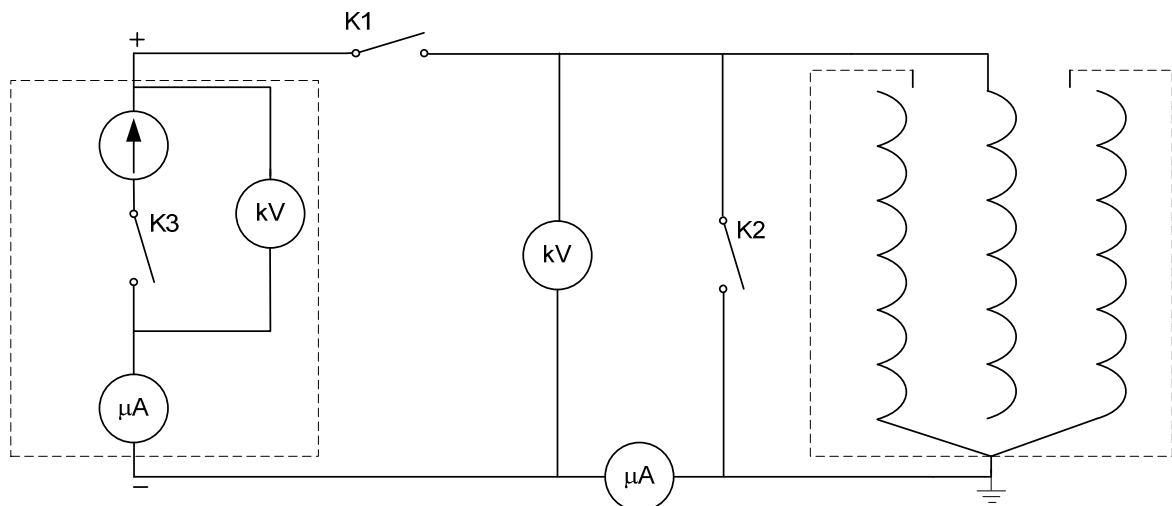


Rys. 3.8. Rezystancja izolacji w funkcji napięcia probierczego – izolacja częściowo zużyta [92]

Przyjmuje się, że odchyłki rezystancji izolacji większe niż 25% wskazują na obecność zanieczyszczeń lub wilgoci [1,10, 25, 63].

3.3. Badanie układu izolacyjnego napięciem stałym według metody prof. Tadeusza Glinki

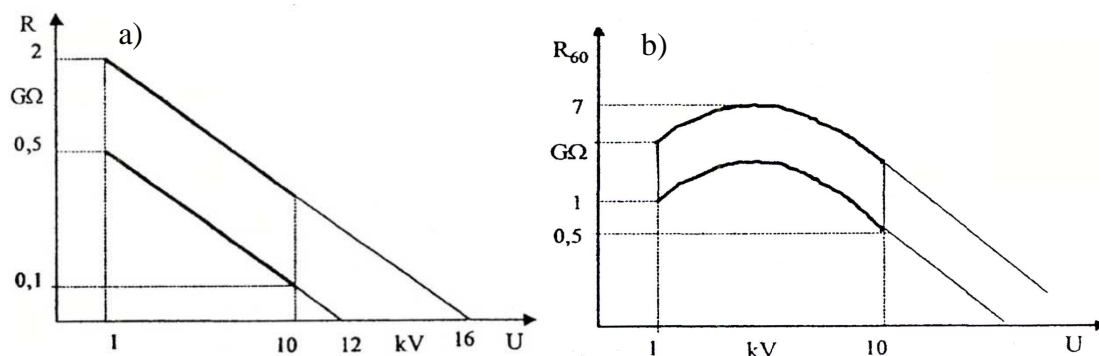
Uznanie dla tej metody spowodowało, że została ona wpisana do Polskiej Normy PN-E-04700 jako próba nieobowiązkowa. Badania przeprowadza się w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 3.9.



Rys. 3.9. Schemat układu pomiarowego do badania układu izolacyjnego metodą T.Glinki [37, 21, 79]

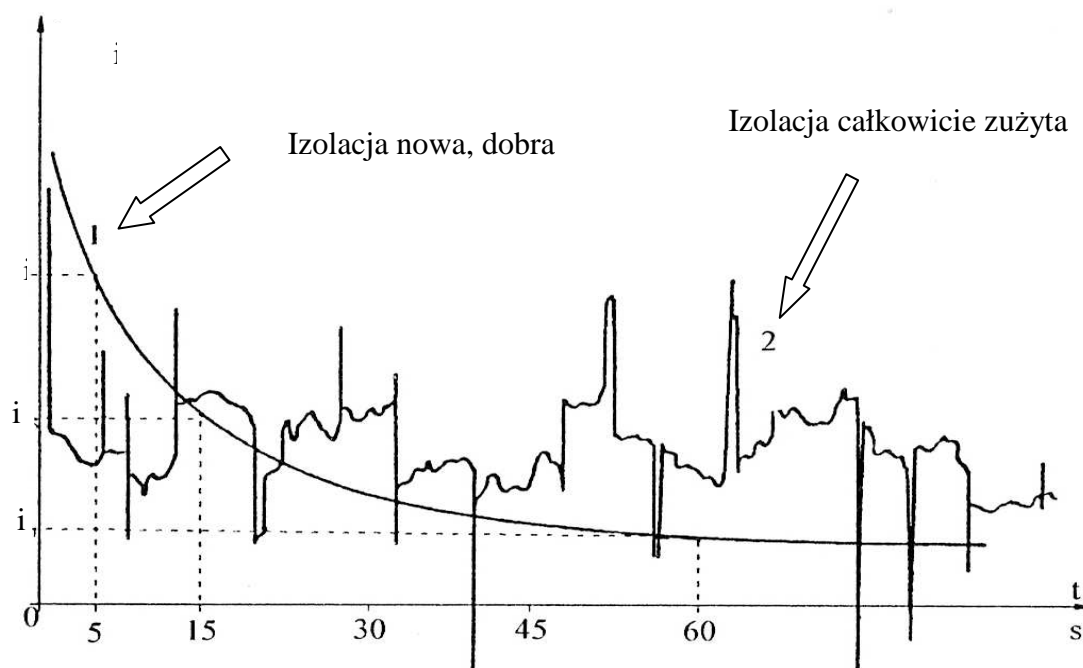
Badanie układu izolacyjnego napięciem stałym według metody T. Glinki obejmuje następujące próby [21,22,23,37,71,79]:

- Wyznaczenie charakterystyki $R_{60}=f(U)$, o ile to możliwe w przedziale napięcia od 0 do $2U_N$. Przedstawione wykresy (rys. 3.10) obrazują uogólniony obszar charakterystyk $R_{60} = f(U)$ dla stojanów o bardzo słabej izolacji oraz dla stojanów o bardzo dobrej izolacji [21,22,23,37,71,79].



Rys. 3.10. Uogólniony obszar charakterystyk: a) charakterystyka $R_{60} = f(U)$ stojanów o bardzo słabej izolacji, b) charakterystyka $R_{60} = f(U)$ stojanów o dość dobrej izolacji [71]

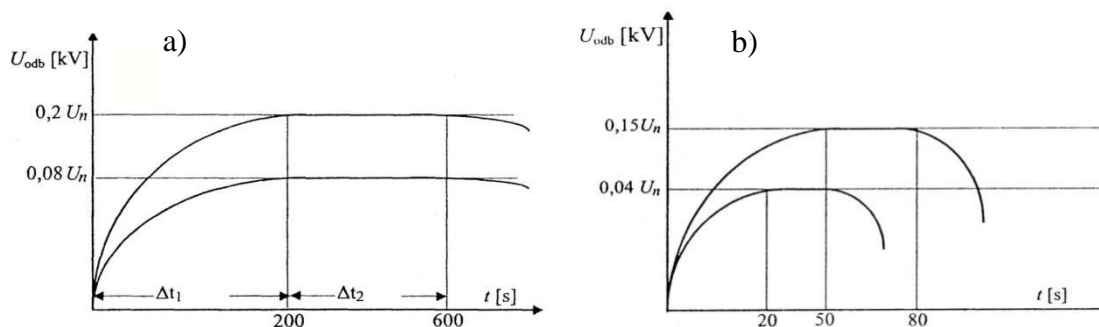
- Pomiar przebiegu czasowego prądu upływu i_p po skokowym załączeniu, na całkowicie rozładowany układ izolacyjny, napięcia stałego o wartości U_N (rys. 3.11.) [21,22,23,37,71,79].



Rys. 3.11. Przebieg czasowy prądu upływu $i_p(t)$ układu izolacyjnego po skokowym załączeniu napięcia stałego: 1- dla izolacji nowszej, 2- dla izolacji całkowicie zużytej [37, 21]

- Naładowanie układu izolacyjnego do napięcia znamionowego aż do stanu ustalonego, a następnie odłączenie napięcia zasilającego i zwarcie układu izolacyjnego na czas t_z , po czym rozwarcie układu izolacyjnego i pomiar

charakterystyki obudowy napięcia na układzie izolacyjnym $U_{od}(t)$ [21,22,23,37,71,79].



Rys. 3.12. Uogólniony obszar przebiegów $U_{od}(t)$: a) dla izolacji dobrej, b) dla izolacji zawilgoconej i zabrudzonej [71]

gdzie:

Δt_1 – czas odbudowy napięcia,

Δt_2 – czas utrzymywania się napięcia.

- Pomiar współczynnika absorpcji układu izolacyjnego i_{p15}/i_{p60} , R_{60}/R_{15} [21,22,23,37,71,79].
- Poziom wahań prądu upływu I_{p60max} i I_{p60min} liczony po czasie $t > 60$ s od chwili załączenia napięcia [21,22,23,37,71,79].

Dzięki wyznaczonym charakterystykom i parametrom można określić stan techniczny izolacji. Warunki kryterialne są jednoznaczne w interpretacji i zostały zebrane w poniższej tabeli [21,22,23,37,71,79].

Tabela 3.4. Kryteria oceny stanu technicznego izolacji.

Lp	Parametr układu izolacyjnego		Ocena stanu technicznego izolacji					izolacja zawilgo- cona
			5	4	3	2	1	
1	Napięcie przebicia U_p/U_N		>3	>3	>2	~1,5	~1	~1
2	Rezystancja	przy $U_N = 6\text{kV}$	>50	>20	>10	>10	>10	<3
	R_{60N}/U_N [kΩ/V]	przy $U_N < 1\text{kV}$	>50	>20	>10	>3	>1	<1
3a	Czas zwarcia dla t_z [s]	dla $U_N = 6\text{kV}$	30	30	30	1	1	0
		dla $U_N < 6\text{kV}$	10	10	10	1	0	0
3b	Maksymalna wartość odbudowanego napięcia $U_{od\ max}/U_o$		>0,1	≥0,1	≥0,05	≥0,01	0	0
	Czas odbudowy napięcia t_{od} [s]	dla $U_N = 6\text{kV}$	>240	>120	>30	~10	0	0
		dla $U_N < 1\text{kV}$	>120	>60	>15	~5	0	0
4	Wahania prądu upływu przy U_N $\frac{i_{p60\ max} - i_{p60\ min}}{i_{p60\ sr}}$		<0,5	<1	>1	>1	>2	0
5	i_{p15}/i_{p60}	$U_N = 6\text{kV}$	>1,5	>1,2	>1	1	1	1
		$U_N < 1\text{kV}$	>1,3	>1,1	>1	1	1	1

Podanym w tabeli ocenom stanu technicznego izolacji przypisana jest ocena punktowa stopnia zużycia. Przedstawia się ona następująco [21,22,23,37,71,79]:

- 5 - izolacja bardzo dobra (nowa),
- 4 – izolacja dobra,
- 3 – izolacja dostateczna,
- 2 – izolacja mniej niż dostateczna,
- 1 – izolacja niedostateczna,
- 0 – trwałe uszkodzenie izolacji.

Spośród wszystkich parametrów otrzymanych podczas pomiaru napięciem stałym to napięcie przebicia, prąd upływu oraz czas odbudowy są wielkościami najbardziej przydatnymi do oceny stanu izolacji. Na podstawie badań przeprowadzanych w Elektrowni

Opole zaobserwowano korelacje między tymi wielkościami, stąd do oceny stanu izolacji można użyć współczynnika diagnostycznego $DF\text{Ł}$ [42,71]:

$$DF\text{Ł} = \frac{I_{PU} \cdot U_n}{t_{od} \frac{U_p}{U_n}} \quad (3.9.)$$

gdzie:

I_{PU} - ustabilizowany prąd upływu układu izolacyjnego,

U_N – napięcie znamionowe,

t_{OD} – czas odbudowy napięcia,

U_P – napięcie przebicia.

W przypadku gdy napięcie przebicia jest niewyznaczalne (bo ekstrapolacja charakterystyki $R_{60}=f(u)$ nie daje punktu przecięcia z osią współrzędnej U) proponuje się przyjąć względne napięcia przebicia równe 3. Ocenę diagnostyczną stanu izolacji przeprowadza się w ten sposób, że wyznaczony $DF\text{Ł}$ porównuje się ze wzorcowym współczynnikiem izolacji $DF\text{Ł}_{WZ}$. Im $DF\text{Ł}$ ma mniejszą wartość tym stan izolacji jest lepszy. Maszyna o dobrym stanie izolacji winna spełniać warunek [71]:

$$DF\text{Ł} < DF\text{Ł}_{WZ} \quad (3.10.)$$

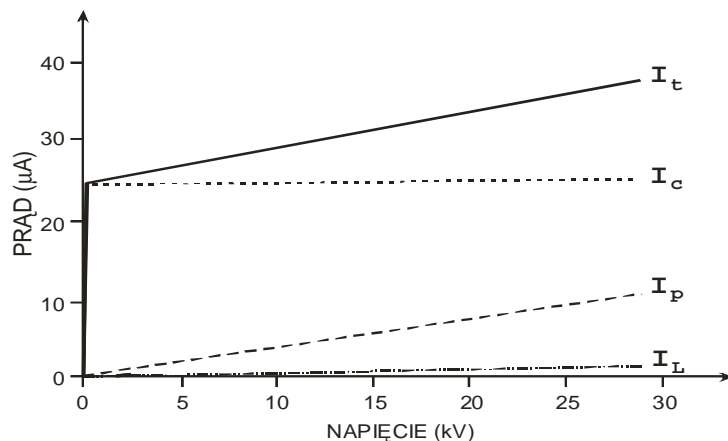
Wzorcowy wskaźnik izolacji proponuje się wyznaczać na podstawie pomiarów nowej wysuszonej maszyny, przed jej oddaniem do eksploatacji. Granice wartości liczbowych współczynnika „Ł” są różne dla różnych rodzajów maszyn elektrycznych i różnych poziomów napięć pracy. W przypadku izolacji generatorów zakres liczbowy współczynnika „Ł” podany jest w tabeli 3.5.

Tabela 3.5. Kryteria oceny stanu izolacji na podstawie współczynnika „Ł” [42]

Ocena stanu izolacji	Turbogeneratory na napięcie 22kV	Silniki na napięcie 6kV
Dobry	100 – 1000	0,1 – 10
Dostateczny	1001 - 10000	10,1 – 70
Dopuszczający	10001 - 50000	71 – 200

3.4. Metoda rampy wysokonapięciowej

Metoda rampy wysokonapięciowej jest szeroko opisana w standardzie IEEE 95-2002 „Wykonywanie testów izolacji wysokonapięciowych maszyn prądu przemiennego napięciem stałym”. W metodzie rampy wysokonapięciowej napięcie wzrasta liniowo od zera aż do napięcia próby ze stałą stromością narastania, zwykle 1 kV/min. Osiągnięte napięcie próby zawiera się w granicach $1,25 \div 1,5 U_n$. Dzięki liniowo narastającemu napięciu, metoda pozwala praktycznie linearyzować prądy polaryzacji i ładowania [44, 53]. Przy napięciu liniowo narastającym prąd ładowania posiada wartość stałą zależną od pojemności badanego obiektu i stromości narastania napięcia, prąd polaryzacji narasta z kolei liniowo i przyjmuje niewielkie wartości. Prąd upływu w idealnym układzie izolacyjnym ma charakter rezystancyjny i zależy liniowo od napięcia.

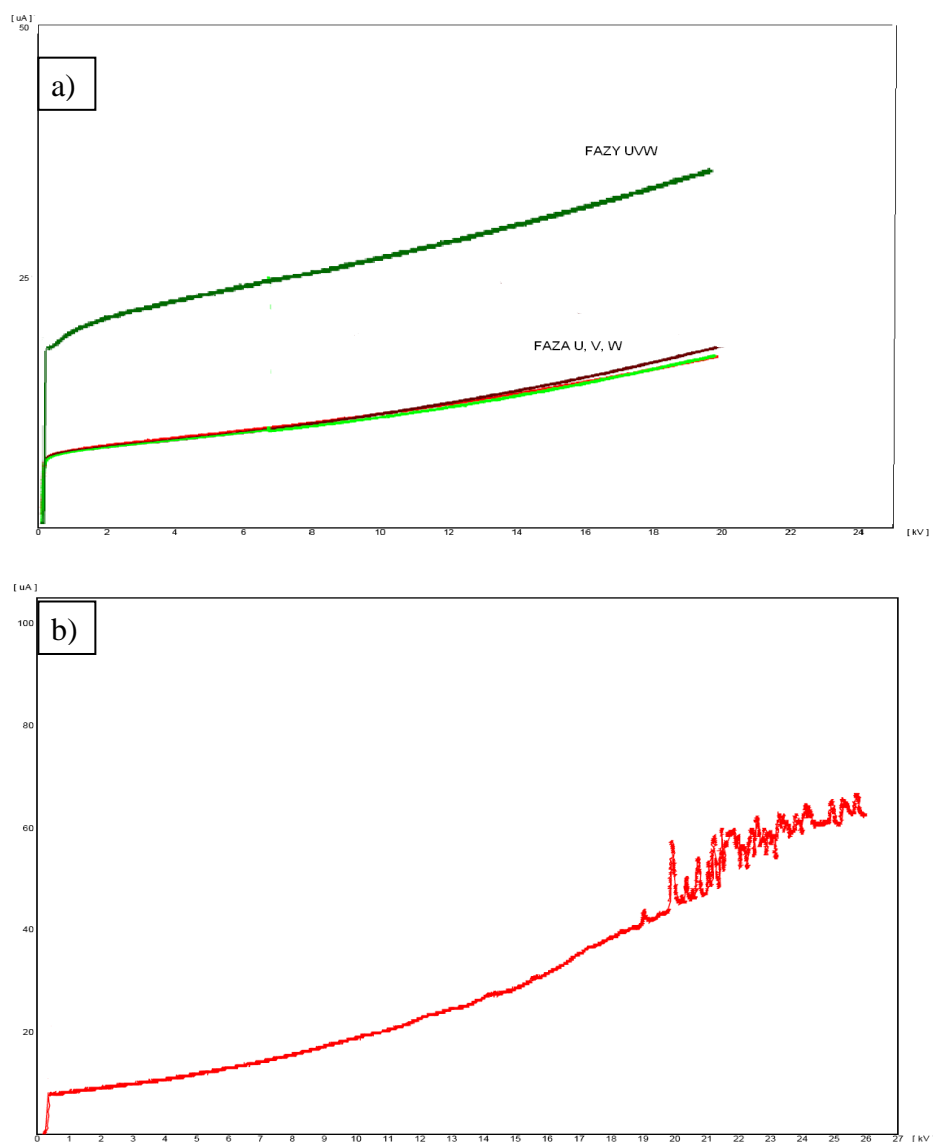


Rys. 3.13. Składowe prądu przy napięciu liniowo narastającym [44]

Liniowy rozkład prądów polaryzacji i ładowania daje możliwość skupienia się na prądzie upływu w całym zakresie badanego napięcia. Anomalie w rozkładzie prądu upływu świadczą o występowaniu defektu izolacji. Przykłady defektów zostały szeroko opisane w standardzie [48], oraz zostały potwierdzone w praktyce [53,71]. Typowe typy defektów rozpoznawanych dzięki metodzie rampy wysokonapięciowej to:

- rozwarstwienia izolacji,
- spękania izolacji,
- zawilgocenie izolacji,
- zanieczyszczenie powierzchniowe,
- uszkodzenie zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej pręta.

Dla układu izolacyjnego w dobrej kondycji obserwujemy liniowy rozkład prądu w funkcji narastającego napięcia zasilania, co wykazano podczas badania turbogeneratorsa THG120 (rys 3.14.a). W przypadku uszkodzenia zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej – co stwierdzono wizualnie oraz przy pomocy innych testów, po przekroczeniu pewnego progu napięcia dochodzi do wyładowań niezupełnych w miejscach uszkodzenia co skutkuje wahaniami prądu jak na rys. 3.14. b) [53].



Rys. 3.14. Wykresy prądów upływu. a) badanie 3 faz stojana turbogeneratorsa TGH-120 w dobrej kondycji, b) pomiar uzwojenia z uszkodzoną zewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową

3.5. Wysokonapięciowa metoda impulsowa – test Bakera

Wysokonapięciowa metoda impulsowa w ostatnich latach stała się jedną ze skuteczniejszych metod oceny stanu izolacji zwojowej maszyn [43,54,56,60]. Metoda ta została opracowana w firmie Baker w USA w połowie XX wieku i często nazywana jest testem Bakera. Metoda jest wykorzystywana do oceny izolacji zwojowej uzwojeń maszyn elektrycznych wykonanych jako cewkowe jak również do badania kompletnego stojana maszyny z uzwojeniem cewkowym. Komputerowa analiza przebiegów czasowych w szybki i łatwy sposób pozwala określić kondycję izolacji zwojowej. Metoda impulsowa polega na podaniu na początek uzwojenia wysokonapięciowego impulsu o dużej stromości narastania podczas gdy koniec uzwojenia zostaje uziemiony. Źródłem energii testera jest wysokonapięciowy kondensator ładowany poprzez źródło prądu stałego. Zastosowanie szybkich tranzystorów IGBT pozwala uzyskać czasy narastania impulsu rzędu 0,2μs. Energia udaru definiowana jest zależnością:

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (3.11)$$

gdzie:

C – pojemność kondensatora,

U – napięcie próby.

Krótki czas narastania oraz duża energia udaru prowadzą do powstania dużego gradientu napięcia pomiędzy sąsiednimi zwojami. Aby można było mówić o diagnostyce izolacji zwojowej napięcie próby musi być odpowiednio wysokie, żeby w osłabionych miejscach izolacji zwojowej mogło dojść do przeskoku napięcia. Wysokość próby udarowej normalizują normy IEEE 522-2004 lub IEC 60034-18-3, gdzie odpowiednio napięcia próby dla nowych uzwojeń maszyn wysokonapięciowych z cewkami wzornikowymi wynoszą: $U_T = 2,86Un$ i $U_T = 0,65(4Un + 5kV)$. Dla maszyn będących w użyciu standard IEEE przewiduje napięcie obniżone do wartości 75% .

W odpowiedzi na impuls napięcia powstaje fala odbita tłumiona o częstotliwości:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.11)$$

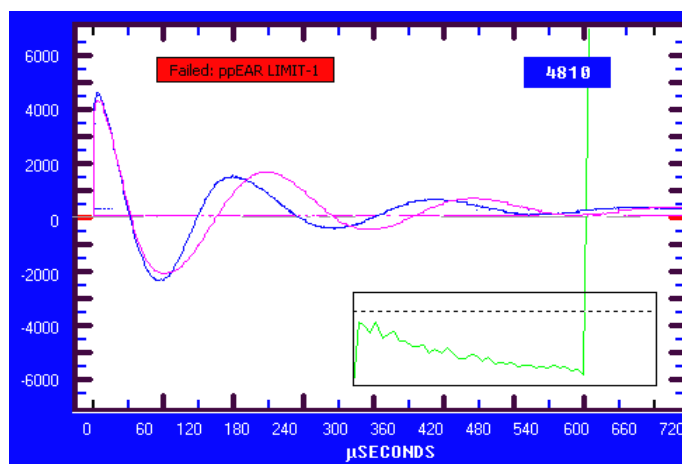
gdzie:

L, C – zastępcza indukcyjność oraz pojemność badanego obwodu.

Zwarcie zwojowe powoduje zmianę - zmniejszenie indukcyjności a tym samym wzrost częstotliwości napięcia fali odbitej. Diagnostyka izolacji zwojowej wynika z porównania otrzymanego przebiegu fali odbitej w odniesieniu do [43,54,56,60]:

- przebiegu wzorcowego otrzymanego podczas wcześniejszego badania, bądź z maszyny tego samego typu,
- przebiegu sąsiedniej fazy w przypadku uzwojeń symetrycznych,
- przebiegu otrzymanego przy niższym napięciu.

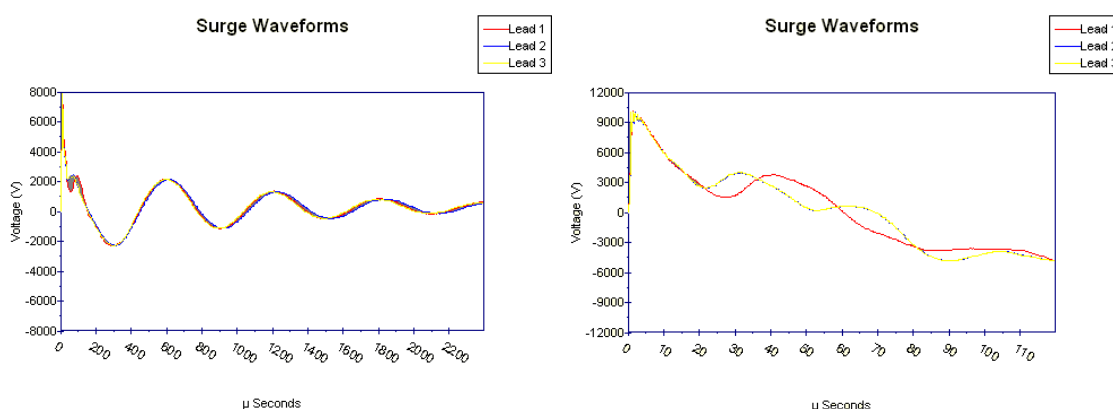
Amplituda impulsów testera podnoszona jest płynnie od zera do napięcia próby. W odpowiedzi na każdy z impulsów generowany jest przebieg oscylacyjny. Ciągłej analizie poddawane są dwa kolejne impulsy. Nagła zmiana częstotliwości drgań własnych bądź kształtu fali odbitej świadczy o przeskoku napięcia na skutek osłabienia izolacji zwojowej. Niemetaliczne zwarcie zwojowe objawia się podczas próby „falowaniem” przebiegu. Zjawisko to przedstawiono na rys. 3.15. podczas próby przebicia izolacji zwojowej silnika SF80-6a [54,56,60].



Rys. 3.15 Przebieg fali odbitej dla uzwojenia z osłabioną izolacją zwojową

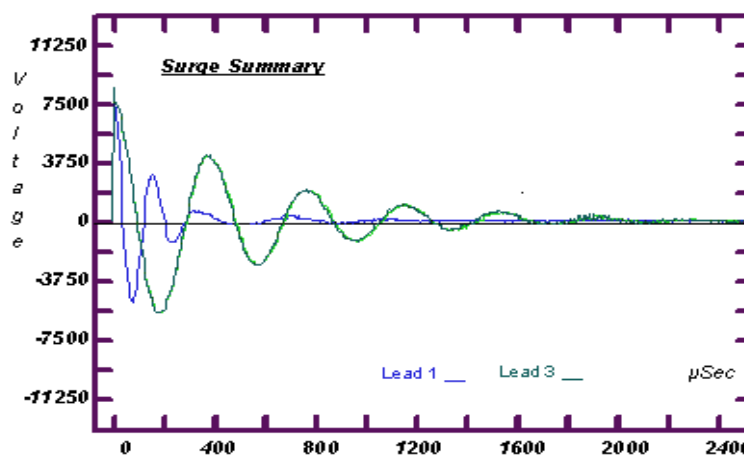
W silnikach wysokonapięciowych dużej mocy, gdzie połączenia fazowe nie są rozłożone symetrycznie często zdarza się odkształcenie przebiegów. Podczas wysokich prób udarowych ($U_T > 10\text{kV}$) można zaobserwować również zjawisko magnetostrykcji rdzenia objawiające się cyklicznymi charakterystycznymi stukami rdzenia. Przy pogorszonej zewnętrznej powłoce przeciwjarzeniowej można dostrzec przeskoki iskry pomiędzy rdzeniem a powłoką przewodzącą pręta. Autor wykonał szereg testów izolacji

zwojowej wysokonapięciowych stojanów silników i stwierdza, że komputerowa interpretacja wyników pomiarów na skutek powyżej opisanych zjawisk niejednokrotnie może być błędna. Pomiary silnika MAEB 1000P na napięcie $U=6000V$ mogą wskazywać na uszkodzenie izolacji zwojowej fazy1 (rys. 3.16 a,b). Widoczne odkształcenia czoła przebiegu spowodowane są jednak wcześniej omawianymi zjawiskami. Na rys. 3.16. a) można zaobserwować większą częstotliwość drgań własnych przebiegu fazy 2, co spowodowane jest brakiem jednej cewki tej fazy usuniętej podczas naprawy poawaryjnej [54,56,60].



Rys. 3.16. Wyniki pomiaru silnika MAEB 1000P na napięcie $u=6kV$: a) przebiegi oscylacyjne trzech faz, b) czoła przebiegów podczas

Występowanie metalicznego zwarcia zwojowego powoduje znacznie zmniejszenie wartości indukcyjności własnej badanej cewki, co powoduje zwiększenie częstotliwości drgań własnych. Przebiegi poszczególnych faz lub cewek mają różne częstotliwości drgań własnych, jednak niezmiennie w całym przedziale badanego napięcia. Metaliczne zwarcie zwojowe silnika SADYdm $P=740kW$ $U=6kV$ obrazuje poniższy rysunek [54,56,60].



Rys. 3.17. Przebiegi oscylacyjne podczas badania silnika SADYdm $P=740kW$ $U=6kV$ z metalicznym zwarcie zwojowym w cewce uzwojenia.

3.6. Metoda spektroskopii niskoczęstotliwościowej

Spektroskopia częstotliwościowa pozwala na klasyfikowanie izolacji pod względem zaawansowania zesterzenia oraz pozwala odróżnić przejściowy stan dotwardzenia i fizycznej relaksacji od procesów istotnego zesterzenia [89]. W metodzie tej ocenę stanu izolacji przeprowadza się w oparciu o niskoczęstotliwościową analizę zjawisk polaryzacyjnych. W analizie jakościowej korzysta się z równania Havriliaka-Negamiiego [89,90]:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \frac{\Delta\varepsilon}{(1+(\omega\tau)^\alpha)^\beta} + \varepsilon_\infty - j\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right)^N \quad (3.12)$$

gdzie:

$\Delta\varepsilon$ – polaryzacja, przyrost przenikalności dielektrycznej,

ω – pulsacja,

τ – czas relaksacji,

σ – konduktywność,

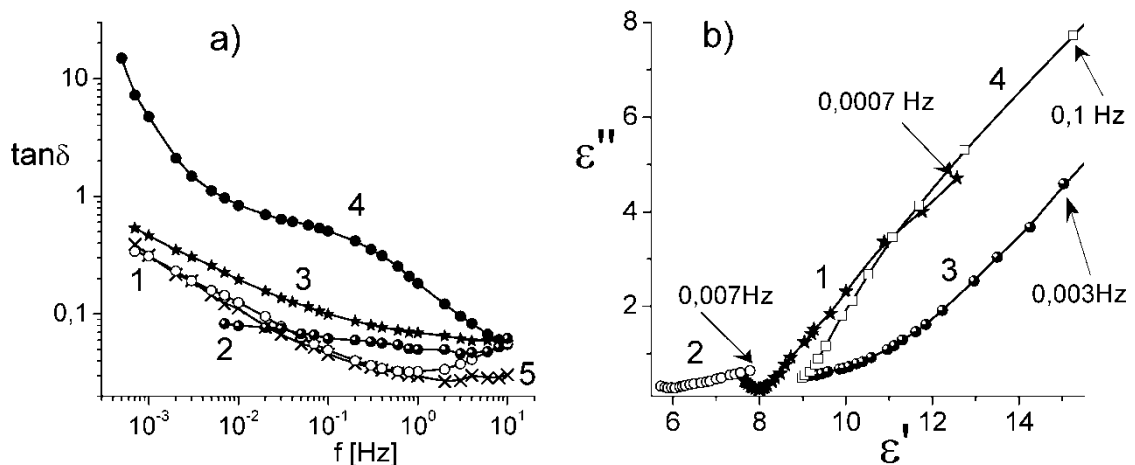
α, β, N – współczynniki,

$\varepsilon^*(\omega), \varepsilon_\infty, \varepsilon_0$ – zespolona, optyczna i statyczna przenikalność dielektryczna,

ε' – składowa rzeczywista zespolonej przenikalności dielektrycznej,

ε'' – składowa urojona zespolonej przenikalności dielektrycznej.

Przy ocenie wyników analizuje się charakterystyki $tg\delta=f(f)$ (rys. 3.18. a) oraz $\varepsilon''=f(\varepsilon')$ (rys. 3.18.b).



Rys. 3.18. Charakterystyki $tg\delta=f(f)$ a) oraz $\varepsilon''=f(\varepsilon')$ b) dla izolacji silników, krzywe 1-4 dotyczą silników różnie eksploatowanych, krzywa 5 to wykres dla nowej cewki uzwojenia stojana [89]

3.7. Pomiar współczynnika strat dielektrycznych oraz pojemności

Układ izolacyjny wysokonapięciowych maszyn elektrycznych należy rozpatrywać jako obiekt pojemnościowy. Jeżeli kondensator próżniowy o pojemności C_0 podłączy się do źródła sinusoidalnego napięcia przemiennego to między okładkami tego kondensatora wytworzy się również sinusoidalne pole elektryczne związane z obecnością ładunku swobodnego a w obwodzie popłynie prąd [70] :

$$i = C_0 \frac{du}{dt} = \omega C_0 U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.13.)$$

$$\omega C_0 U_m = I_m \quad (3.14.)$$

gdzie:

U_m – amplituda napięcia,

$\omega = 2\pi f$ – pulsacja,

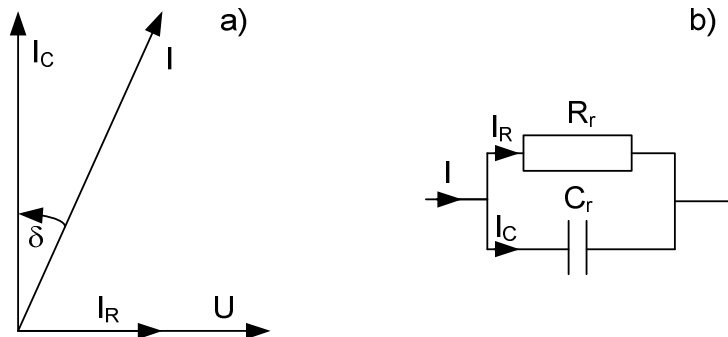
f – częstotliwość,

ε_0 – przenikalność elektryczna próżni,

t – czas.

Jeżeli między okładkami tego kondensatora próżniowego umieści się dielektryk o przenikalności ε_r , to jego pojemność elektryczna wzrośnie ε_r razy. Gdyby dielektryk był idealny, tzn. bezstratny wtedy wzrosłaby tylko amplituda prądu I_m a przesunięcie fazowe wynosiłoby nadal $\pi/2$ i w dielektryku nie byłoby strat energii.

W rzeczywistych dielektrykach zawsze występują pewne straty energii. Prąd i płynący przez ten kondensator będzie przesunięty o $\pi/2 - \delta$ (rys. 3.19. a).



Rys. 3.19. Wykres wskazowy prądów w dielektryku a) oraz schemat zastępczy rzeczywistego kondensatora b)

Kąt δ jest nazywany kątem strat dielektrycznych, a kąt ϕ między prądem I a napięciem U – kątem fazowym. Wykresowi wskazowemu prądów w stratnym kondensatorze odpowiada schemat zastępczy pokazany na rys. 3.19 b). Na schemacie tym C_r jest idealną bezstratną pojemnością zaś R_r – rezystancją odpowiadającą stratom w kondensatorze.

Prąd I jest wielkością zespoloną wyrażoną wzorem

$$\underline{I} = I_R + jI_C = \underline{U} \left(\frac{1}{R_r} + j\omega C_r \right) \quad (3.15)$$

Natomiast gęstość prądu:

$$\underline{J} = J_R + jJ_C = \underline{E} (\gamma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon') \quad (3.16)$$

W powyższych wzorach przyjęto oznaczenia:

j - operator na płaszczyźnie liczb zespolonych,

$G = 1/R_r$ – przewodność materiału,

γ_{ac} – konduktywność dielektryka przy prądzie przemiennym

ε_0 – przenikalność próżni, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m,

$$\underline{\varepsilon}_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (3.17)$$

ε' – składowa czynna względnej zespolonej przenikalności elektrycznej,

ε'' – składowa bierna względnej zespolonej przenikalności elektrycznej.

Dla małych kątów strat δ składowa czynna względnej przenikalności

$$\varepsilon_r = \varepsilon' \quad (3.18)$$

ε_r jest względną przenikalnością elektryczną określoną w polu stałym

Składowa czynna ε' wyraża zdolność do gromadzenia energii przez kondensator w polu elektrycznym, a składowa bierna wyraża zdolność dielektryka do rozpraszania energii zmagazynowanej w polu elektrycznym, czyli do generowania strat.

Stosunek ε'' do ε' wyraża współczynnik strat dielektrycznych:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3.19)$$

Dla materiałów izolacyjnych najczęściej podaje się nie kąt strat δ ale tangens tego kąta. Nazywa się go współczynnikiem strat dielektrycznych i dla zastępczego układu równoległego wyraża wzorem [70]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{1}{\omega R_r C_r} \quad (3.20)$$

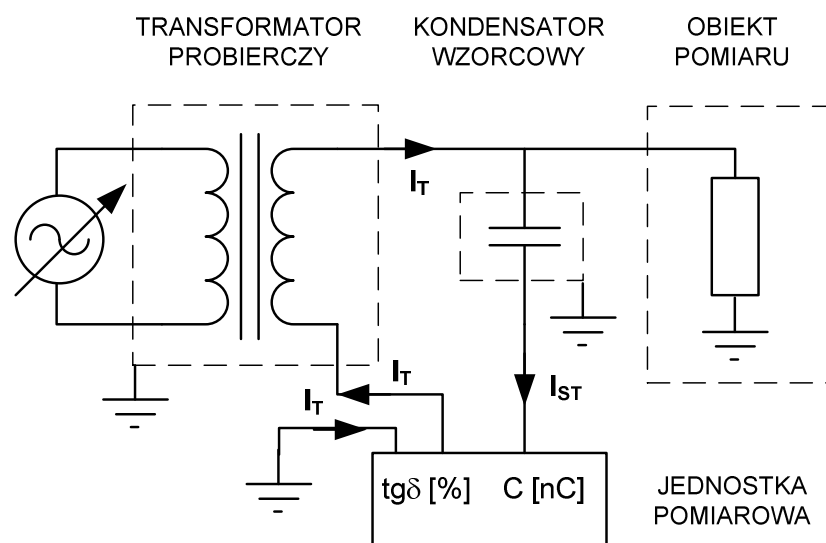
Składową czynną prądu stanowi:

- prąd upływu w izolacji oraz po jej powierzchni,
- prąd polaryzacyjny,
- prąd wysokiej częstotliwości, którego źródłem są wyładowania niezupełne.

Zwiększona wartość składowej czynnej prądu a tym samym podwyższony współczynnik strat dielektrycznych może świadczyć o [25,46,61,62,63,86]:

- zawilgoceniu, zabrudzeniu układu izolacyjnego,
- zdegradowanej izolacji,
- występowaniu wyładowań niezupełnych w układzie izolacyjnym.

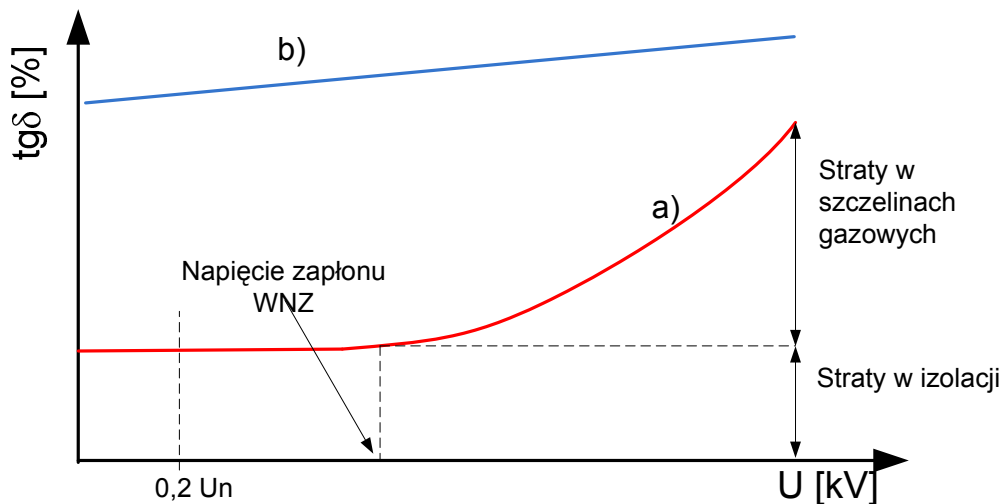
Pomiaru współczynnika strat dielektrycznych oraz pojemności uzwojenia dokonuje się w układzie mostkowym jak przedstawiono na rys. 3.20., gdzie w gałęzi wzorcowej występuje kondensator wzorcowy bezwyładowaniowy o niskiej stratności. Pomiaru prądu w torze pomiarowym dokonuje się najczęściej po stronie niskiego napięcia transformatora probierczego.



Rys. 3.20. Schemat układu pomiarowego do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych obiektów uziemionych

Pomiaru współczynnika strat dielektrycznych dokonuje się od wartości napięcia równej $0,2Un$, gdzie Un – napięcie znamionowe maszyny do wartości napięcia równej lub większej od znamionowego. Wysoki, liniowo zależny współczynnik strat dielektrycznych może świadczyć o zawilgoconej lub zabrudzonej izolacji [25,46,61,62,63,86].

W nowoczesnych układach izolacyjnych stojanów generatorów dużej mocy czoła uzwojenia oraz połączenia poszczególnych grup uzwojenia malowane są lakierem półprzewodzącym, który ma za zadanie zmniejszyć gradient napięcia w strefie wyjścia pręta ze żłobka oraz wyeliminować wyładowania niezupełne na rozdzielach faz uzwojeń. Rozwiązanie to powoduje jednak zwiększenie wartości współczynnika strat dielektrycznych co w niektórych przypadkach może zostać niewłaściwie zinterpretowane. Zakłada się, że przy napięciu równym $0,2U_n$ wyładowania w inkluzjach gazowych jeszcze nie występują. Dlatego też w pomiarze tym posługuje się nie tylko wartością $tg\delta$ ale również jego przyrostem w funkcji badanego napięcia rys. 3.21 [25,46,61,62,63,86].



Rys. 3.21 Interpretacja graficzna współczynnika strat dielektrycznych dla zdegradowanej izolacji a) oraz dla izolacji zawilgoconej / zanieczyszczonej [25,46,61,62,63,86]

4. Pomiar wyładowań niezupełnych

Wyładowaniom niezupełnym towarzyszą [8,9,16,17,18,31,32,58,59,65]:

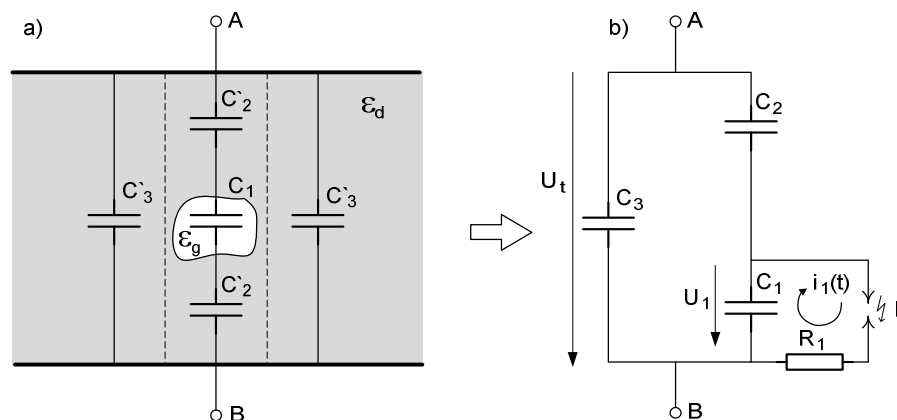
- impulsy prądowe i związana z tym emisja fal elektromagnetycznych,
- przemiany chemiczne,
- udarowe odkształcenia sprężyste oraz związana z tym emisja fal akustycznych,
- emisja promieniowania świetlnego,
- lokalny wzrost temperatury w obszarze wnz.

Diagnostyka uzwojeń wysokonapięciowych maszyn elektrycznych metodą wnz opiera się w większości przypadków na pomiarze impulsów prądowych wysokiej częstotliwości

[31,35,55,57,58,69]. Impulsy te mogą być mierzone pośrednio lub bezpośrednio przy pomocy czujników pojemnościowych czy też indukcyjnych. Czujniki do pomiaru wnz oraz układy pomiarowe opisane zostaną w szerszym zakresie w rozdziale 4.3. Przed pomiarem wnz off-line dokonywana jest bezpośrednia kalibracja ładunkiem wzorcowym pochodzącym z kalibratora co pozwala uzyskać dużą powtarzalność pomiaru [45,57,69]. Impuls kalibracyjny o parametrach opisanych normami oraz standardami [45,73] wstrzykiwany jest na obiekt pomiaru w miejscu podłączenia przewodu pomiarowego i symuluje przesunięcie ładunku pozornego które występuje podczas rzeczywistego wyładowania w układzie izolacyjnym. W warunkach laboratoryjnych wnz w prętach stojana generatora można lokalizować i mierzyć akustycznymi analizatorami wnz. Pomiar tą metodą może być jednak przeprowadzony wyłącznie w uziemionej części prostej pręta generatora, z zachowaniem bezpiecznych odległości od wysokiego napięcia. Do obserwacji wyładowań ślizgowych oraz wyładowań koronowych w częściach czołowych uzwojeń wykorzystywane są kamery do obserwacji wnz [69].

4.1. Schemat zastępczy układu izolacyjnego z wtrąciną gazową

Schemat zastępczy układu izolacyjnego z defektem typu kawerna można zobrazować jak na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Schemat zastępczy układu izolacyjnego z defektem typu kawerna

W skład schematu zastępczego wchodzi:

C_1 – przedstawia pojemność kawerny w materiale izolacyjnym,

C_2 – pojemności odnoszące się do tych linii sił pola, które wychodząc z elektrod wnikają w przestrzeń kawerny,

C_2 – pojemność zastępcza, szeregowe połączenie pojemności C_2' ,
 C_3' , C_3 - pojemności w dielektryku bez defektów,
 R – zastępcza rezystancja kanału wyładowania w jego źródle,
 ε_d – przenikalność elektryczna dielektryka stałego,
 ε_g – przenikalność elektryczna gazu zawartego w kawernie,
 F – iskiernik.

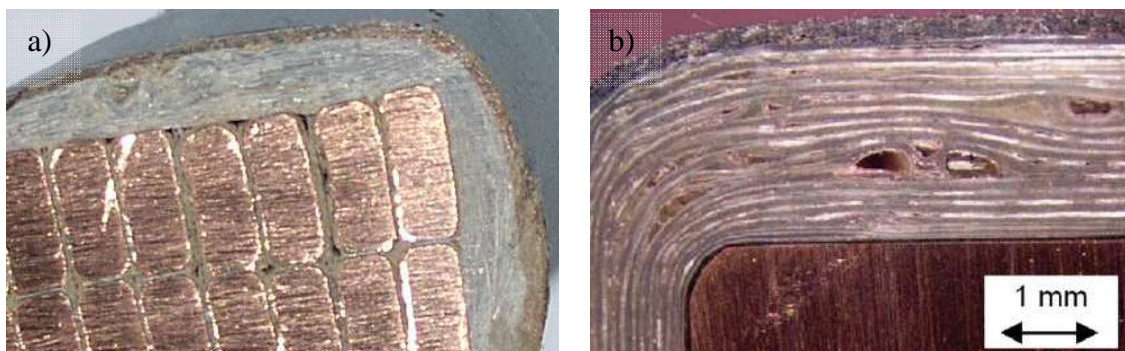
Pojemność kawerny jest na ogół znacznie mniejsza od pojemności badanego dielektryka i wielokrotnie mniejsza od pojemności szeregowej [31]. Zatem słuszna jest nierówność:

$$C_3 \gg C_1 \gg C_2 \quad (4.1)$$

Ponieważ:

$$\varepsilon_d > \varepsilon_g \quad (4.2)$$

Natężenie pola w inkluzji gazowej E_C jest większe od natężenia pola w otaczającym je dielektryku. Jeżeli wartość natężenia w kawernie, zgodnie z prawem Paschena, przekroczy wartość krytyczną dojdzie do zapłonu wyładowania niezupełnego [31]. Wartość napięcia zapłonu U_Z , wnz zależy od grubości inkluzji gazowej oraz ciśnienia w kawernie. Wymiary inkluzji gazowych w izolacji twardej wysokonapięciowych maszyn wirujących są rzędu mikrometrów. Przekrój uzwojenia z widocznymi rozwarstwieniami izolacji obrazuje rys. 3.2.



Rys. 4.2. Rozwarstwienia izolacji w obszarze przewodów elementarnych a) oraz w izolacji głównej b)

Załamanie napięcia ΔU_1 na kawernie, spowodowane jest prądem rozładowania $i_1(t)$ i prowadzi do zmiany ładunku Δq_1 .

$$\Delta q_1 = \Delta U_1 \cdot C_1 \quad (4.3)$$

Prąd rozładowania $i_1(t)$ jest prądem lokalnym którego nie można zmierzyć. Rozładowanie kondensatora C_1 wywołuje gwałtowną zmianę ładunków kondensatorów C_2 oraz C_3 . Czas przepływu ładunków w źródle wyładowań wynosi $10^{-7} - 10^{-10}$ s. Ładunek rzeczywisty neutralizowany w źródle wyładowań wynosi:

$$q_r = \left(C_3 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right) \cdot \Delta U_1 \quad (4.4)$$

Ładunek który przepłynął z pojemności C_3 do pojemności C_2 i spowodował spadek napięcia ΔU_t na pojemności C_3 zwany jest ładunkiem pozornym wnz i wynosi:

$$q \cong C_3 \cdot \Delta U_t \quad (4.5)$$

Związek pomiędzy ładunkiem rzeczywistym oraz pozornym:

$$\frac{q_r}{q} \cong 1 + \frac{C_1}{C_2} \quad (4.6)$$

wskazuje na mniejszą wartość mierzonego ładunku pozornego od rzeczywistego ładunku w źródle wnz. Zależność pomiędzy spadkiem napięcia w miejscu wystąpienia wnz a spadkiem mierzonym:

$$\frac{\Delta U_1}{\Delta U_t} \cong \frac{C_1}{C_2} \quad (4.7)$$

wskazuje na małą wartość spadku napięcia na obiekcie. Z praktyki wynika, że wartość spadku napięcia ΔU_t zawiera się w zakresie 10^{-3} V ÷ 1V, podczas gdy zmiana napięcia jest rzędu kV. Zmiany napięcia ΔU_t nie da się skorelować z wartościami ΔU_1 i q_r , ponieważ wartości pojemności C_1 i C_2 są w praktyce nie do określenia. Załamanie napięcia ΔU_t jest równoważone przez dopływ mierzalnego prądu $i_1(t)$. Sekwencje impulsów wyładowań nie wykazują żadnych prawidłowości i zmieniają się stochastycznie. W czasie trwania jednego okresu napięcia zasilania może wystąpić jeden lub kilka impulsów wnz zależnie od napięcia probierczego i rodzaju defektu izolacji. Jeżeli w badanym obiekcie znajduje się kilka miejsc z wadami izolacji to można zmierzyć odpowiednio większą ilość impulsów wnz w nanosekundowych odstępach czasu.

4.2. Wielkości oraz parametry opisujące wyładowania niezupełne

Podstawowe wielkości opisujące wyładowania niezupełne zawarte są w normach takich jak PN-EN 60270:2003 i wielkościami tymi są:

- ładunek pozorny q ,
jest to ładunek który doprowadzony nagle (w sposób impulsowy) między zaciski badanego obiektu, zmieniłby skokowo napięcie na tych zaciskach o tę samą wartość co samo wyładowanie.

- częstość powtarzania n
jest to średnia liczba impulsów wyładowań na sekundę mierzona w określonym czasie:

$$n = \frac{N}{T} \quad (4.8)$$

gdzie:

N – całkowita liczba zarejestrowanych impulsów

T – przedział czasu rejestracji (pomiaru)

- średni prąd wyładowań I

$$I = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N |q_i| \quad (4.9)$$

gdzie:

q_i – ładunek pozorny pojedynczego wyładowania.

- moc wyładowań P

$$P = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N |q_i \cdot u_i| \quad (4.10)$$

gdzie:

u_i – wartość chwilowa napięcia przy którym nastąpiło wyładowanie q_i

- wskaźnik wyładowań D

$$D = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N q_i^2 \quad (4.11)$$

- napięcie zapłonu wyładowań U_i

Jest to najniższa wartość skuteczna napięcia przy której obserwuje się wyładowania za pomocą układu probierczego, w którym napięcie przyłożone do obiektu jest stopniowo zwiększane od wartości niższej przy której wyładowania nie występują.

- napięcie gaszenia wyładowań U_e

Jest to najniższa wartość skuteczna napięcia przy której obserwuje się wyładowania za pomocą układu probierczego gdy napięcie przyłożone do obiektu jest stopniowo zmniejszane od wartości wyższej, przy której wyładowania występują.

- kąt fazowy impulsu ϕ_i

$$\phi_i = 360 \cdot \frac{t_i}{T} \quad (4.12)$$

gdzie:

t_i – czas mierzony od narastającego przejścia przez zero napięcia przemiennego do wystąpienia wyładowania.

Cyfrowe przetwarzanie sygnału pozwala na obliczenie ilościowych oraz statystycznych parametrów wnz takich jak [14,75]:

- współczynnik skośności rozkładu dla wnz, (ang. Skewness) [14]:

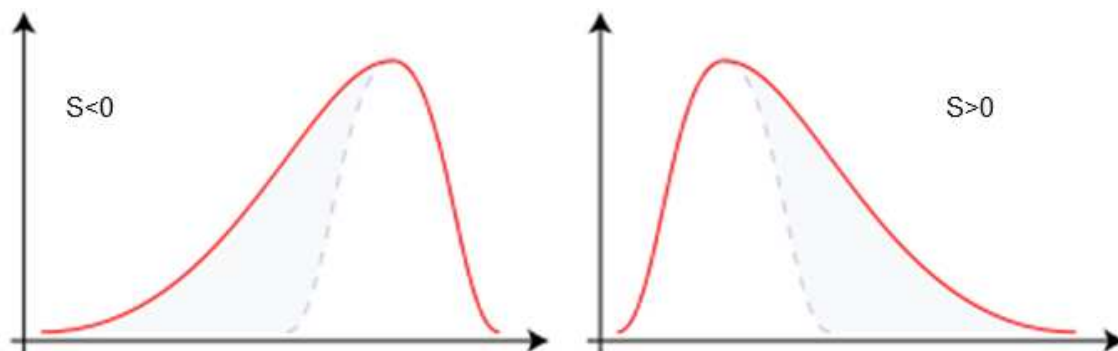
$$s_k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3 \cdot f(x_i)}{\sigma^3 \cdot \sum_{i=1}^n f(x_i)} \quad (4.13)$$

gdzie:

μ – średnia arytmetyczna,

σ – odchylenie standardowe,

Współczynnik skośności $s_k=0$ wskazuje na symetryczny rozkład parametrów funkcji, w przypadku asymetrii rozkładu współczynnik przybiera wartości dodatnie bądź ujemne zgodnie z graficzną interpretacją jak na rys. 4.3.



rys. 4.3. Graficzna interpretacja współczynnika skrośności [14]

- współczynnik skupienia rozkładu - Kurtoza (ang. Kurtosis) [14]:

$$K_u = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4 \cdot f(x_i)}{\sigma^4 \cdot \sum_{i=1}^n f(x_i)} - 3.0 \quad (4.14)$$

Kurtoza opisuje ostrość rozkładu gęstości funkcji w stosunku do rozkładu normalnego. Wartość zerowa odpowiada rozkładowi normalnemu funkcji, $K_u > 0$ wskazuje na ostry rozkład funkcji, natomiast $K_u < 0$ na płaski rozkład.

- Współczynnik korelacji wzajemnej cc [14]

$$cc = \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum \frac{y_i}{n}}{\sqrt{\left[\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \right] \cdot \left[\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \right]}} \quad (4.15)$$

x – wartość zmiennej w kolejnym oknie rozkładu fazowego dodatniego półokresu napięcia,

y – wartość zmiennej w kolejnym oknie rozkładu fazowego ujemnego półokresu napięcia odpowiadającego oknu x ,

n – liczba okien fazowych w półokresie.

Współczynnik korelacji wzajemnej służy do oceny różnicy kształtu rozkładu ładunku lub liczby wyładowań w dodatniej i ujemnej połowie cyklu napięciowego.

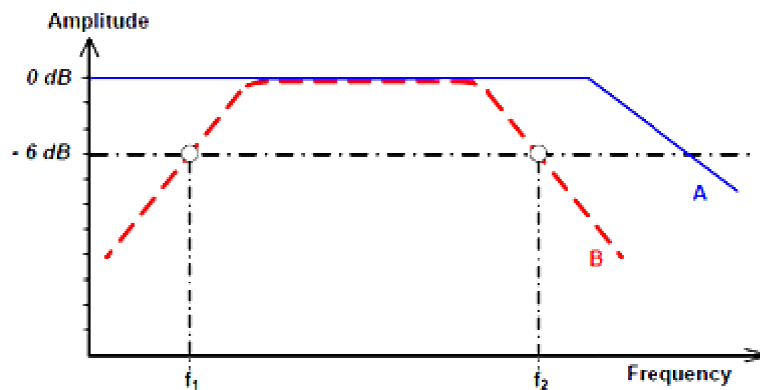
4.3. Aparatura oraz układy pomiarowe wyładowań niezupełnych metodami elektrycznymi

W diagnostyce generatorów dużej mocy oraz prętów stojana generatora powszechnie wykorzystywane są szerokopasmowe analizatory wnz o paśmie częstotliwości $30 \div 500\text{kHz}$ [78,69,45]. Pasma częstotliwości określone jest normą [78] a zakres został dobrany tak aby zminimalizować liczbę zakłóceń w stosunku do sygnału pomiarowego. Zgodnie z normą [78] parametry filtrów analizatora szerokopasmowego wynoszą:

dolna częstotliwość graniczna $f_1 = 30\text{kHz} - 100\text{kHz}$,

górną częstotliwość graniczną $f_2 < 500\text{kHz}$,

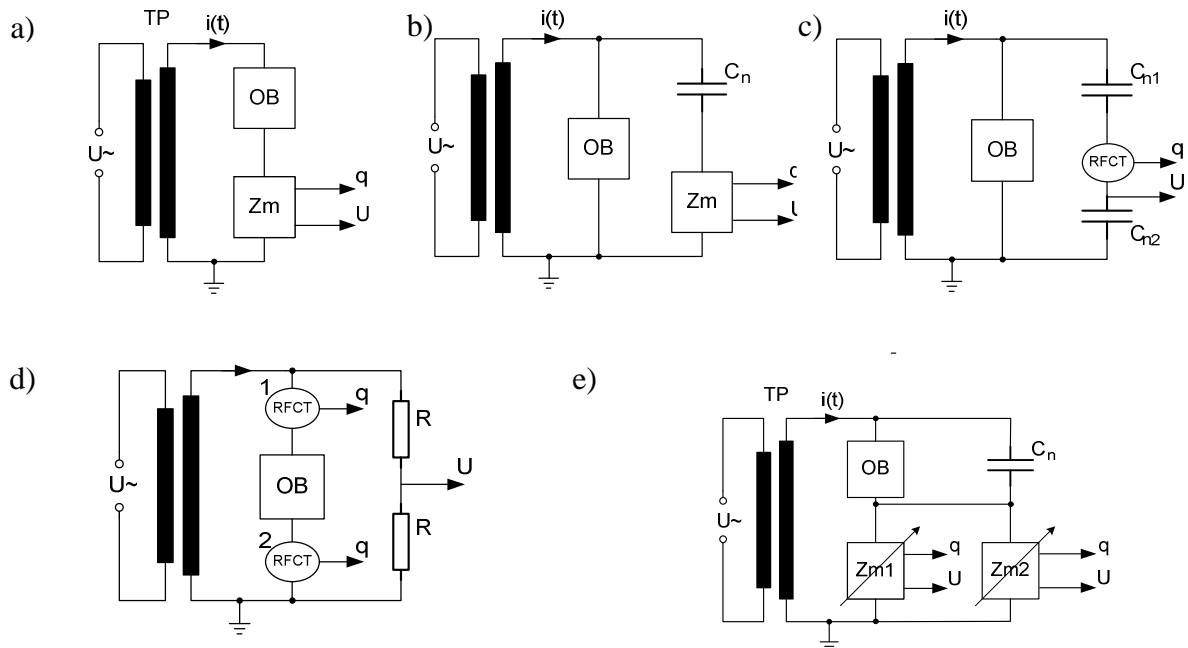
szerokość pasma $100\text{kHz} < \Delta f < 400\text{kHz}$.



Rys. 4.4. Pasma częstotliwości impulsów wnz - A, oraz charakterystyka szerokopasmowych analizatorów wnz – B [69]

Zaletą układów szerokopasmowych jest możliwość rozpoznawania polaryzacji impulsu co ma szczególne znaczenie w klasyfikacji defektów wnz [73,97]. Szerokopasmowe testery posiadają wejście / wejścia pomiarowe oraz napięciowe synchronizujące co pozwala na analizę amplitudowo – fazową wyładowań. Impulsy wnz mogą być bezpośrednio doprowadzone do jednostki pomiarowej poprzez impedancję pomiarową rys. 4.5.a) lub przekładnik prądowy wysokiej częstotliwości rys. 4.5.c) zainstalowany w gałęzi pomiarowej. Takie rozwiązanie, zwłaszcza w pierwszym przypadku, może doprowadzić do uszkodzenia sprzętu pomiarowego w przypadku przebiecia obiektu badanego. Najczęściej wysokoczęstotliwościowe impulsy są przekazywane pośrednio z gałęzi pomiarowej, którą jest kondensator wzorowy rys. 3.4b,c). Wszystkie opisane powyżej układy pomiarowe są czułe na zakłócenia.

Problem ten można wyeliminować stosując układ mostkowy rys 3.4. e). Ze względu na trudność w zrównoważeniu gałęzi mostka, która polega na zmianie parametrów impedancji pomiarowych, układ ten nie jest wykorzystywany w badaniach przemysłowych. Ponadto niewłaściwy dobór parametrów impedancji sprawia, że stała zanikania impulsów będzie zbyt duża aby analizator mógł je bezbłędnie scałkować.



Rys. 4.5. Układy pomiarowe wnz: a) szeregowy, b) równoległy, c) równoległy z przekładnikiem RFCT, d) szeregowy z przekładnikiem RFCT, e) mostkowy
 TP – transformator probierczy, OB – obiekt badań, Zm – impedancja pomiarowa, C – pojemność wzorcowa, RFCT – przekładnik prądowy wysokich częstotliwości

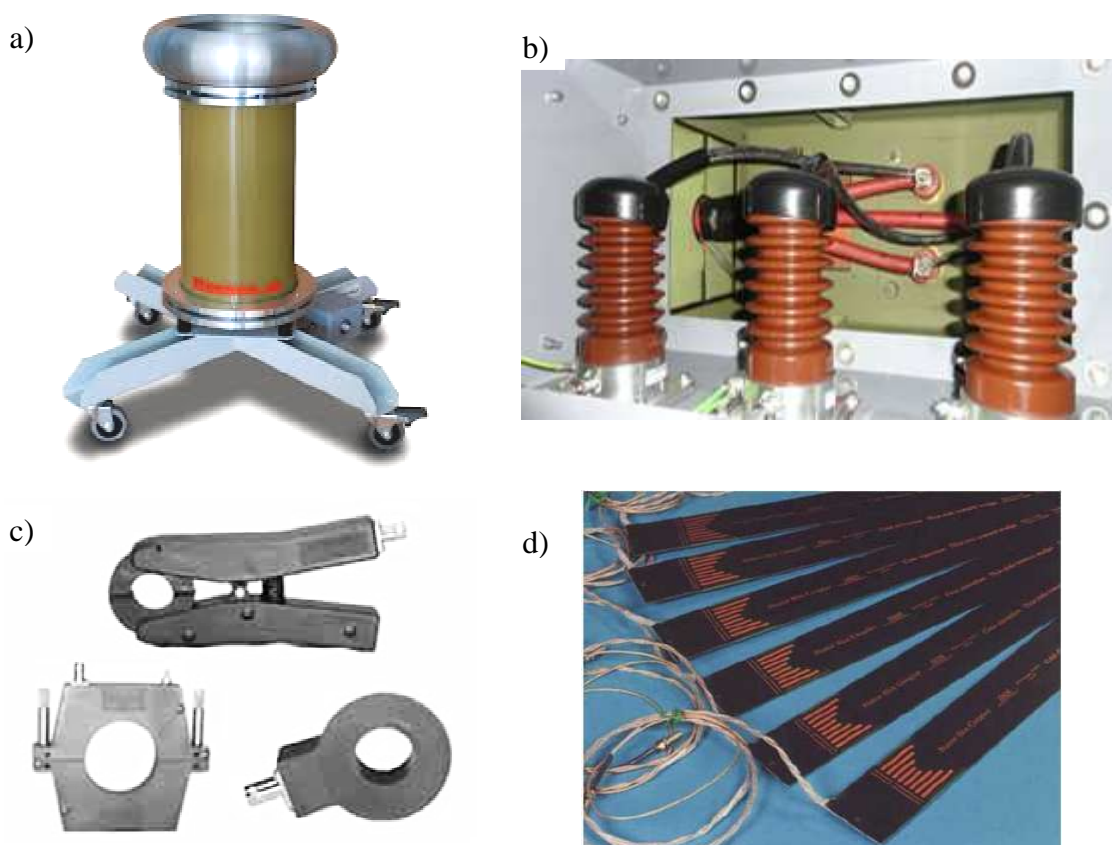
Impedancja pomiarowa wykonywana jest zwykle jako analogowy filtr górnoprzepustowy, dodatkowo pełni też rolę dzielnika napięcia co umożliwia analizę amplitudowo fazową impulsów wnz.

Do pomiarów wnz metodami elektrycznymi można wykorzystywać cztery rodzaje czujników [40,74, 83]:

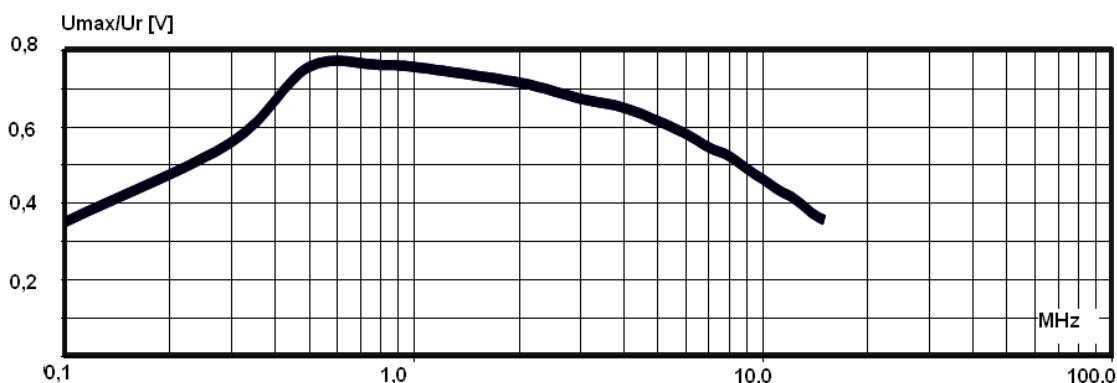
- pojemnościowe,
- przekładniki prądowe w.cz.,
- cewki Rogowskiego,
- anteny.

W pomiarach zarówno on-line jak i off-line najpowszechniejszą grupę stanowią czujniki pojemnościowe czyli kondensatory sprzęgające (rys. 4.6. a,b) podłączane bezpośrednio do wysokonapięciowego zacisku badanego obiektu. Kondensator bardzo dobrze przenosi wysoko częstotliwościowe impulsy generowane przez wnz. Kondensator musi mieć możliwie małą indukcyjność aby poprawnie przenosić impulsy wnz, ponadto w całym zakresie napięcia nie może wykazywać wyładowań niezupełnych. Do zalet tych czujników można zaliczyć liniową charakterystykę częstotliwościową w zakresie pomiaru wnz jak i łatwość podłączenia do układu pomiarowego w pomiarach off-line. Główną wadą tych czujników jest ich wysoka cena.

Przekładniki prądowe wysokich częstotliwości RFCT (z ang. *Radio Frequency Current Transformer*) wykonane są najczęściej jako przekładniki z dzielonym rdzeniem ferrytowym. Dzielony rdzeń ułatwia montaż czujnika na przewodzie. Na rdzeniu nawinięta jest niewielka ilość zwoi (rys. 4.6. c). Zaletą czujników RFCT jest ich pasmo przenoszenia odpowiadające pasmu wnz [59, 58]



Rys. 4.6. Czujniki do pomiaru wnz: a) kondensator do pomiarów off-line, b) kondensatory do pomiarów on-line, c) przekładniki prądowe wysokich częstotliwości , d) anteny pomiarowe



Rys. 4.7. Charakterystyka amplitudowo częstotliwościowa czujnika RFCT-4

Typowe pasmo przenoszenia czujników zawiera się z zakresie 0,1 ÷ 15MHz. W zakresie częstotliwości pomiarów rekomendowanych do szerokopasmowych analizatorów wnz [73] przekładniki RFCT posiadają niemalże liniową charakterystykę (rys. 4.7.). Przekładnik musi zostać zainstalowany jak najbliżej źródła wnz – na wyprowadzeniu maszyny od strony wysokiego bądź niskiego napięcia lub też podczas pomiarów laboratoryjnych na przewodzie uziemiającym badany obiekt. Typowe napięcie pracy czujników RFCT to 1000V AC; zainstalowanie czujnika po stronie wyprowadzeń mocy generatora jest z technicznego punktu widzenia niemożliwe. Pomiar wnz przy pomocy czujników RFCT w punkcie uziemiającym obiekt może być realizowane jedynie na prętach uzwojenia w warunkach laboratoryjnych. Na kompletnym stojanie generatora również nie ma technicznej możliwości zamontowania czujnika na uziemieniu korpusu. Sygnał z czujnika może być podpięty wprost do analizatora wnz, wymagany jest jednak dodatkowy sygnał synchronizujący z dzielnika napięciowego który umożliwi analizę amplitudowo – fazową wnz. Do wad należy zaliczyć trudność wykonania pomiaru na obiekcie w warunkach przemysłowych.

Cewka Rogowskiego jest szerokopasmowym transformatorem prądowym i często stosowana jest jako detektor impulsów wyładowań. Zaletami cewek Rogowskiego są [74, 31, 27]:

- galwaniczna separacja obwodów wejściowych toru pomiarowego od obwodów wysokonapięciowych,
- duża czułość detekcji,
- eliminacja zakłóceń niskoczęstotliwościowych.

Podstawowym parametrem pomiarowym cewki jest wartość transimpedancji Z_T będącej stosunkiem napięcia U_L na nominalnej rezystancji obciążenia cewki R_L do wywołującego go prąd I_p płynącego w przewodzie obejmowanym przez cewkę. Szerokopasmowy charakter cewki zapewnia zachowanie informacji o biegunowości rejestrowanych impulsów wyładowań. Wyodrębnienie węższego pasma pomiarowego (o szerokości rzędu $10^4 - 10^5$ Hz), poprzez rezonansowe zwiększenie selektywności cewki umożliwia eliminację występujących lokalnie zakłóceń wąskopasmowych utrudniających wykonanie pomiarów.

Czujniki antenowe stosowane są głównie w pomiarach on-line stanu izolacji maszyn elektrycznych [94,74,93,92,95]. Czujniki mogą zostać wykonane jako anteny paskowe (rys. 4.6. d) zamontowane pod klinami uzwojenia bądź też pomiędzy warstwami uzwojeń. Badania wykazały, że standardowo zainstalowane termistorowe czujniki do pomiaru temperatury bardzo dobrze mierzą sygnały generowane przez wnz a ich czułość może sięgać $0,3 \pm 0,02$ V/nC [94]. Pomiar wnz przez poszczególne termorezystory umieszczone w silniku daje możliwość lokalizowania miejsc generowania wnz, czyli miejsc osłabienia izolacji uzwojeń. Zespół czujników oparty na wykorzystaniu RTD można dodatkowo uzupełnić czujnikami antenowymi typu długi przewód ($L \gg d$), umieszczonymi wokół czół w postaci pętli bądź fragmentów pętli (są to tzw. anteny pętlowe). Ten rodzaj czujnika jest szczególnie interesujący, bo w sprzyjających okolicznościach (możliwość nawinięcia wokół czół pełnej wielokrotnej pętli) ma strefę widzenia wnz pełne 360° [94].

4.4. Zakłócenia w pomiarach wyładowań niezupełnych

Istnieją różne kryteria podziału źródeł zakłóceń występujących podczas pomiarów wyładowań niezupełnych, a i same sygnały zakłóceń można dzielić według różnych kryteriów, na przykład jako [8,57,87,98]:

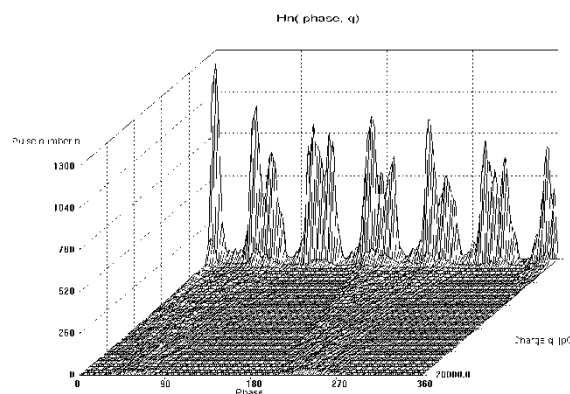
- ciągłe / impulsowe,
- wąskopasmowe / szerokopasmowe,
- powtarzalne / niepowtarzalne,
- synchroniczne / niesynchroniczne względem napięcia sieci,
- determinowane / przypadkowe,
- wewnętrzne / zewnętrzne,

- zdeterminowane czasowo / zdeterminowane częstotliwościowo.

Zakłócenia występujące w warunkach przemysłowych można zakwalifikować do każdej z powyższych grup. Rodzaj zakłócenia w decydujący sposób wpływa na wybór metody jego eliminacji. Wśród wielu metod poprawiających warunki pomiaru można wymienić następujące sposoby eliminacji szumów i zakłóceń [8,55,57,98] :

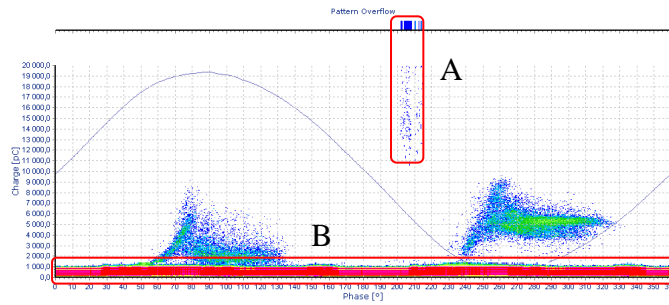
- właściwa konfiguracja środowiska pomiarowego,
- filtracja sygnału mierzonego – bramkowanie,
- stosowanie selekcji impulsów wyładowań metodą okna czasowego,
- usuwanie sygnałów będących zakłóceniami metodą okienkowania programowego.

Źródłem zakłóceń w przemyśle są przetworniki częstotliwości, prostowniki sterowane, spawarki oraz chwilowe przepięcia w sieci generowane przez maszyny komutatorowe lub też nagłe włączanie maszyn elektrycznych [57]. Zakłócenia mogą się występować jako impulsy cyklicznie pojawiające się na wykresie fazowo rozdzielczym. Przykład zakłócenia pochodzącego od sześcioplusowego przekształtnika tyrystorowego obrazuje rys. 4.8.



Rys. 4.8. Rozkład amplitudowo fazowy wnz z widocznymi zakłóceniami pochodzącymi od prostownika sterowanego

W momencie załączenia maszyn elektrycznych pracujących w pobliżu obiektu pomiaru generowane są zakłócenia przepięciowe. Zakłócenia te charakteryzują się szeregiem pojawiających się w odstępach kilku ms impulsów o dużej wartości sięgającej nawet kilkudziesięciu nC [57]. Zakłócenia te są trudne do usunięcia podczas pomiaru zwłaszcza gdy równocześnie występuje wiele źródeł zakłóceń. Czasami jedynym rozwiązaniem problemu tego typu zakłóceń jest wykonywanie pomiarów podczas postojów technologicznych – w czasie przerw lub w godzinach nocnych.



Rys. 4.9. Rozkład amplitudowo fazowy wnz z widocznymi zakłóceniami obszar A oraz szumami obszar B

Zakłócenia te przedstawione są na rys. 4.9. i oznaczone obszarem A. Jeżeli impulsy wnz pochodzące od zakłóceń nie nakładają się na płaszczyźnie fazowo rozdzielczej na sygnał pomiarowy to można je usunąć stosując tzw. okienkowanie programowe. Pozostałe zakłócenia – szumy o dużej powtarzalności ale o małej wartości, które przed pomiarem odcina się poprzez ustawienie progu czułości obrazuje obszar B na rys. 4.9. Wartość amplitudy szumów bezpośrednio zależy od pojemności obiektu badań. Podczas pomiaru stojana generatora o pojemności od kilkuset do kilku tysięcy nF poziom szumów zawiera się w granicach 500 ÷ 2000pC. Czasami jednak poziom zakłóceń jest wyższy i należy podjąć odpowiednie działania aby je zminimalizować. Z praktyki autora wynika, że istotnym powodem występowania szumów o znaczącej wartości podczas pomiarów wnz jest zła konfiguracja uziemienia układu pomiarowego. Celem zminimalizowania zakłóceń na stacji prób prętów stojana generatora w zakładzie TurboCare Poland S.A. autor zaprojektował możliwie najlepiej odseparowane od źródeł zakłóceń stanowisko pomiarowe. Wykonanie w pełni ekranowanego stanowiska pomiarowego w zakładzie produkcyjnym wiązałoby się ze znacznym zwiększeniem czasu badania prętów spowodowanym utrudnieniami w transporcie prętów na stanowisko pomiarowe. Optymalnym rozwiązaniem jest odseparowanie się od zakładowego systemu uziemienia, wykonanie ekranowania w podłodze na powierzchni pola probierczego oraz filtracja napięcia zasilania [15]. Skuteczne ekranowanie fali elektromagnetycznej poprzez zastosowanie ekranu wykonanego z siatki występuje wówczas, kiedy długość boku oczka siatki a jest ponad pięćdziesiąt razy mniejsza od długości fali elektromagnetycznej λ [24].

$$a < \lambda / 50 \quad (4.16)$$

$$\lambda = c / f \quad (4.17)$$

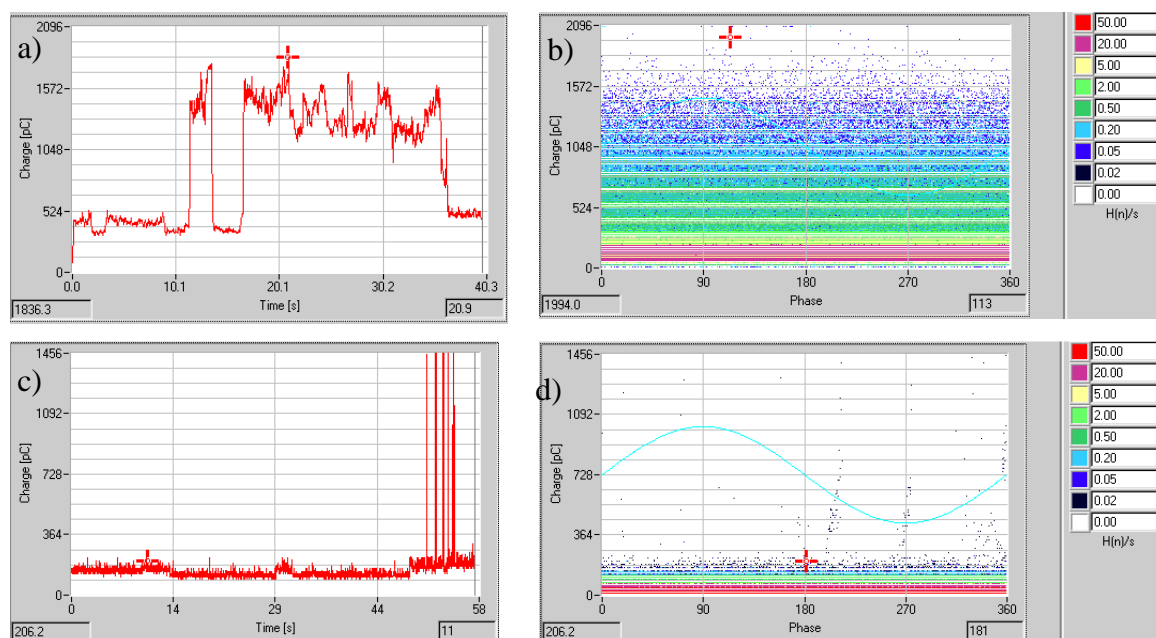
Długość fali elektromagnetycznej λ opisana jest zależnością 3.15. i zależy od prędkości światła c oraz częstotliwości fali f . Wyładowania niezupełne propagują impulsy prądowe w zakresie częstotliwości radiowych [9, 8] co odpowiada długości fali równej kilka metrów. Dobrano długość boku oczka siatki w posadzce pola probierczego $a=0,05\text{m}$. siatka została odizolowana od zakładowego systemu uziemienia a rezystancja izolacji sięga setek kiloomów (rys. 4.10). Uziemienie pomiarowe jest tylko w jednym punkcie galwanicznie połączone z uziemieniem zakładowym co eliminuje wpływ zakłóceń z obwodu uziemienia.



Rys. 4.10. Uziemienie zakładowe a) oraz izolowany system uziemienia stacji prób b)

Na zasilaniu transformatora probierczego zastosowano laboratoryjny filtr sieciowy o tłumieniu sygnałów na poziomie 100dB w zakresie częstotliwości 30kHz ÷ 15MHz. Po uruchomieniu stanowiska pomiarowego stwierdzono niepokojąco wysoki poziom szumów, który utrzymywał się podczas pomiarów na poziomie kilku nC. Pomiar rezystancji izolacji uziemienia pomiarowego wykazały co najmniej dwa miejsca połączenia z uziemieniem zakładowym. Kolejno odłączane aparaty oraz urządzenia elektryczne zainstalowane na stacji prób wykazały, że uziemienia ochronne we wtyczce zasilającej analizator wnz oraz mostek Scheringa powodowały powstanie zamkniętej pętli w obwodzie uziemienia pomiarowego. W przypadku braku zastosowania odpowiednich filtrów wejściowych w układzie zasilania testera uziemienie testera przewodem zasilającym może być przyczyną powstania pętli w obwodzie uziemienia. Badania laboratoryjne wykazały, że dla analizatorów wnz poziom szumów w układzie pomiarowym po odłączeniu uziemienia z przewodu zasilającego maleje znacząco. rys. 4.11. przedstawia wyniki

pomiaru zakłóceń w przypadku układu pomiarowego z jednym punktem uziemiającym b, c) oraz dwoma punktami uziemienia a, b). Na rys. 4.11. c) można zauważyć kilka impulsów o dużej wartości. Zakłócenia te zostały zasymulowane poprzez włączenie suwnicy znajdującej się ponad polem probierczym. Wyeliminowanie tego zjawiska wymagałoby jednak zastosowania całkowitego ekranowania pola probierczego.



Rys. 4.11. Przebieg czasowy szumu oraz rozkład amplitudowo fazowy impulsów: a), b) dla wadliwego układu uziemienia, c), d) dla poprawnego układu uziemienia

Kolejnym sposobem eliminacji szumów jest tzw. okienkowanie i bramkowanie sprzętowe polegające na usuwaniu danych będących zakłóceniami. Dzięki okienkowaniu można usunąć wszystkie wyładowania znajdujące się w pewnym obszarze na wykresie fazowo rozdzielczym wnz. W tym przypadku usuwane są również wyładowania będące obiektem pomiaru. Metoda ta jest skuteczna dla wyładowań cyklicznie powtarzających się jak np. wnz pochodzące od przekształtników tyrystorowych (rys. 4.8.) Bramkowanie pozwala odjąć od zmierzonych wyładowań wnz mierzone zewnętrznym dodatkowym czujnikiem. Czujnik, którym może być przekładnik prądowy WCz lub czujnik antenowy [59] umieszczony jest blisko źródła zakłóceń np. w pobliżu przetwornicy lub na przewodzie uziemiającym. Odpowiednie dobranie wzmocnienia oraz poziomu sygnału kanału umożliwia dobrą eliminację zakłóceń bez utraty danych związanych z wnz badanego obiektu.

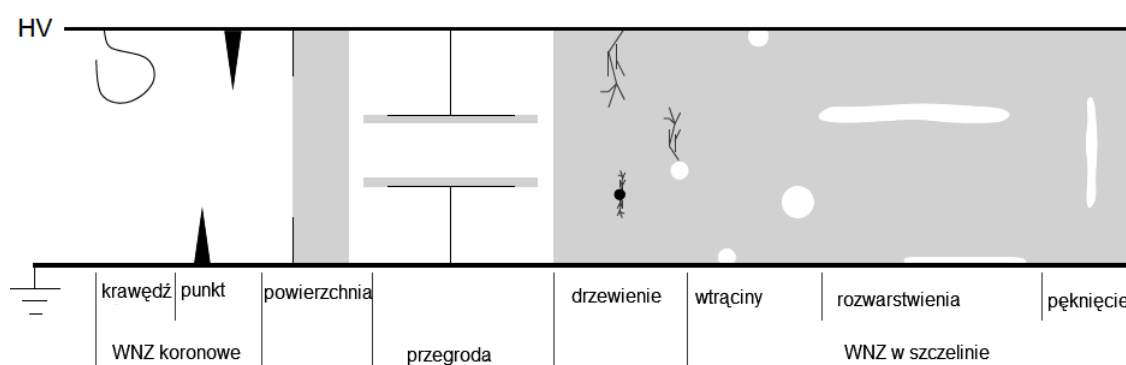
5. Diagnostyka układów izolacyjnych wykonanych w technologii Resin Rich w przemyśle

Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych stanowi podstawę niezawodnej oraz długotrwałej pracy maszyn. Diagnostyka jest zagadnieniem złożonym i skomplikowanym. Opiera się na szeregu prób, badań oraz testów wynikiem których jest decyzja. Decyzja jest wynikiem porównania wartości otrzymanych w pomiarach z dopuszczalnymi wartościami referencyjnymi. Diagnostyka obejmuje szereg metod opisanych w pkt.3; wszystkie te metody są stosowane przez autora w praktyce i z każdej z metod wysuwane są wnioski oraz spostrzeżenia. Prosta analiza wyników badań daje nam często punktową ocenę stanu izolacji np. wynik pomiaru rezystancji izolacji może być niedopuszczalny lub też może spełniać wymagania norm oraz procedur diagnostycznych. Bardziej zaawansowane wielokryterialne metody prądu stałego mogą precyzyjnie określić kondycję izolacji nie tylko pod kątem zabrudzenia czy też zawilgocenia ale i również pod kątem degradacji izolacji. Zastosowana w metodach stałoprądowych wielopunktowa ocena stopnia zużycia izolacji w powiązaniu z trendem zmian parametrów izolacji pozwala przewidzieć stan krytyczny maszyny. Na etapie produkcji prętów uzwojenia kluczowych maszyn pracujących w przemyśle energetycznym nie dopuszcza się nawet niewielkiego osłabienia układu izolacyjnego. Samo wykrycie wady w izolacji niejednokrotnie nie jest zadowalające, zwłaszcza gdy wada w procesie produkcji uzwojenia się powtarza. Konieczne jest wskazanie miejsca wystąpienia defektu, jego przyczyny oraz opracowanie działań naprawczych. Z doświadczenia autora wynika, że na etapie produkcji uzwojeń wysokonapięciowych maszyn wykonanych w technologii Resin-Rich na chwilę obecną najskuteczniejszą metodą oceny jakości wykonania układu izolacyjnego jest metoda pomiaru wyładowań niezupełnych metodą elektryczną. Podobna sytuacja występuje podczas diagnostyki maszyn będących w eksploatacji, gdzie planowane remonty wykonywane są w stosunkowo długich – kilkuletnich odstępach czasu. Wówczas na podstawie szeregu testów i pomiarów zarówno elektrycznych jak i mechanicznych dopasowuje się zakres remontu do wykrytych defektów maszyny. Degradacja izolacji jest procesem nieuniknionym lecz i długotrwałym. Przyspieszony proces degradacji występujący na skutek czynników zewnętrznych jak np. uszkodzenie pakietu, poluzowanie uzwojenia w żłobku itp. może doprowadzić do przedwczesnej nieplanowanej awarii

[7,21,23,37,61,62,63,84,93]. Niektóre z tych defektów odpowiednio rozpoznane i zlokalizowane mogą zostać usunięte lub też ich skutki mogą zostać złagodzone podczas remontu maszyny.

5.1. Modele fizyczne defektów układu izolacyjnego

W wysokonapięciowym, złożonym układzie izolacyjnym występuje szereg lokalnych oraz globalnych obszarów, w których natężenie pola elektrycznego powoduje powstanie wyładowań niezupełnych. Rodzaje układów oraz obszary występowania wyładowań obrazuje poniższy rys. 5.1.



Rys. 5.1. Rodzaje wyładowań niezupełnych w wysokonapięciowych układach izolacyjnych

Defekt izolacji w wysokonapięciowych maszynach nie sprowadza się wyłącznie do uszkodzenia – nieciągłości izolacji głównej lub też osłabień izolacji na skutek jej zawilgocenia / zanieczyszczenia. Z powodu występujących dużych natężeń pola elektrycznego, zastosowania materiałów o różnych właściwościach elektrycznych oraz małych odstępów izolacyjnych w maszynach WN można znaleźć wiele miejsc szczególnie narażonych na wnz, w których to następuje przyspieszona degradacja izolacji. Defekty izolacji takie jak zawilgocenie, zanieczyszczenie czy też globalne rozwarstwienie izolacji można łatwo i szybko stwierdzić bazując na metodach prądu stałego lub pomiarze współczynnika strat dielektrycznych. Kryteria oraz wartości dopuszczalne zostały opracowane na podstawie wieloletnich badań oraz obserwacji i zostały ujęte w normach oraz poradnikach [10,37,45,46,47,48,49,61,62,63,76,79,84,93]. Nowo produkowane pręty stojanów wysokonapięciowych maszyn elektrycznych posiadają zawsze bardzo dużą wartość rezystancji izolacji przekraczającą setki gigaomów a większość występujących wad

produkcyjnych ma charakter lokalny. Straty mocy w nowej izolacji wynikające z występujących wad są stosunkowo niewielkie w porównaniu do uzwojeń będących w eksploatacji. Konieczne jest opracowanie efektywnej diagnostyki izolacji nowo produkowanych uzwojeń wraz z wartościami granicznymi wskaźników diagnostycznych. Niezbędne jest przeprowadzenie szeregu prób i pomiarów laboratoryjnych na modelach fizycznych układów izolacyjnych. Autor do celów diagnostycznych wykorzystuje profesjonalne testery wysokonapięciowe, analizatory wnz oraz inne przyrządy pomiarowe niezbędne do przeprowadzenia kompletu pomiarów elektrycznych. W skład aparatury pomiarowej używanej przez autora badań wchodzi następujące testery oraz analizatory przedstawione na rys. 5.2. [51]:

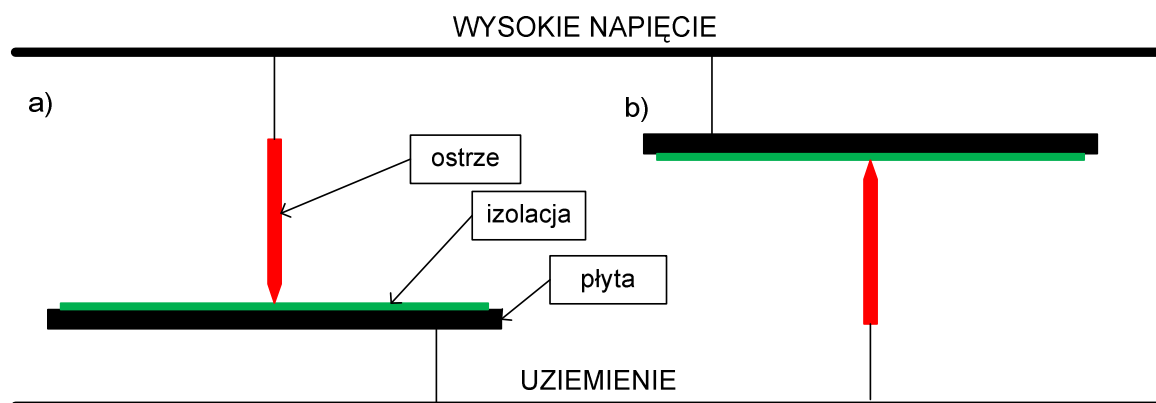
- a) analizator wnz PD Smard firmy Doble Lemke,
- b) analizator wnz LDS-6 firmy Lemke Diagnostics,
- c) analizator wnz DDX 7000 firmy Robinson Instruments,
- d) akustyczna sonda do lokalizacji wnz LDP-5,
- e) cyfrowy mostek do pomiaru kąta strat dielektrycznych oraz pojemności typ 2816 firmy Tettex,
- f) mierniki rezystancji izolacji firmy Megger,
- g) cyfrowy miernik do pomiaru kąta strat dielektrycznych oraz pojemności TD Smart firmy Lemke,
- h) analogowe, laboratoryjne woltomierze elektrostatyczne,
- i) wysokonapięciowy tester izolacji DCR50 firmy Adwel,
- j) wysokonapięciowe testery impulsowe firmy Baker.



Rys. 5.2. Wykaz aparatury pomiarowej wykorzystywanej do diagnostyki wysokonapięciowych układów izolacyjnych maszyn elektrycznych

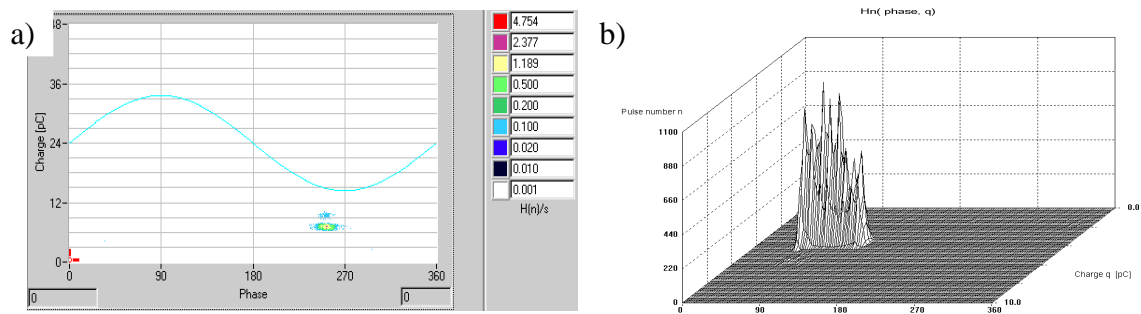
Autor zamodelował wyładowania koronowe budując modele fizyczne składające się z elektrody płaskiej – płyty miedzianej o wymiarach 30x30cm oraz ostrza – igły o grubości 1mm. Zbadano rozkłady amplitudowo fazowe oraz parametry wnz kiedy to ostrze znajdowało się na wysokim potencjale jak i na potencjale masy. W przypadku

wyładowań koronowych w powietrzu zjawisko było trudne do zaobserwowania gdyż wyładowanie niezupełne szybko przechodziło w wyładowanie zupełne. Zastosowano przegrodę z materiału elektroizolacyjnego pomiędzy elektrodami. Izolatorem była płyta szkło – epoksydowa o grubości 0,8mm. Układ pomiarowy obrazuje poniższy rys. 5.3.



Rys. 5.3. Model fizyczny do badania wnz koronowych: a) z elektrodą na wysokim potencjale, b) z elektrodą na potencjale masy

Pomiaru dokonano w układzie równoległym rys.4.5. b) przy stałej wartości napięcia zasilania $U=6kV$ w czasie $t=60s$. Do pomiaru zastosowano kondensator sprzęgający o pojemności $C=1nF$ oraz analizator LDS-6.



Rys. 5.4. Wyładowania koronowe: a) rozkład gęstości ładunku dla wnz z elektrodą na wysokim potencjale, b) wykres 3D wyładowań dla wnz z elektrodą na potencjale masy

Bazując na powyższych wynikach badań można stwierdzić ściśle przyporządkowanie obrazu wnz do rodzaju wyładowania. Wyładowania koronowe często występują w wysokonapięciowych układach izolacyjnych oraz w samych układach pomiarowych. Pozostałe wady w rzeczywistych układach izolacyjnych zostaną opisane w kolejnych rozdziałach.

5.2. Diagnostyka uzwojeń wysokonapięciowych maszyn wykonanych w technologii Resin-Rich

Nowoczesne układy izolacyjne charakteryzują się coraz to większym napięciem roboczym oraz coraz to większymi naprężeniami elektrycznymi izolacji głównej. Układy izolacyjne stają się bardziej złożone i stosowane są procedury technologiczne mające na celu ograniczenie lokalnych wzrostów naprężeń elektrycznych. Oznacza to potrzebę badań mechanizmów degradacji materiałów izolacyjnych i doskonalenia metod ich oceny. Nowo produkowane uzwojenia wysokonapięciowych maszyn elektrycznych nie mogą wykazywać żadnych wad mogących stwarzać zagrożenie przyspieszonego procesu degradacji izolacji gotowego stojana. Pręty stojana muszą mieć nie tylko poprawnie zaprojektowaną i wykonaną izolację ale również wewnętrzną oraz zewnętrzną ochronę przeciwjarzeniową. Wykonanie ciągłej, pełnej, zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej uzwojonego stojana linearyzuje rozkłady naprężeń w strefie połączeń czołowych oraz na rozdzielaczach faz uzwojenia. Niewłaściwy dobór materiałów lub przerwanie ciągłości warstwy półprzewodzącej może spowodować przyspieszoną degradację na skutek wnz. Niezbędne jest zrozumienie zjawisk zachodzących w źle wykonanym układzie izolacyjnym, klasyfikacja defektów na podstawie zbioru wyników pomiarów oraz lokalizacja wad celem doskonalenia technologii wytwarzania.

Na etapie produkcji prętów możliwe są następujące defekty układu izolacyjnego pręta stojana generatora:

- zwarcia zwojowe elementarnych przewodów,
- nieciągłości wewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej,
- złe parametry wewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej,
- źle przyklejona izolacja główna do przewodów elementarnych,
- rozwarstwienia w izolacji głównej,
- uszkodzona izolacja międzypołówkowa (w przypadku prętów dwuwarstwowych),
- uszkodzona izolacja zwojowa w przypadku uzwojeń cewkowych,
- pęknięcia w izolacji głównej,
- nieciągłości w zewnętrznej ochronie przeciwjarzeniowej.

Produkcji uzwojenia stojana w technologii Resin-Rich towarzyszą następujące pomiary elektryczne:

- kontrola zwarć elementarnych przewodów przy napięciu 110V AC,
- pomiar rezystancji kitów półprzewodzących na przepłotach Roebbla (jeżeli występują),
- pomiar rezystancji izolacji,
- próba napięciowa półprętów (w przypadku prętów dwuwarstwowych),
- test Bakera (w przypadku uzwojeń cewkowych),
- próba napięciowa części czołowej uzwojenia $U_P=2U_n$,
- próba napięciowa części prostej $U_P=3U_n$,
- pomiar rezystancji taśmy przewodzącej w części prostej,
- pomiar współczynnika strat dielektrycznych w przedziale $0,2 \div 2,0 U_n$,
- pomiar wyładowań niezupełnych – w tym pomiar rutynowy $0 \div 2U_n$ oraz pomiar analityczny $U=1,5U_n$.



Rys. 5.5. Pomiary międzyoperacyjne prętów a), stacja prób końcowych uzwojeń b)

Pierwsze dwa pomiary wykonuje się jeszcze przed nałożeniem izolacji głównej (rys. 5.5. a), pozostałe wykonuje się na stacji prób (rys. 5.5 b). Wartości rezystancji izolacji nowych prętów sięgają setek gigaomów. Przeprowadzenie skutecznej diagnostyki izolacji o tak dużej wartości oporności wymaga starannego przeprowadzenia testów. Pomiar współczynnika strat dielektrycznych wykonywany jest tylko w części prostej. W tym celu stosuje się elektrody ochronne zwiększające dokładność pomiaru. Pomiar ten wskazuje na:

- rozwarstwienia izolacji,
- źle przyklejoną izolację,

- występowanie wyładowań niezupełnych w układzie izolacyjnym,
- wady materiałowe bądź źle utwardzoną izolację.

Jeszcze w latach 90 ub. wieku próba napięciowa oraz pozytywny wynik pomiaru współczynnika strat dielektrycznych były wyznacznikiem jakości izolacji. Wdrożona pod koniec lat 90 diagnostyka izolacji metodą wyładowań niezupełnych wykazała szereg wad i problemów w wysokonapięciowych układach izolacyjnych. Doprowadziło to do intensyfikacji prac nad wyeliminowaniem wyładowań niezupełnych w produkowanych uzwojeniach. Nowoczesne technologie wytwarzania układów izolacyjnych pozwalają na całkowite wyeliminowanie wyładowań niezupełnych w nowym układzie izolacyjnym w przedziale napięć nawet do $3U_n$.

Opracowanie technologii wykonania wysokonapięciowego układu izolacyjnego jest zagadnieniem trudnym, w dużej mierze opierającym się na wiedzy eksperckiej oraz serii prób i badań prototypowych układów izolacyjnych. Autor rozprawy rozpoczynając pracę w zakładzie Energoserwis S.A. napotkał na szereg problemów z wdrażaną wówczas metodą pomiaru wnz. Po kilku latach badań i doświadczeń autor wzbogacił swoje zaplecze sprzętowe, zbudował bazę danych defektów izolacji oraz opracował metodykę pomiaru i kryteria oceny jakości izolacji na podstawie pomiaru wnz.

Obecnie wiodącą metodą diagnostyki izolacji w zakładzie TurboCare Poland S.A. jest metoda diagnostyki wnz i zdecydowana większość defektów wykrywana i lokalizowana jest tą właśnie metodą.

W oparciu o diagnostykę prętów metodą wnz wyznaczone są następujące podstawowe parametry:

- napięcie zapłonu wnz U_Z ,
- napięcie gaszenia wnz U_G ,
- maksymalny ładunek pozorny w trybie analitycznym przy napięciu $U=1,5U_n$,
- wskaźniki charakteryzujące wnz jak moc, intensywność, parametr D ,
- rozkłady amplitudowo fazowe ww. parametrów wnz.

Napięcie zapłonu oraz gaszenia wnz wyznaczone jest w trybie rutynowym, gdzie napięcie próby jest płynnie podnoszone od zera do napięcia $U=2U_n$ a następnie ma miejsce płynne zmniejszenie napięcia. Stromość narastania / opadania napięcia wynosi około

1 ÷ 2kV/s. Należy zwrócić uwagę na fakt, że wyniki pomiarów nie zawsze są powtarzalne.

Na skutek występowania dużych naprężeń elektrycznych podczas próby napięciowej często dochodzi do lokalnego uszkodzenia izolacji. Ponadto w przypadku niektórych wad takich jak np. rozwarstwienie izolacji niewielkich rozmiarów podczas początkowego procesu inicjacji wzn w kawernie dochodzi do zjonizowania pustej przestrzeni i zwiększenia jej wytrzymałości elektrycznej. Zjonizowanie przestrzeni utrzymuje się kilka godzin i w tym czasie wzn mogą nie występować. Zjawisko to zaobserwowano wielokrotnie, dlatego też analiza wyładowań niezupełnych jest pierwszą i ostatnią wysokonapięciową próbą wykonywaną na nowym pręcie lub też wykonywana jest ona równoległe z próbą napięciową.

5.2.1. Analiza defektu izolacji typu kawerna

Poniżej przedstawiono wyniki badań przykładowego pręta stojana generatora TWW-230-2 na napięciu $U=15,75\text{kV}$ (rys. 5.6.). Izolacja główna prętów wykonana jest z taśmy mikowej CalmicaGlass w technologii Resin-Rich. Pręt posiada wewnętrzną ochronę przeciwjarzeniową wykonaną w postaci półprzewodzących wypełnień w miejscach przepleceń Roebbla. Zewnętrzna ochrona przeciwjarzeniowa wykonana jest w części prostej pręta jako taśma przewodząca, natomiast w części czołowej na całej długości nałożona jest taśma półprzewodząca o nieliniowej charakterystyce rezystancyjno – napięciowej.



Rys. 5.6. Pręty uzwojenia stojana generatora TWW-230-2

Zakres pomiarów elektrycznych zwany Planem Badań i Prób (PBiP) oraz jego kryteria zostały opracowane przez Dział Technologiczny oraz Dział Kontroli Jakości, w którym to autor rozprawy pracuje na stanowisku specjalisty ds. elektrycznych. Sposób przeprowadzenia badań oraz kryteria ustalane są na podstawie norm branżowych [4,44,45,46,47,48,49,76,77,78,79], poradników lub też wg wymagań klienta. Zestawienie badań oraz kryteria przedstawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Zakres badań oraz kryteria i wyniki pomiarów przykładowego pręta stojana generatora TWW-230-2 z defektem izolacji typu kawerna

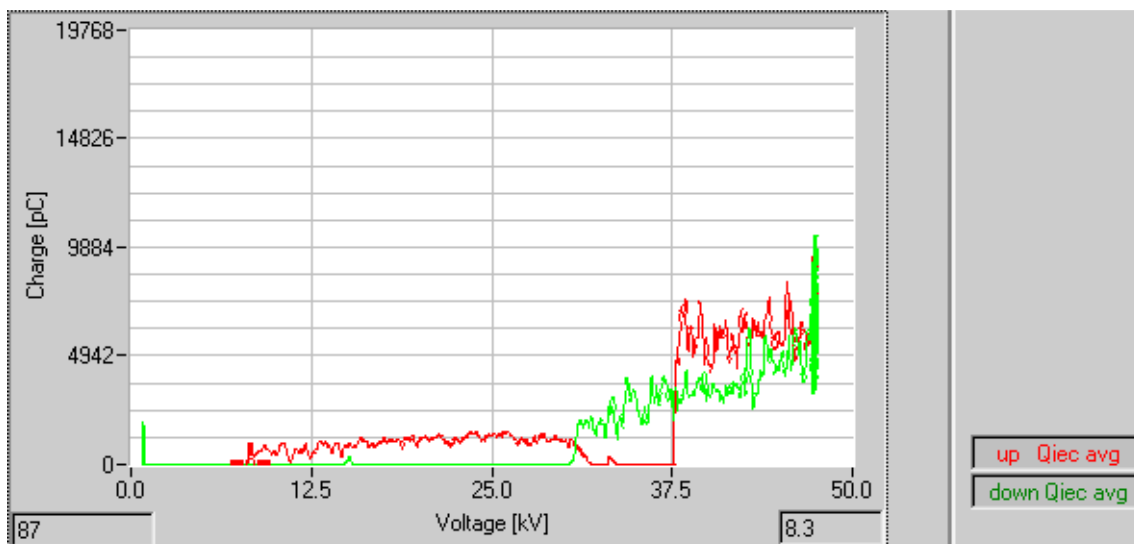
Rodzaj badania	Kryteria	Wynik kontroli
Kontrola izolacji między przewodami elementarnymi napięciem 110V AC	Nie dopuszcza się zwarć	– wynik pozytywny
Kontrola rezystancji powłoki przewodzącej pręta w 3 miejscach	Wartość rezystancji powłoki przewodzącej powinna się zawierać w granicach 1,5÷15kΩ/	R= 4,2kΩ, R= 4,7kΩ, R= 5,3 kΩ – wynik pozytywny
Próba napięciowa izolacji międzypółkowej $U_{pr}=1500V$ AC /1min	Izolacja powinna wytrzymać przyłożone napięcie bez przebicia	– wynik pozytywny
Pomiar rezystancji izolacji przed i po próbie napięciowej izolacji międzypółkowej	Wartość rezystancji $R_{IZ}>100M\Omega$ przy pomiarze napięciem $U=1000V$	przed próbą – R= 6400MΩ, po próbie – R= 5750MΩ
Próba napięciowa części czołowej $U_{pr}=2U_N= 31,5kV$ AC Próba napięciowa części żłobkowej $U_{pr}=3U_N= 48kV$ AC	Izolacja powinna wytrzymać przyłożone napięcie bez przebicia oraz wyładowań powierzchniowych	– wynik pozytywny
Pomiar rezystancji izolacji przed i po próbie napięciowej	Wartość rezystancji izolacji $R_{IZ}>100M\Omega$ przy pomiarze napięciem $U=5000V$	przed próbą R= 220000MΩ po próbie R= 190000MΩ

Pomiar współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ izolacji głównej części prostej	Wartość $tg\delta$ mierzona z pierścieniami ekranującymi w zakresie $0,2\div 2U_N$ powinna wynosić: - $tg\delta$ przy $0,2U_N \leq 2,5\%$ -dla przedziału $0,2U_N < 0,5\%$	- wynik pozytywny, wyniki zestawiono w tabeli 5.2
Pomiar poziomu wyładowań niezupełnych	$U_p \geq U_N = 15,75kV$ – napięcie początkowe wyładowań wyższe od napięcia znamionowego, $Q_{max} \leq 50$ nC – ładunek maksymalny przy pomiarze analitycznym $1,5U_N/2min$	- przed próbą napięciową $U_Z = 8,3kV$ – wynik negatywny , - po próbie napięciowej $U_Z = 36,6kV$, - ładunek w pomiarze analitycznym $Q < 500$ pC

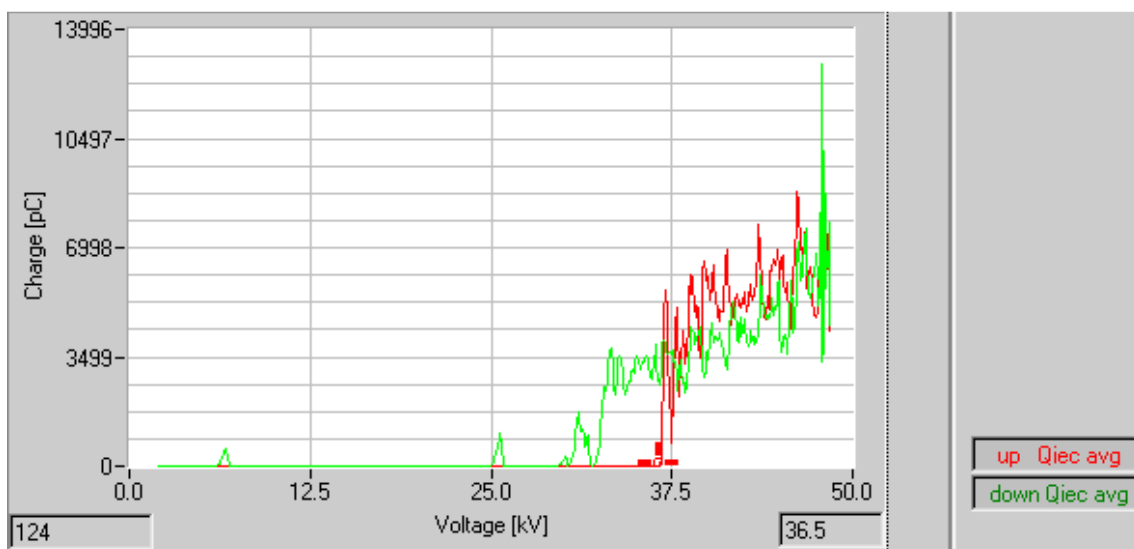
Tabela 5.2. Wyniki pomiaru współczynnika strat dielektrycznych

U/Un	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,6	2,0	$\Delta tg\delta/0,2U_N$
U [V]	3 150	6 300	9 450	12 600	15 750	18 900	25 200	31 500	MAX [%]
$tg\delta$ [%]	0,43	0,43	0,49	0,55	0,59	0,64	0,70	0,72	0,06

Podczas pierwszego najazdu wysokiego napięcia zaobserwowano niskie napięcie zapłonu $U_Z=8,3kV$ którego to wartość nie spełniała wymagań technologii (rys. 5.7.). Wyładowania te jednak zanikły na skutek stopniowego zwiększania napięcia (rys. 5.8.). Kolejne pomiary w trybie analitycznym nie wykazały żadnych defektów izolacji. Pozostałe pomiary elektryczne zawarte w Planie Badań i Prób nie wskazywały na występowanie defektu izolacji. Pręt uziemiano na czas kilku godzin a następnie dokonano kolejno najazdu napięcia aż do napięcia inicjacji wnz. Przenośnym lokalizatorem wnz (rys 5.2.d) wyszukano miejsce w części prostej pręta gdzie występowały wnz. Miejsce występowania wnz ostukano metalową kulą o średnicy kilkunastu milimetrów. Uszkodzone miejsce charakteryzowało się odgłosem o wyraźnie niższej częstotliwości. Rezultatem przeprowadzonego badania było wykrycie lokalnej wady o średnicy kilku milimetrów typu kawerna.

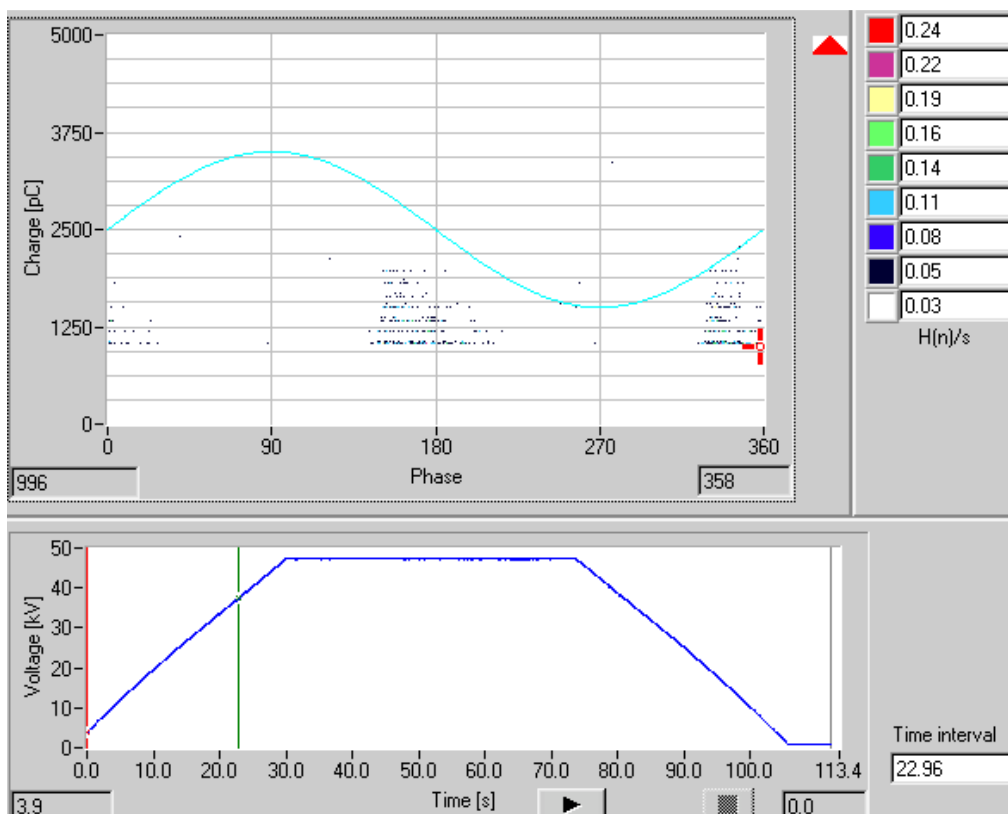


Rys. 5.7. Krzywa qV pręta stojana z wadą typu kawerna przed próbą napięciową



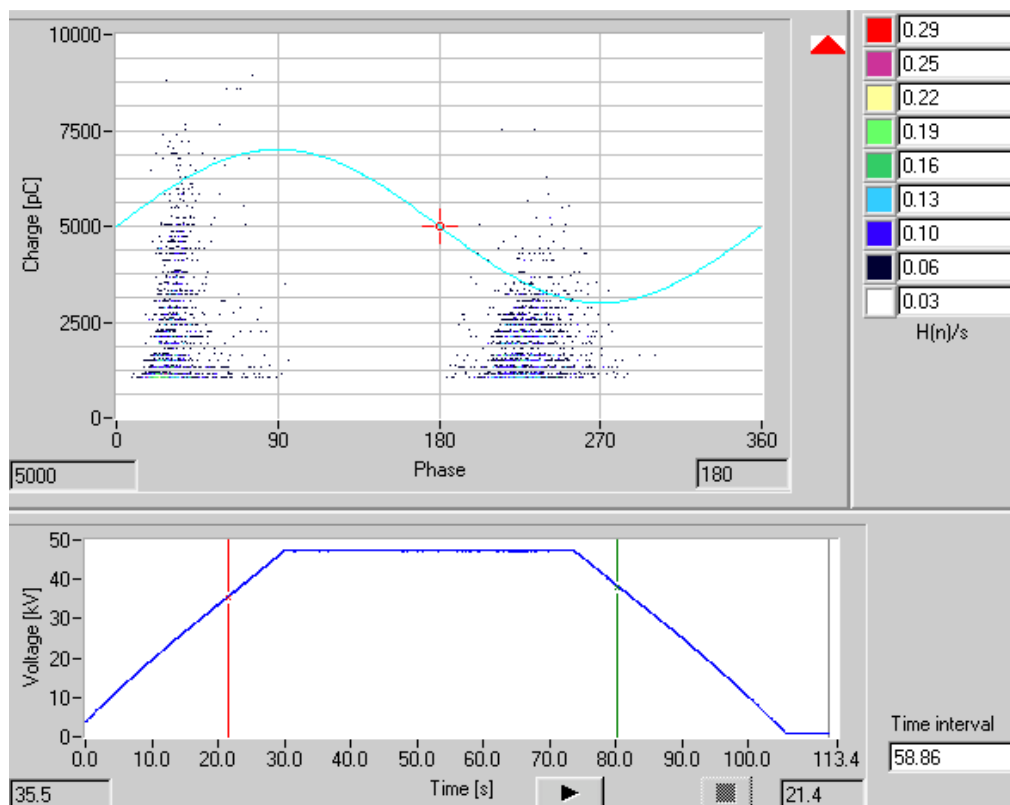
Rys. 5.8. Krzywa qV pręta stojana z wadą typu kawerna po próbie napięciowej

Analiza przebiegu w czasie dominacji defektu rozwarstwienia wskazuje na symetryczną koncentrację ładunku w kącie fazowym napięcia zasilania $135^{\circ} \div 210^{\circ}$ oraz $305^{\circ} \div 45^{\circ}$. Ładunki te osiągają niewielkie wartości ($1,5 \div 5\text{nC}$) a ich powtarzalność jest mała ($n < 10$). Poniższy rysunek obrazuje umiejscowienie impulsów wnz na wykresie ilościowo amplitudowo-fazowym oraz przedział analizy wyników pomiaru.



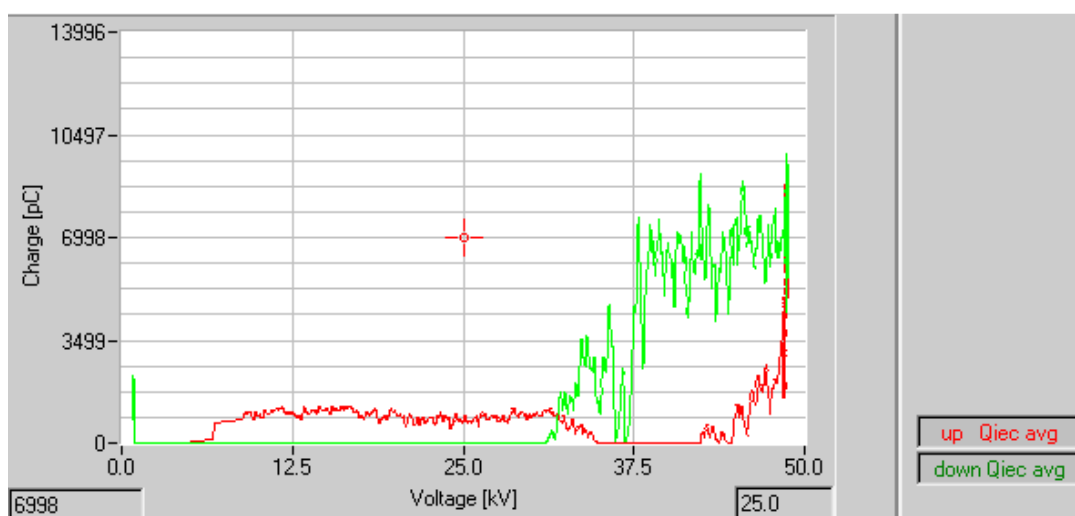
Rys. 5.9. Rozkład gęstości ładunku dla wady typu kawerna

Wyładowania które możemy zauważyć podczas kolejnych najazdów napięcia są wyładowaniami w izolacji głównej oraz wyładowaniami powierzchniowymi i są normalne dla tak wysokich poziomów napięć. Obraz wyładowań oraz przedział analizy obrazuje rys. 5.10.

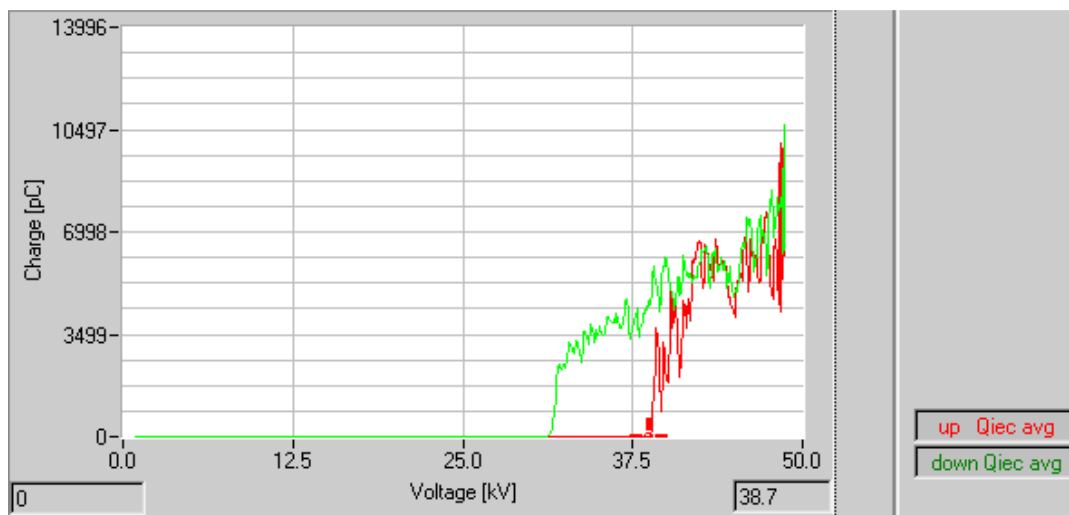


Rys. 5.10. Rozkład gęstości ładunku wyładowań podczas próby napięciowej pręta stojana generatora

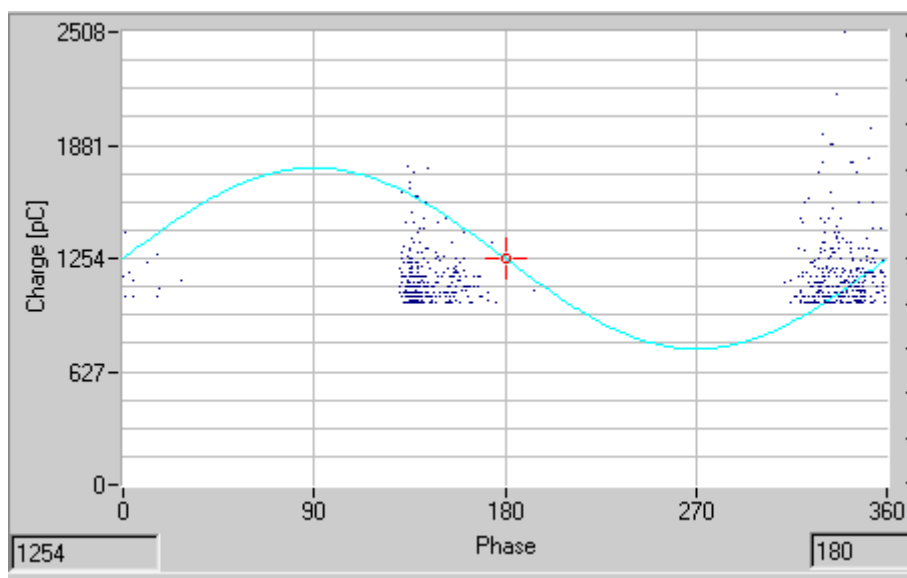
Wynik pomiaru tego typu defektu nie jest jednostkowy lecz powtarzalny. Wyniki badań na kolejnym przykładowym pręcie generatora z wadą typu kawerna obrazują rysunki 5.11. ÷ 5.13. Wada ta została wykryta przy pomocy analizy wnz metodą elektryczną oraz akustyczną lokalizacją źródła wnz i została potwierdzona po mechanicznym ostukiwaniu pręta w miejscu występowania wnz.



Rys. 5.11. Krzywa qV pręta stojana z wadą typu kawerna przed próbą napięciową

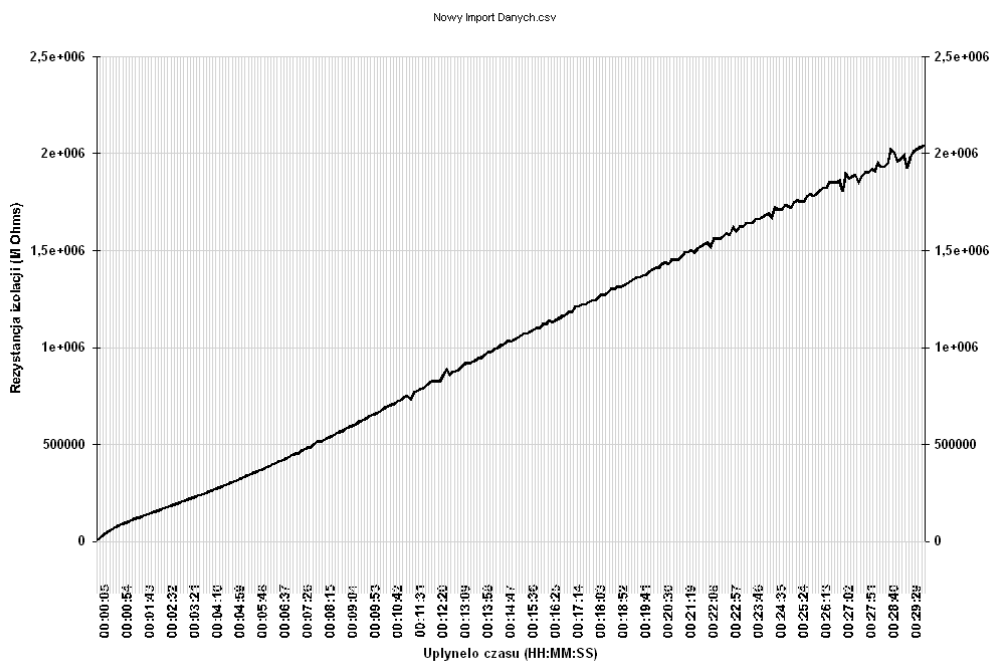


Rys. 5.12. Krzywa qV pręta stojana z wadą typu kawerna przed próbą napięciową



Rys. 5.13. Rozkład gęstości ładunku dla wady typu kawerna

Wykonano szereg pomiarów diagnostycznych uszkodzonego pręta napięciem stałym zgodnie z procedurami oraz normami [37, 93, 47, 79]. W pierwszej kolejności przeprowadzono test Meggera przy napięciu $U=10\text{kV}$.

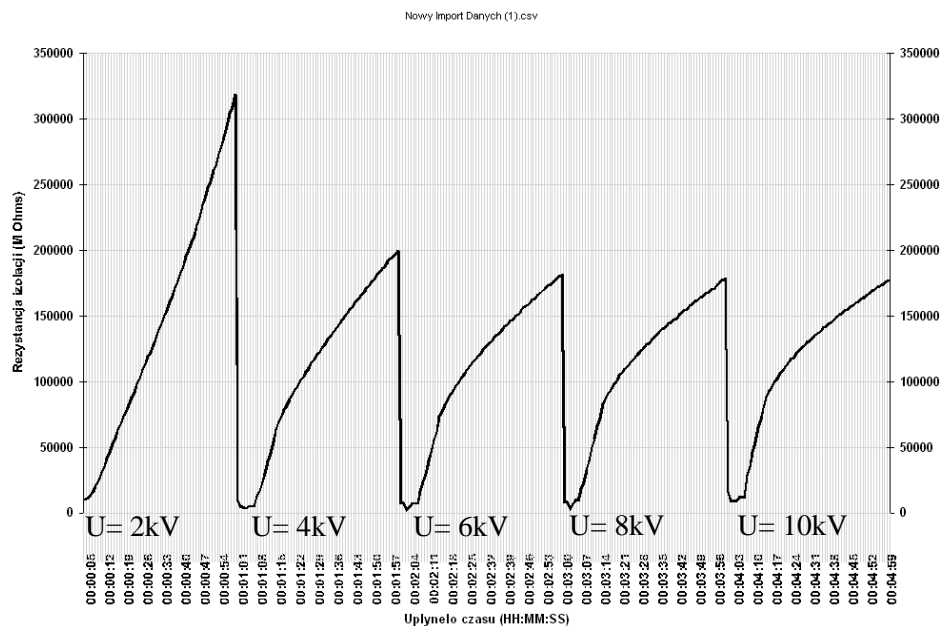


Rys. 5.14. Przebieg pomiaru rezystancji izolacji pręta TWW-230-2 z wadą typu kawerna
 Wyniki pomiaru rezystancji izolacji oraz związanych z testem Meggera współczynników diagnostycznych zestawiono w tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Wyniki pomiaru izolacji pręta testem Meggera

R_{15}	R_{60}	R_{600}	k	PI	DD
29600 MΩ	92100 MΩ	652000 MΩ	3,11	7,07	1,01

Wykonano test napięciem schodkowo narastającym SV do napięcia $U=10kV$ (rys. 5.15)



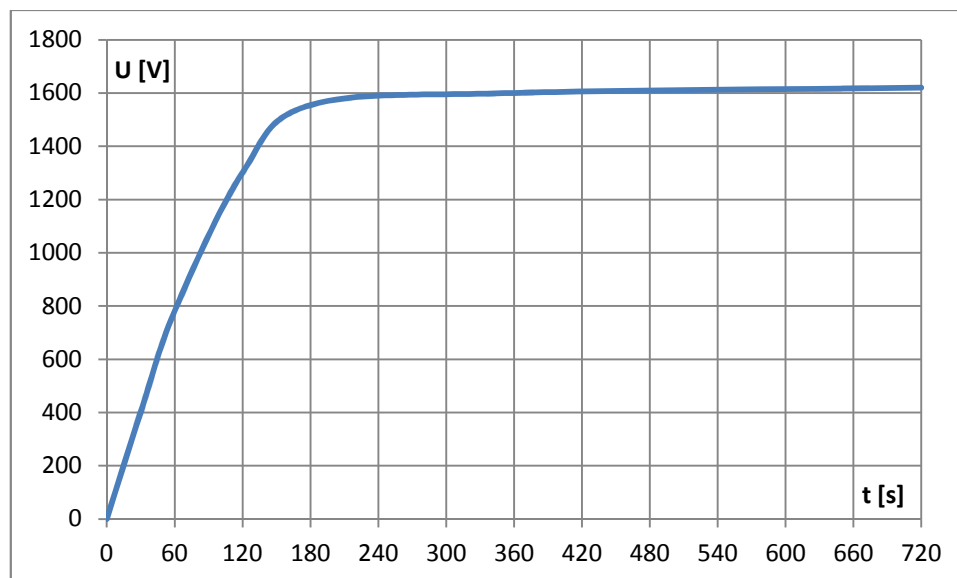
Rys. 5.15. Test napięciem schodkowym pręta TWW-230-2 z wadą typu kawerna

Wartości rezystancji izolacji R_{60} na poszczególnych progach napięciowych przedstawiono w tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Wyniki pomiaru izolacji metodą SV

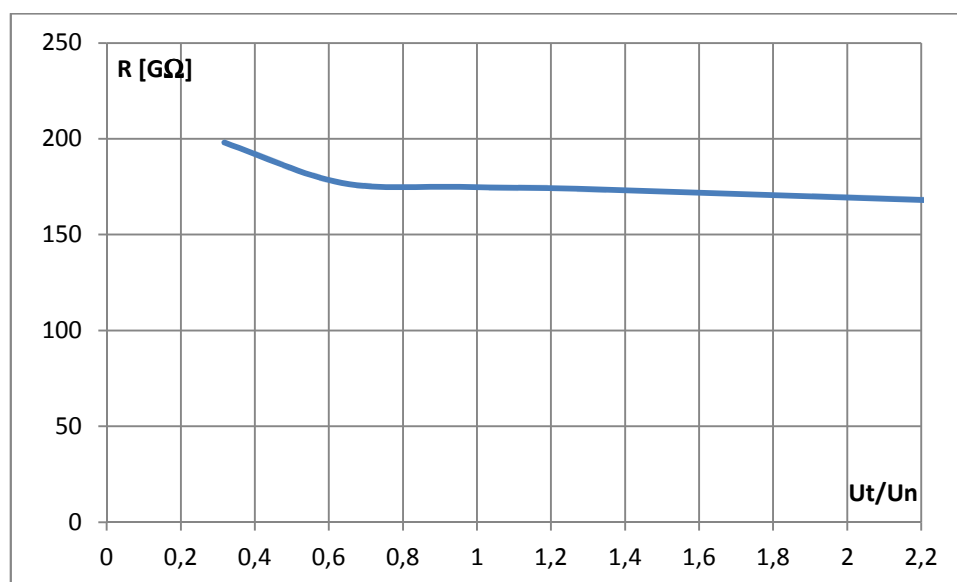
U kV	2	4	6	8	10
R MΩ	320000	201000	178000	177000	176000

Przeprowadzono diagnostykę izolacji napięciem stałym metodą prof. Tadeusza Glinki. Naładowanie układu izolacyjnego zostało przeprowadzone przy zasilaniu pręta napięciem znamionowym $U=15,75$ kV w czasie $t=30$ min. Po upływie czasu ładowania zwarto układ izolacyjny na czas $t=30$ s po czym rozpoczęto pomiar odbudowy napięcia kilowoltmierzem elektrostatycznym. Wyniki pomiaru obrazuje poniższy rysunek.



Rys. 5.16. Przebieg odbudowy napięcia pręta TW-230-2

Podjęto próbę wyznaczenia hipotetycznego napięcia przebicia izolacji w zakresie napięcia do $2,2 U_n$. Na podstawie wyników pomiaru przedstawionych na rys. 5.17 napięcie to nie może zostać wyznaczone. Zgodnie z normami oraz poradnikami [37, 79] do dalszych obliczeń współczynników diagnostycznych przyjęto wartość napięcia przebicia równą $U_p=3U_n$.



Rys. 5.17. Wykres rezystancji izolacji $R_{60} = f(U_t/U_n)$

Wyniki badań diagnostyki stałoprądowej pręta z defektem izolacji typu kawerna zestawiono w poniższej tabeli. Oceny stanu technicznego izolacji dokonano na podstawie kryteriów Meggera, punktowej oceny wg. metody prof. Tadeusza Glinki oraz na podstawie współczynnika diagnostycznego $DF\dot{L}$.

Tabela 5.5. Zestawienie wyników pomiarów pręta TWW-230-2

Parametr układu izolacyjnego	Wynik pomiaru	Ocena stanu technicznego
Rezystancja izolacji R_{60} [M Ω]	29600	Bardzo dobry
Współczynnik absorpcji k	3,11	Bardzo dobry
Współczynnik polaryzacji PI	7,07	Bardzo dobry
Współczynnik rozładowania dielektryka DD	1,01	Bardzo dobry
Maksymalna odchyłka rezystancji izolacji w teście SV ΔR_{max} [%]	37%	Niezadawalający
Napięcie przebicia U_p/U_n	3	5pkt
Rezystancja R_{60}/U_n [k Ω/V]	1879	5pkt
Czas zwarcia dla t_z [s]	30	5pkt
Maksymalna wartość odbudowanego napięcia $U_{od\ max}/U_o$	0,11	5pkt
Czas odbudowy napięcia t_{od} [s]	240	5pkt
Wahania prądu upływu przy U_N	0,05	5pkt
Współczynnik ip_{15}/ip_{60}	3,11	5pkt
Współczynnik $DF\dot{L}$	0,044	Dobry

Większość parametrów diagnostycznych otrzymanych w wyniku diagnostyki prądem stałym znacznie przekraczają założenia norm oraz poradników [37, 93, 47, 79]. Test napięciem schodkowym SV wykazuje odchyłki rezystancji izolacji większe niż 25%, które mogą wskazywać na obecność zanieczyszczeń lub wilgoci [1, 10, 63]. Z pozostałych pomiarów zamieszczonych w PBiP pręta wykonanych napięciem przemiennym jedynie pierwszy pomiar wnz wskazywał na występowanie wady izolacji.

5.2.2. Analiza defektu izolacji typu rozwarstwienie

W tym podrozdziale omówiony zostanie defekt typu rozwarstwienie rozumiany jako źle przyklejona lokalnie izolacja do miedzi pręta. Analizę przedstawiono w oparciu o badanie pręta hydrogeneratora typu GDH 7262S -12 o mocy $S=335,555$ MVA na napięcie $U=18$ kV (rys. 5.18). Izolacja główna prętów wykonana jest z taśmy mikowej CalmicaFab w technologii Resin-Rich. Pręt posiada wewnętrzną ochronę przeciwjarzeniową wykonaną w postaci półprzewodzących wypełnień w miejscach przepleceń Roebbla. Zewnętrzna ochrona przeciwjarzeniowa wykonana jest w części prostej pręta jako taśma przewodząca natomiast w części czołowej nałożona jest taśma półprzewodząca o nieliniowej charakterystyce rezystancyjno – napięciowej.



Rys. 5.18. Pręty stojana hydrogeneratora GDH 7262S -12

Wykonano komplet pomiarów elektrycznych zgodnie z Planem Badań i Prób dla tego typu pręta. Badania, kryteria oraz wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 5.6 :

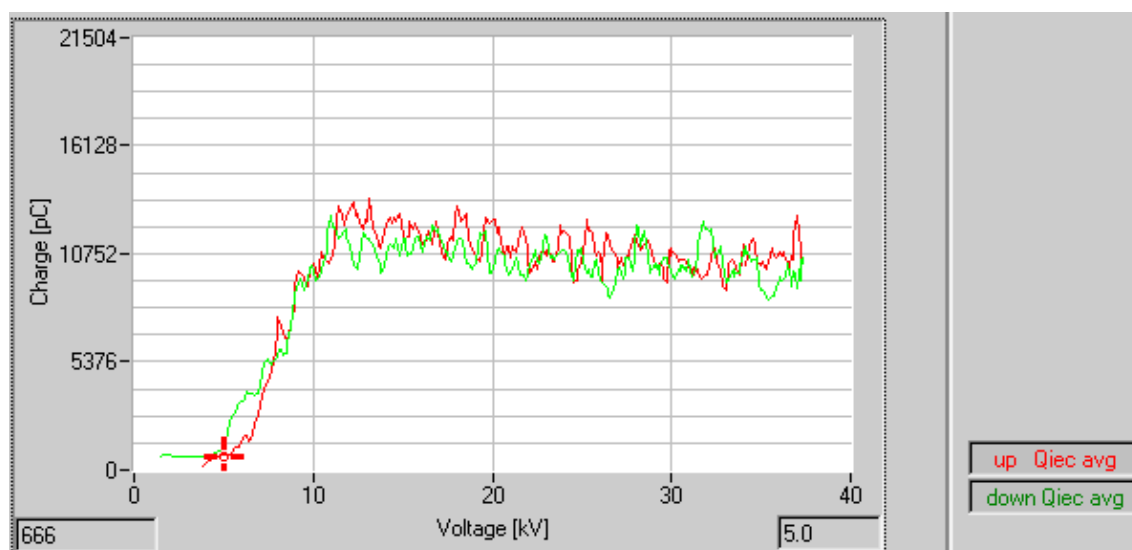
Tabela 5.6. Zakres badań ,kryteria oraz wyniki pomiarów przykładowego pręta stojana generatora GDH 7262S -12 z defektem izolacji typu rozwarstwienie

Rodzaj badania	Kryteria	Wynik kontroli
Kontrola izolacji między przewodami elementarnymi napięciem 110V AC	Nie dopuszcza się zwarć	– wynik pozytywny
Kontrola rezystancji powłoki przewodzącej pręta w 3 miejscach	Wartość rezystancji powłoki przewodzącej powinna się zawierać w granicach 1,5÷15kΩ/	R= 5,2 kΩ R= 5,1 kΩ R= 5,8 kΩ – wynik pozytywny
Próba napięciowa części czołowej $U_{pr}=1,5U_N= 27kV$, Próba napięciowa części żłobkowej $U_{pr}=3U_N= 54kV$	Izolacja powinna wytrzymać przyłożone napięcie bez przebicia oraz wyładowań powierzchniowych	– wynik pozytywny
Pomiar rezystancji izolacji przed i po próbie napięciowej.	Wartość rezystancji $R_{IZ}>100M\Omega$ przy pomiarze napięciem $U=5000V$	przed próbą $R= 272000M\Omega$ po próbie $R= 284000M\Omega$
Pomiar współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ izolacji głównej części prostej	Wartość $tg\delta$ mierzona z pierścieniami ekranującymi w zakresie $0,2\div 2U_N$ powinna wynosić: - $tg\delta$ przy $0,2U_N \leq 3\%$, - dla przedziału $0,2U_N < 0,5\%$	– wynik pozytywny, wyniki zestawiono w tabeli 5.2.
Pomiar poziomu wyładowań niezupełnych	$U_p \geq U_N=10kV$ – napięcie początkowe wyładowań wyższe od napięcia fazowego, $Q_{max} \leq 50 nC$ – ładunek maksymalny przy pomiarze analitycznym $1,5U_N/2min$	przed próbą napięciową $U_Z= 5,0 kV$, wynik negatywny , po próbie napięciowej $U_z= 5,0 kV$, ładunek w pomiarze analitycznym $Q= 13,5 nC$

Tabela 5.7. Wyniki pomiaru współczynnika strat dielektrycznych

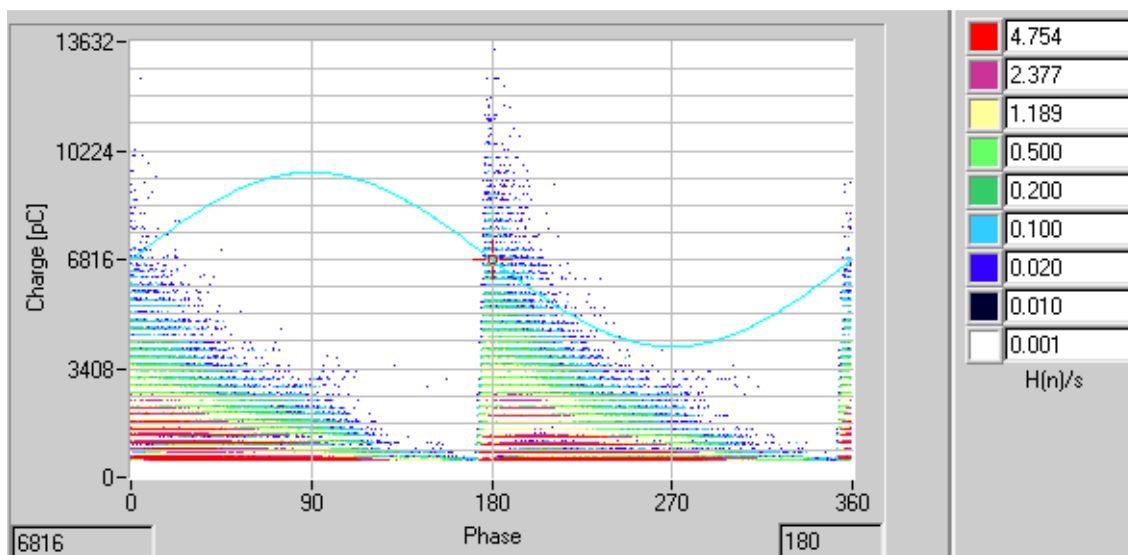
U/Un	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,6	2,0	$\Delta \text{tg}\delta/0,2U_N$
U [V]	3 600	7 200	10 800	14 400	18 000	21 600	28 800	36 000	MAX [%]
tg δ [%]	0,64	0,98	1,11	1,23	1,38	1,45	1,63	1,74	0,34

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono zwiększony przyrost współczynnika strat dielektrycznych w zakresie napięć $0,2U_n \div 0,4U_n$. Wartość przyrostu maksymalnego wyraźnie odbiega od wyników pozostałych prętów lecz spełnia ona wymagania PBiP. Pomiar wnz wykazał niepokojąco niskie napięcie zapłonu wyładowań $U_z=5\text{kV}$ (rys. 5.19). Wartość ładunku szybko narasta i wraz ze wzrostem zasilania ładunek maksymalny maleje. Przenośnym lokalizatorem wnz wykryto w części prostej źródło występowania wnz. Poprzez mechaniczne ostukiwanie pręta w okolicy wskazań detektora, stwierdzono pustą przestrzeń na szerokim boku cewki na długości około 30cm. Po zdjęciu fragmentu izolacji pręta stwierdzono rozwarstwienie pomiędzy izolacją główną a miedzią pręta.



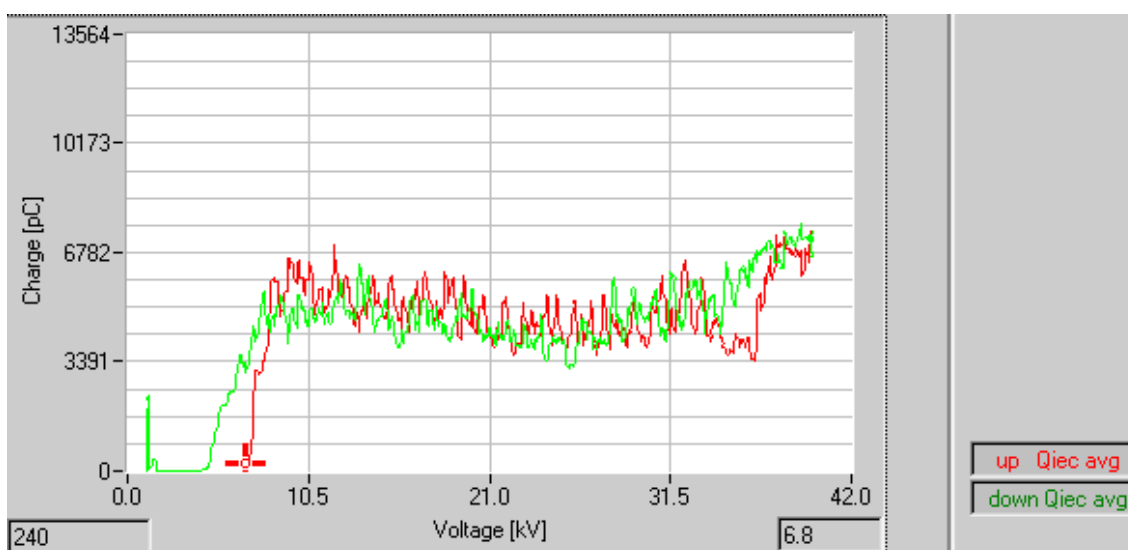
Rys. 5.19. Krzywa qV pręta stojana z wadą typu rozwarstwienie izolacji

Analiza wnz przy wartości napięcia $U=1,5U_n$ wskazuje na symetryczny rozkład ładunków w dodatniej oraz ujemnej części sinusoidy napięcia zasilania z koncentracją ekstremum w kącie fazowym napięcia 0^0 oraz 180^0 . Ładunki maksymalne osiągają wartości kilkunastu do kilkudziesięciu nC a powtarzalność występowania wnz sięga kilkadziesiąt tysięcy impulsów na sekundę ($n>1000$). Rozkład gęstości ładunku dla tego typu defektu obrazuje rys. 5.20.

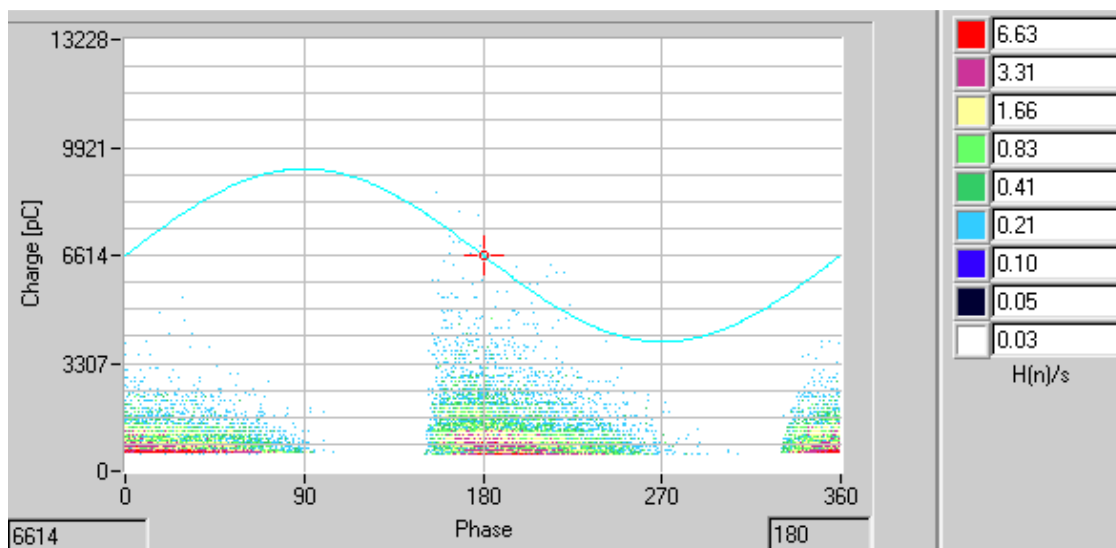


Rys. 5.20. Rozkład gęstości ładunku dla wady typu rozwarstwienie izolacji

Wynik pomiaru nie jest jednostkowy. Wada tego typu została wielokrotnie zdiagnozowana na podstawie pomiaru wnz oraz została potwierdzona po zdjęciu izolacji pręta. Wyniki badań innego przykładowego pręta obrazują rys. 5.21 oraz rys. 5.22.

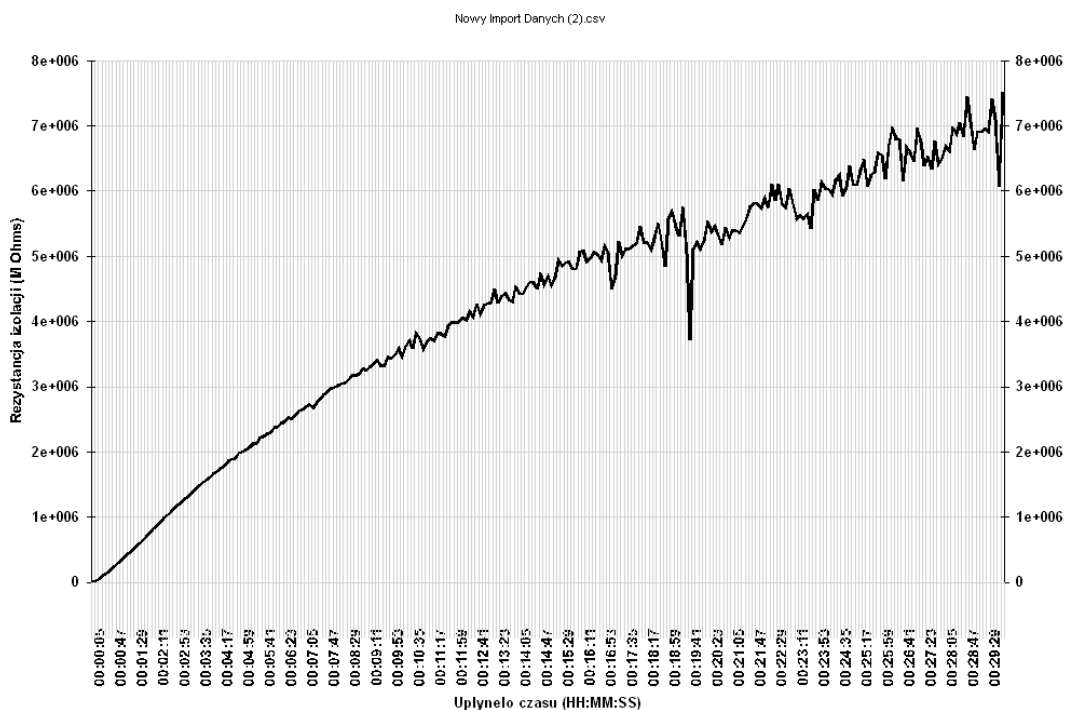


Rys. 5.21. Krzywa qV pręta stojana z wadą typu rozwarstwienie izolacji

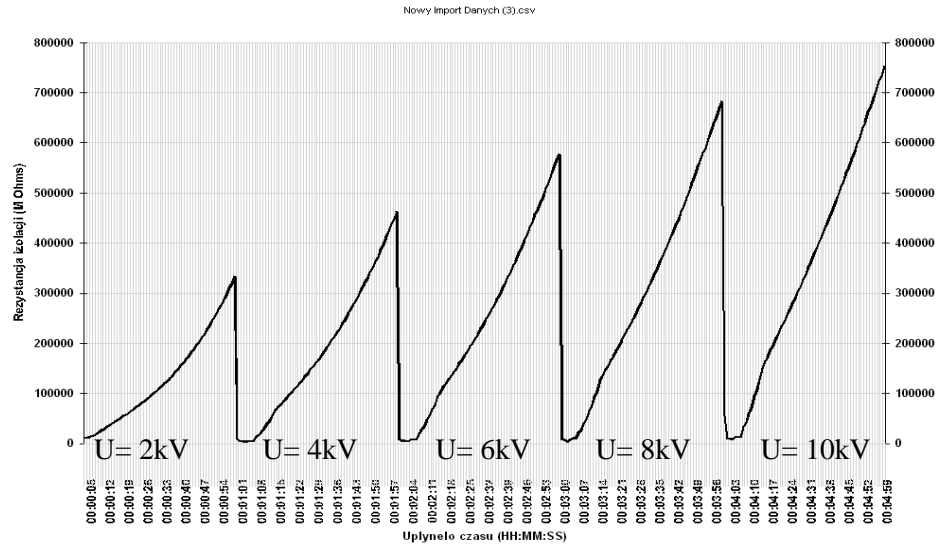


Rys. 5.22. Rozkład gęstości ładunku dla wady typu rozwarstwienie izolacji

Analogicznie jak w poprzednim przypadku przeprowadzono kompleksową diagnostykę napięciem stałym. Przeprowadzony test Meggera wskazuje na duże wahania prądu podczas ładowania układu izolacyjnego napięciem stałym o wartości $U=10\text{kV}$ (rys. 5.23). Wynik badania napięciem schodkowym SV wskazuje na ciągłe ładowanie się układu izolacyjnego (rys. 5.24). Pozostałe wskaźniki diagnostyczne otrzymane podczas testy Meggera (tabela 5.8.) nie wykazały żadnego defektu izolacji.

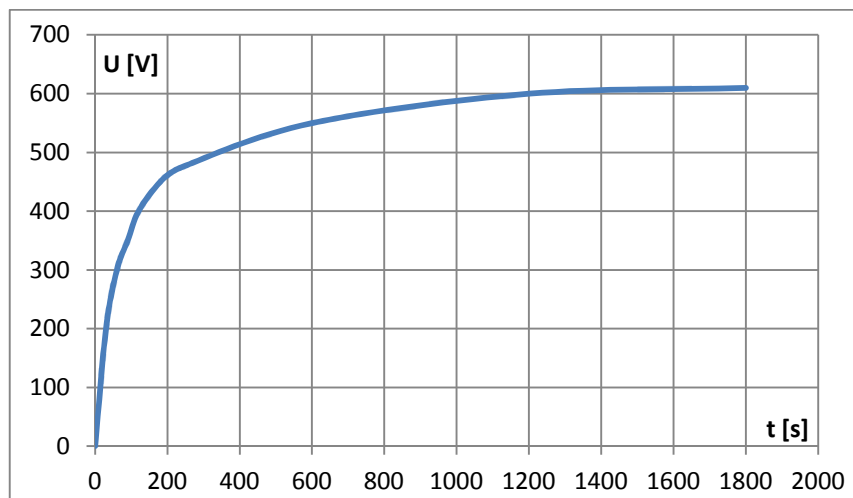


Rys. 5.23. Przebieg pomiaru rezystancji izolacji pręta z wadą typu rozwarstwienie

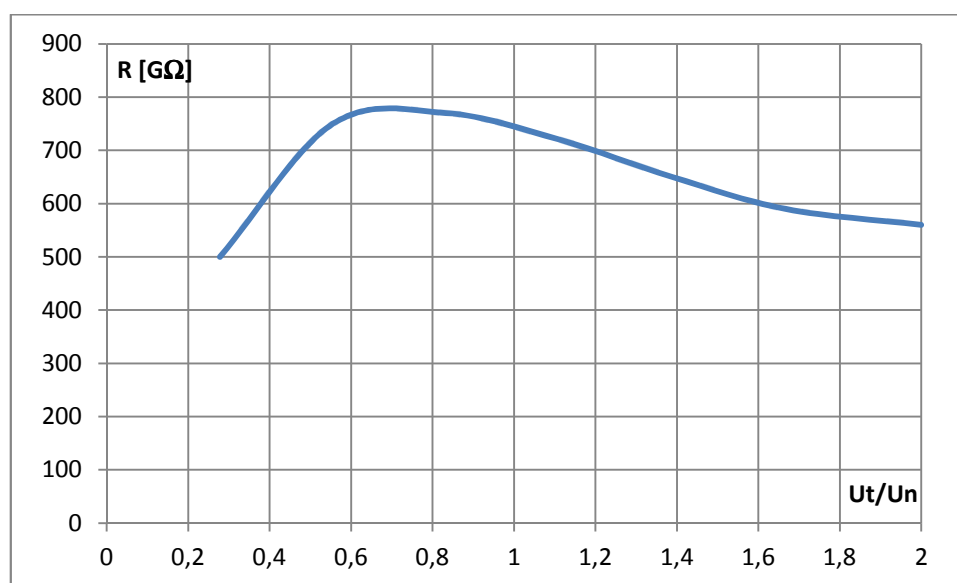


Rys. 5.24. Test napięciem schodkowym pręta z wadą typu rozwarstwienie

Przeprowadzono diagnostykę izolacji napięciem stałym w oparciu o metodę prof. Tadeusza Glinki. Naładowanie układu izolacyjnego zostało przeprowadzone przy zasilaniu pręta napięciem znamionowym $U=18\text{kV}$ w czasie $t=30\text{min}$. Po upływie czasu ładowania zwarto układ izolacyjny na czas $t=30\text{s}$ po czym rozpoczęto pomiar odbudowy napięcia kilowoltmierzem elektrostatycznym. Przebieg odbudowy napięcia przedstawia rys. 5.24. Podjęto próbę wyznaczenia hipotetycznego napięcia przebicia izolacji w zakresie napięcia do $2,0 U_n$. Na podstawie wyników pomiaru przedstawionych na rys. 5.25 napięcie to nie może zostać wyznaczone. Zgodnie z normami oraz poradnikami [37,93,47,79] do dalszych obliczeń współczynników diagnostycznych przyjęto wartość napięcia przebicia równą $U_p=3U_n$.



Rys. 5.25. Przebieg odbudowy napięcia



Rys. 5.26. Wykres rezystancji izolacji $R_{60} = f(U_t/U_n)$

Tabela 5.8. Zestawienie wyników pomiarów pręta stojana GDH 7262S -12

Parametr układu izolacyjnego	Wynik pomiaru	Ocena stanu technicznego
Rezystancja izolacji R_{60} [MΩ]	338000	Bardzo dobry
Współczynnik absorpcji k	7,61	Bardzo dobry
Współczynnik polaryzacji PI	10,29	Bardzo dobry
Współczynnik rozładowania dielektryka DD	1,01	Bardzo dobry
Maksymalna odchyłka rezystancji izolacji w teście SV ΔR_{max} [%]	-38%	Niezadawalający
Napięcie przebicia U_p/U_n	3	5pkt
Rezystancja R_{60}/U_n [kΩ/V]	21460	5pkt
Czas zwarcia dla t_z [s]	30	5pkt
Maksymalna wartość odbudowanego napięcia $U_{od\ max}/U_o$	0,033	4pkt
Czas odbudowy napięcia t_{od} [s]	1400	5pkt
Wahania prądu upływu przy U_N	0,52	4pkt
Współczynnik i_{p15}/i_{p60}	7,61	5pkt
Współczynnik DFL	0,043	Dobry

Pręt podczas rutynowych pomiarów elektrycznych zawartych w PBiP został zdyskwalifikowany na podstawie pomiaru wnz. Pomiar współczynnika strat dielektrycznych spełniał wymagania PBiP gdyż wada miała charakter lokalny. Przyrosty współczynnika strat dielektrycznych odbiegały jednak wartością od pozostałych. Pomiary prądem stałym wykazały duże wahania prądu po ustabilizowaniu się procesów polaryzacyjnych. Wartość rezystancji izolacji ze względu na grubą ściankę izolacji głównej pręta osiąga bardzo duże wartości sięgające setek gigaomów. Pomiar napięciem schodkowym nie daje miarodajnych wyników gdyż wartość rezystancji izolacji w szerokim zakresie badanego napięcia osiąga bardzo duże wartości (rys. 5.26). Wyniki pomiarów metodą prof. Tadeusza Glinki w dwóch przypadkach kwalifikują pręt na 4 pkt. w pięciostopniowej skali oceny. Wynik ten również dyskwalifikuje wyrób w postaci pręta, który nie może wykazywać żadnych osłabień układu izolacyjnego.

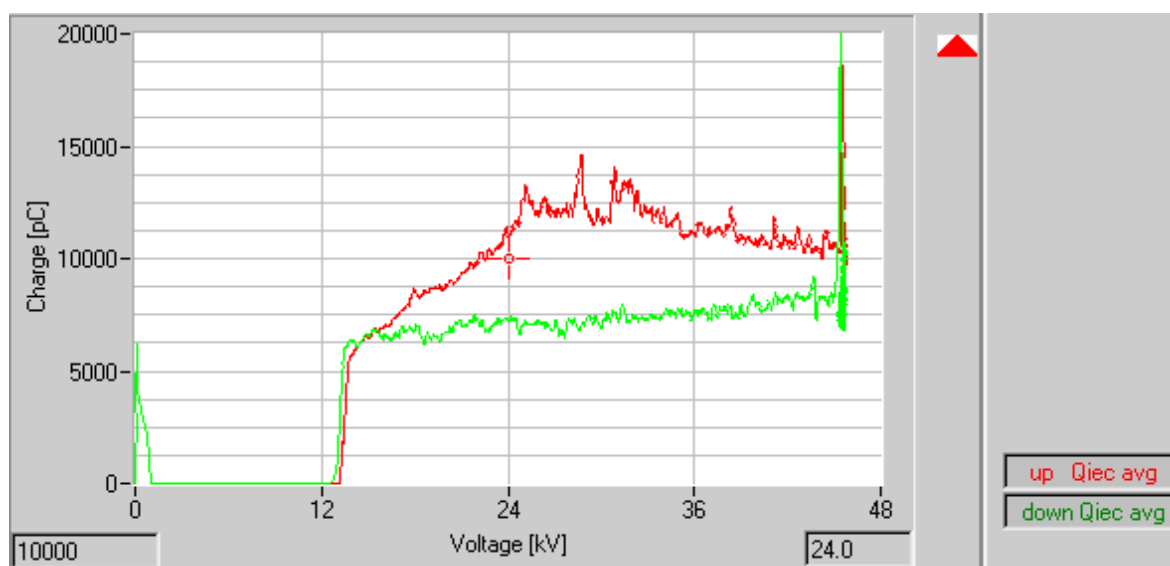
5.2.3. Analiza defektu typu zanieczyszczenie powierzchniowe izolacji

Występowanie wyładowań niezupełnych o dużej wartości lub też niskie napięcie zapłonu wnz (poniżej wymagań technologii) nie zawsze dyskwalifikuje pręt, co skutkuje wymianą jego izolacji głównej. Często wyładowania są skutkiem niedokładnego wykonania powłok półprzewodzących lub też zanieczyszczeń powierzchniowych skutkujących wyładowaniami powierzchniowymi. Przykładem może być zanieczyszczony lub zbyt krótki odcinek izolacji pomiędzy skuwką pręta a końcem warstwy półprzewodzącej na czole uzwojenia (rys. 5.27) .

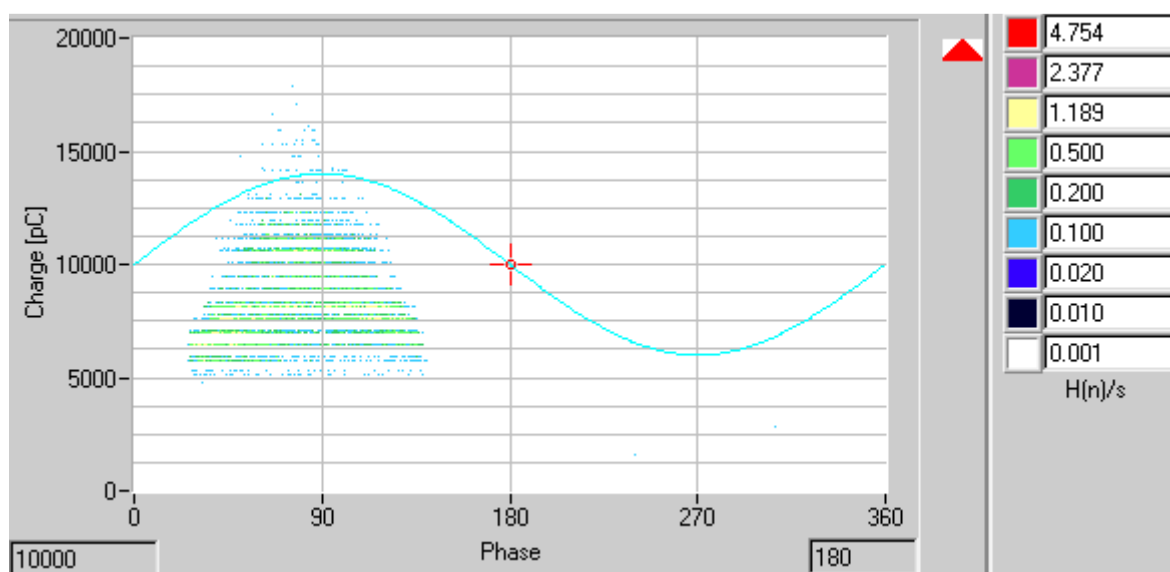


Rys. 5.27. Pręt stojana generatora z nieprawidłowo nałożonym lakierem półprzewodzącym

W tym przypadku obserwuje się niskie napięcie zapłonu wyładowań, wysoki ładunek wnz oraz powtarzalność wyniku badań podczas kolejnych prób napięciowych pręta. (rys. 5.28). Napięcie zapłonu dla prętów z wadami tego typu wynosiło od $U_z = 8\text{kV} \div 12\text{kV}$ przy dopuszczalnym poziomie $U_z > 15\text{kV}$. Wyniki pomiaru wnz nie spełniają więc wymagań technologii i pręt w takim stanie technicznym nie nadaje się do montażu w stojanie. Wadę tego typu charakteryzuje koncentracja ładunku w przedziale fazowym napięcia zasilania $30^\circ \div 150^\circ$ (rys. 5.29), co odpowiada wyładowaniom koronowym – ostrzowym z elektrodą na potencjale uziemienia.



Rys. 5.28 Krzywa qV pręta z zanieczyszczoną izolacją powierzchniową

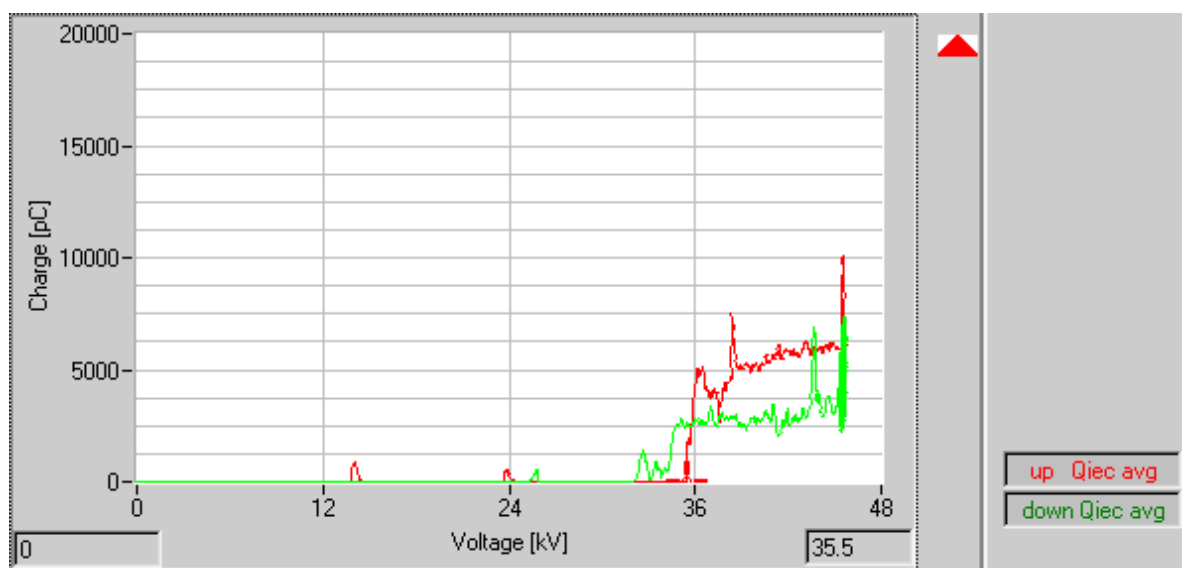


Rys. 5.29 Rozkład gęstości ładunku wnz pręta z zanieczyszczoną izolacją powierzchniową

Pozostałe wyniki pomiarów elektrycznych takie jak:

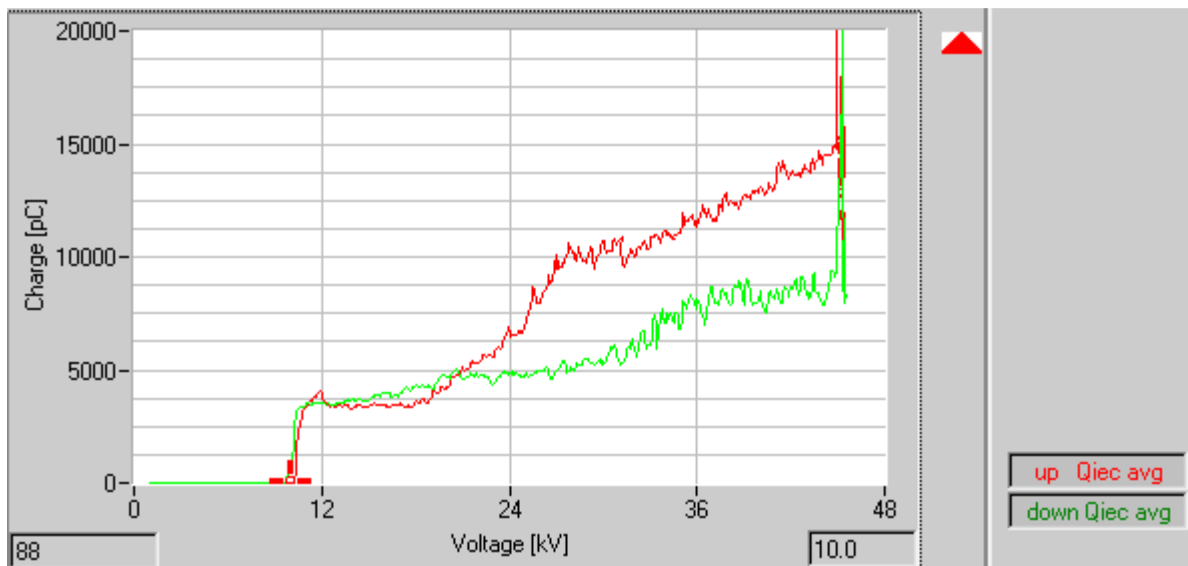
- próba napięciowa,
- pomiar współczynnika strat dielektrycznych w zakresie $0 - 2 U_n$,
- test Meggera w zakresie napięcia $0 - 10kV$,
- diagnostyka metodą prof. Tadeusza Glinki w zakresie napięcia $0 - 1 U_n$,

nie wykazały żadnych nieprawidłowości a wyniki badań znacznie przekraczały dopuszczalne poziomy. Defekt został rozpoznany poprzez pomiar i analizę wnz dzięki czemu udało się uniknąć kosztownego procesu wykonania nowej izolacji pręta. Po oczyszczeniu izolacji wynik pomiaru wnz dał rezultat pozytywny (rys. 5.30).

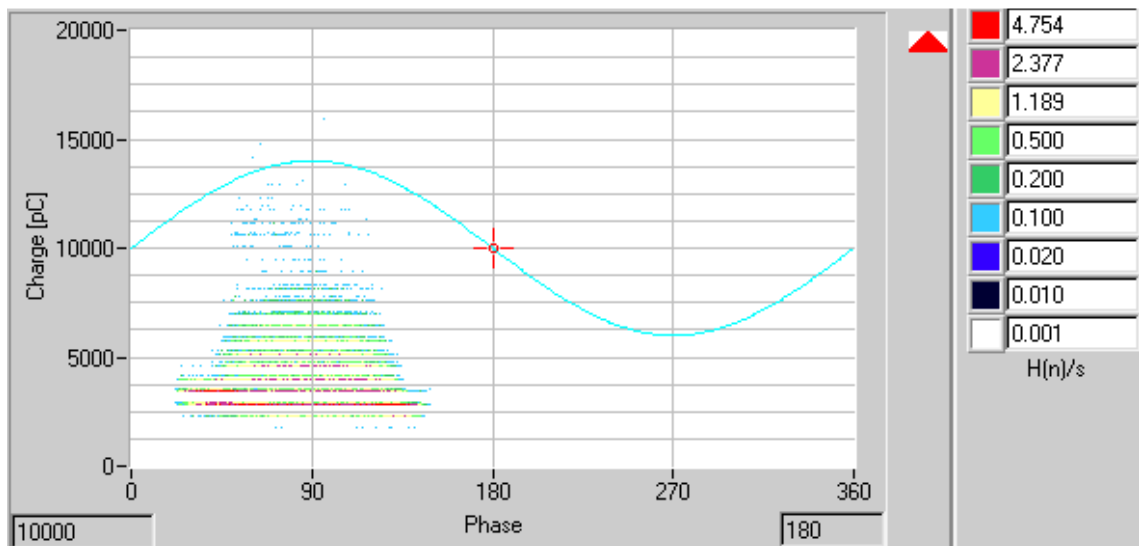


Rys. 5.30 Krzywa qV pręta po oczyszczeniu izolacji

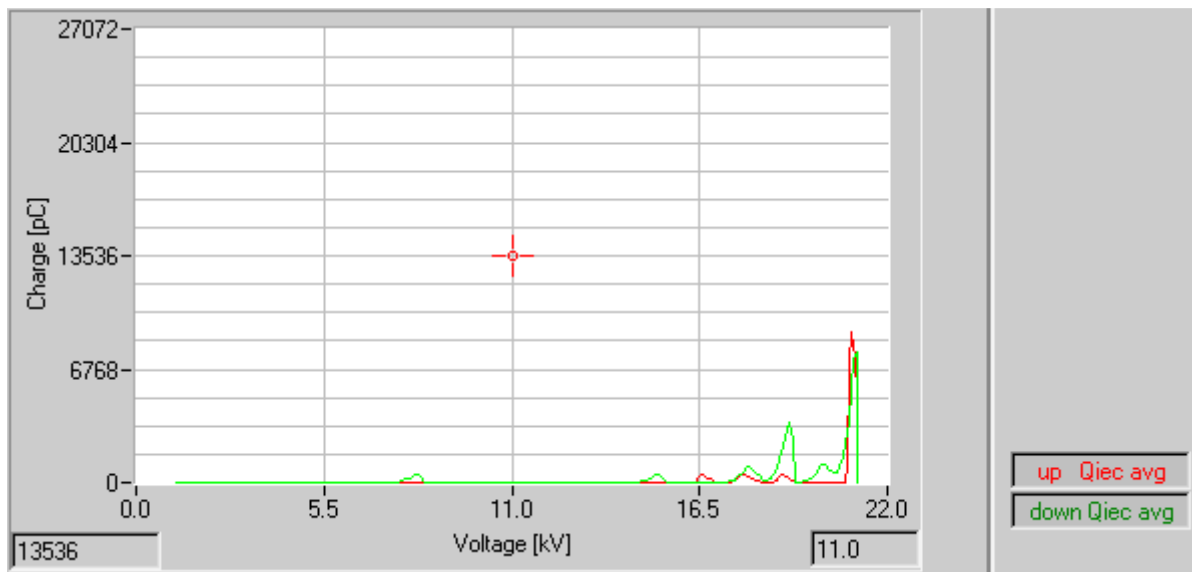
Wada tego typu jest zawsze wykryta wyłącznie przy pomocy pomiaru wnz metodą elektryczną. Z uwagi na fakt, że wada występuje w pobliżu wysokiego napięcia nie ma możliwości lokalizacji przenośnym analizatorem wnz. Dzięki powtarzalności wyników analizy wnz (rys. 5.31÷5.33) uzyskuje się bardzo dużą skuteczność lokalizacji wady a co za tym idzie duże oszczędności czasu oraz kosztów wytwarzania uzwojenia.



Rys. 5.31 Krzywa qV pręta z zanieczyszczoną izolacją powierzchniową



Rys. 5.32 Rozkład gęstości ładunku wzdłuż pręta z zanieczyszczoną izolacją powierzchniową



Rys. 5.33 Krzywa qV pręta po oczyszczeniu izolacji

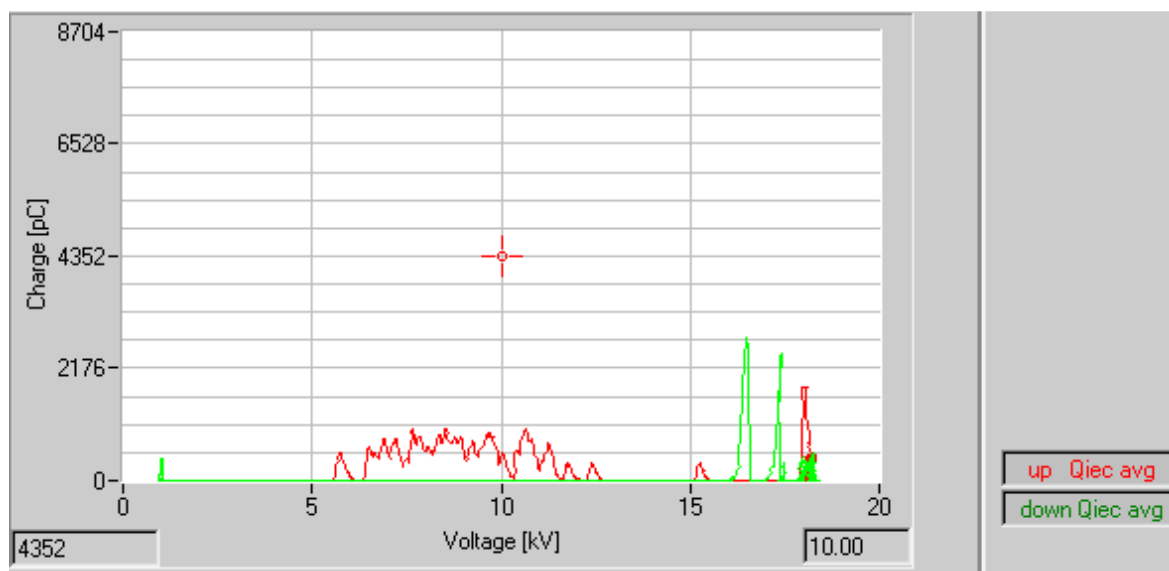
5.2.4. Analiza defektu typu nieciągłości w zewnętrznej ochronie przeciwjarzeniowej pręta

Kolejną wadą, która nie dyskwalifikuje uzwojenia pod względem jakości izolacji jest niedostatecznie utwardzony lakier przewodzący w części prostej stosowany w niektórych rozwiązaniach zamiast taśmy przewodzącej.

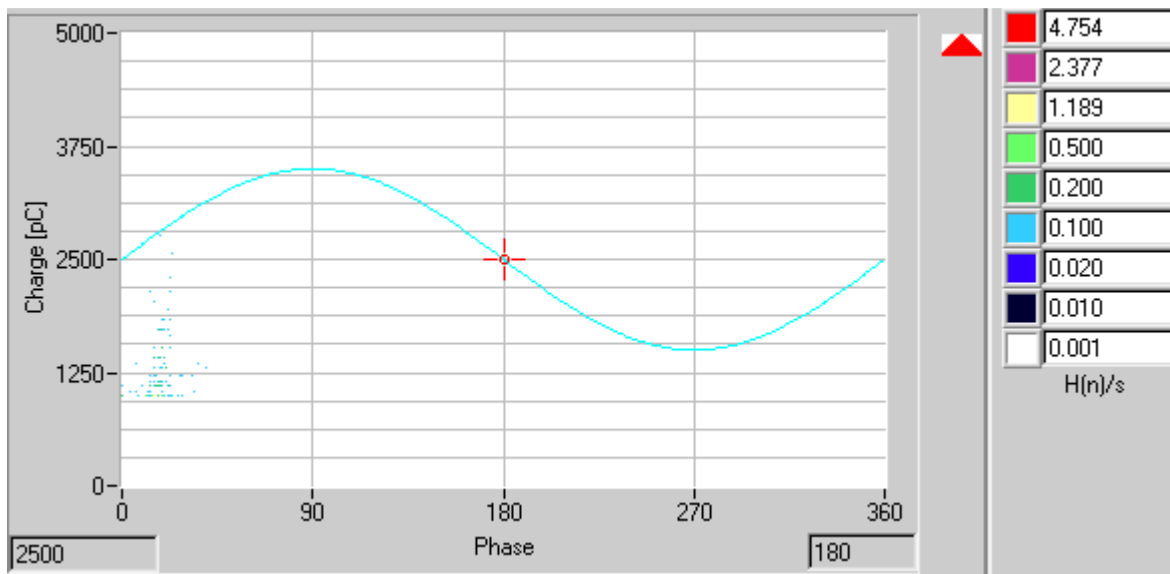


Rys. 5.34 Cewki generatora ASEA GTP 55/140

Poniższy rys. 5.35. obrazuje krzywą qV cewki stojana generatora ASEA GTP 55/140 (rys. 5.34) na napięciu $U= 6300V$. Napięcie zapłonu wyładowań przed próbą napięciową zawierało się w granicach $3 \div 6kV$ i nie spełniało wymagań założeń technologicznych. Koncentracja ładunków w pierwszej ćwiartce napięcia zasilania (rys. 5.36) wskazuje na przyelektrodowe wyładowania. Z uwagi na fakt, że wyładowania występowały w części prostej – na potencjale masy układu można je było zlokalizować akustycznym analizatorem wnz. W większości przypadków dla tego typu wady wnz zanikały na skutek lokalnego wzrostu temperatury w miejscu występowania wnz na skutek wysokiego przyłożonego napięcia. W niektórych przypadkach pręt wymagał suszenia w piecu co skutkowało odparowaniem rozpuszczalników i zanikiem wnz.

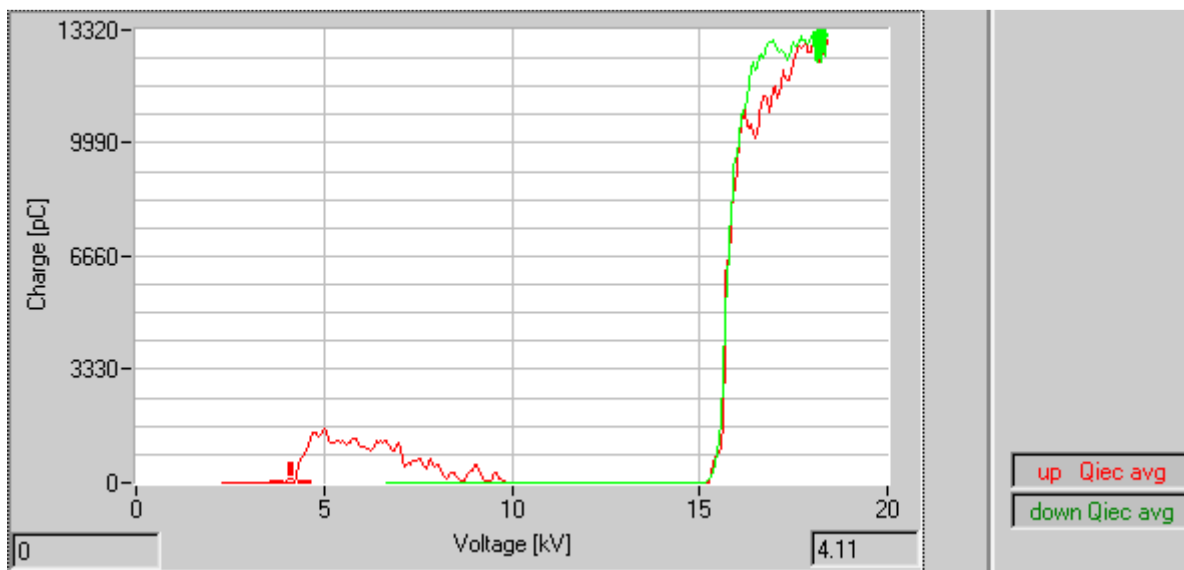


Rys. 5.35 Krzywa qV cewki z nieciągłością w zewnętrznej ochronie przeciwjarzeniowej

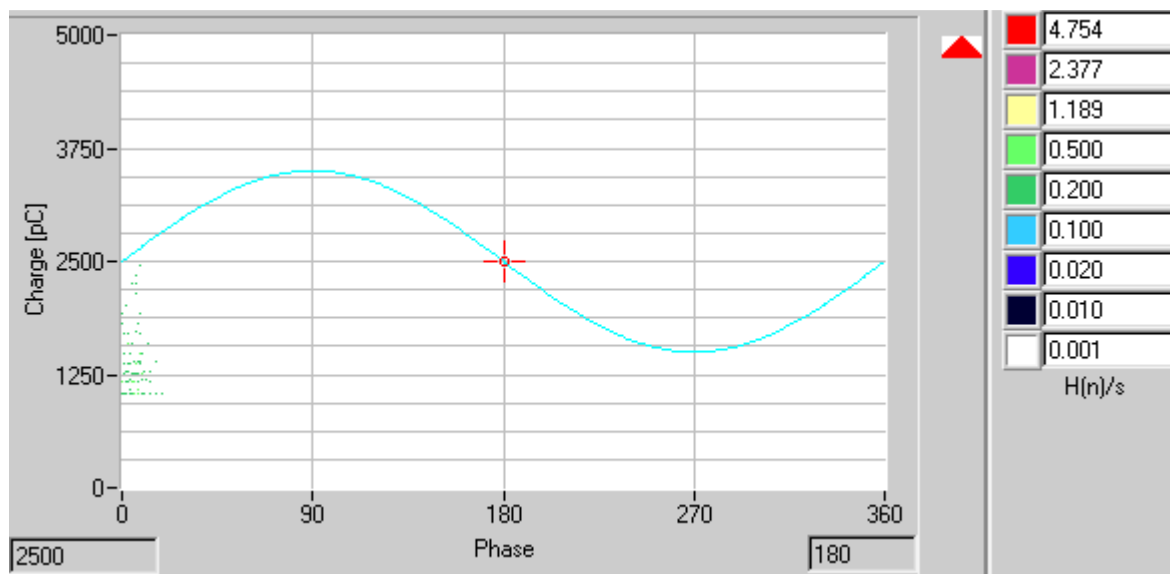


Rys. 5.36 Rozkład gęstości ładunku wnz cewki z nieciągłością w zewnętrznej ochronie przeciwjarzeniowej

W tym przypadku również obserwuje się pełną powtarzalność obrazów wnz charakteryzujących omawianą wadę co przedstawiają rysunki 5.37 ÷ 5.38.



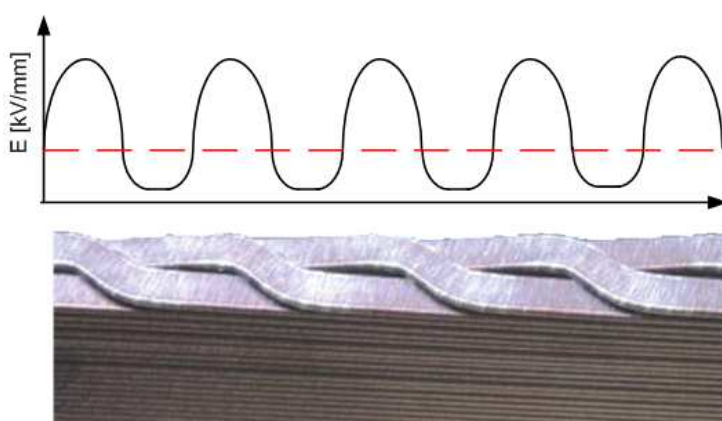
Rys. 5.37 Krzywa qV cewki z nieciągłością w zewnętrznej ochronie przeciwjarzeniowej



Rys. 5.38 Rozkład gęstości ładunku wnz cewki z nieciągłością w zewnętrznej ochronie przeciwjarzeniowej

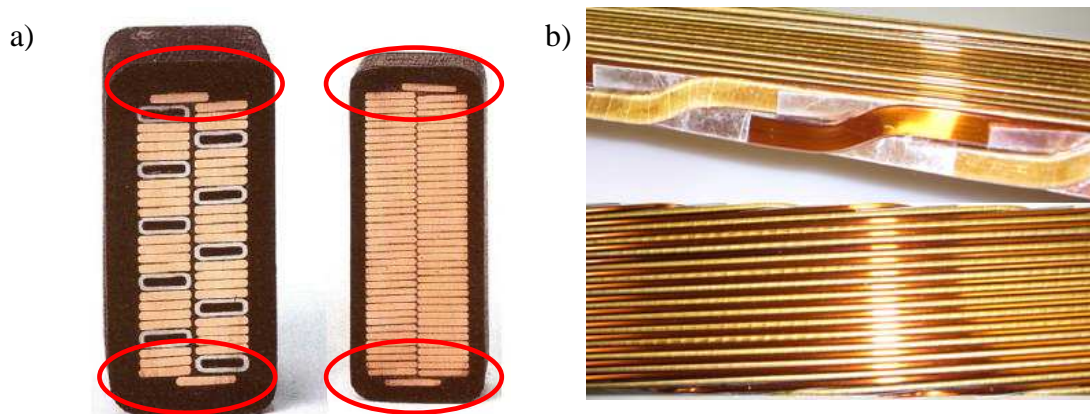
5.2.5. Analiza defektu izolacji typu uszkodzenie wewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej

Tendencje produkcji uzwojeń stojanów generatorów w technologii Resin Rich dążą do wykonania bezwyładowaniowych układów izolacyjnych. Zwiększenie poziomu napięć maszyn przy jednoczesnym zwiększeniu natężenia roboczego izolacji powoduje powstawanie wnz w obszarach przepłotów Roebła na skutek silnego pola elektrycznego o nieliniowym rozkładzie [63, 109, 62] (rys. 5.39)



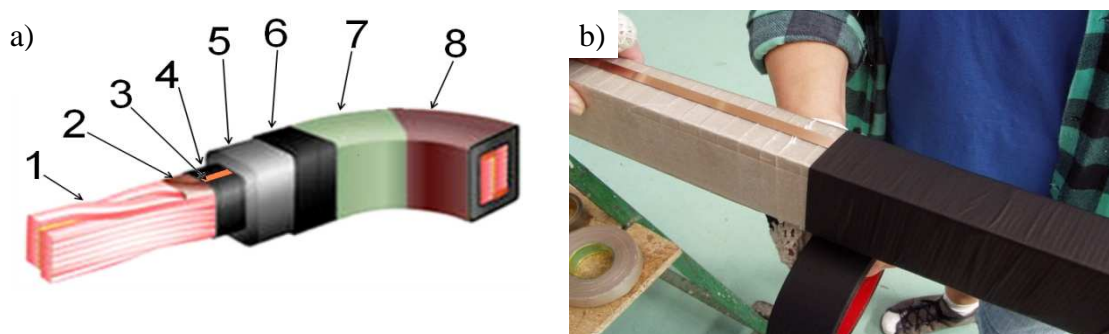
Rys. 5.39 Rozkład natężenia pola elektrycznego w miejscu przepleceń Roebła

Dotychczas stosowane wypełnienie przestrzeni pomiędzy izolacją a miedzą uzwojenia kitami półprzewodzącymi (rys. 5.40 a) nie zawsze daje oczekiwane rezultaty. Dla maszyn na napięcia $U \geq 15\text{kV}$ coraz częściej w technologii wykonania Resin Rich stosuje się tak zwaną pełną wewnętrzną ochronę przeciwwarzeniową (rys. 5.41 a,b)



Rys. 5.40. Miejsce wypełnienia przestrzeni kitem przewodzącym a), transpozycja Roebła b)

W przypadku pełnej ochrony przeciwwarzeniowej (rys.5.41) na przewodnik w części prostej – 1, nakładana jest cienka warstwa izolacji – 2, następnie na jeden z boków cewki naklejana jest folia miedziana – 3 która w jednym punkcie połączona jest galwanicznie z miedzą uzwojenia. Następną warstwę stanowi taśma przewodząca o odpowiednio dobranej oporności – 4. Na tak przygotowany pręt nanoszona jest właściwa izolacja główna – 5, na którą w części prostej nakładana jest taśma przewodząca – 6 a w części czołowej taśma półprzewodząca – 7 oraz wykończeniowa – 8.



Rys. 5.41. Pełna wewnętrzna ochrona przeciwwarzeniowa pręta: a) rysunek poglądowy, b) wykonanie ochrony

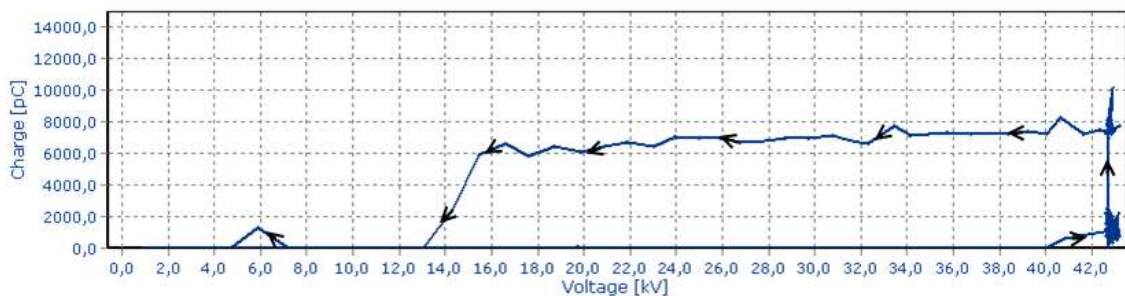
Takie rozwiązanie eliminuje lokalne naprężenia elektryczne w obszarach przepleceń Roebła (rys.5.39) powodujące występowanie wnz [109, 108]. Warstwy 2 ÷ 4 zmniejszają

grubość izolacji głównej więc muszą zostać wykonane w jak najcieńszej technologii, co niejednokrotnie prowadzi do przebicia izolacji pomiędzy miedzą uzwojenia a taśmą przewodzącą podczas przeprowadzania prób wysokonapięciowych ($U_p=3U_n$). Zjawisko takie zaobserwowano wielokrotnie. Analizie został poddany przykładowy pręt stojana generatora WY21Z-097LLT o mocy $S=185$ MVA na napięcie $U=15$ kV z uszkodzoną wewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową.



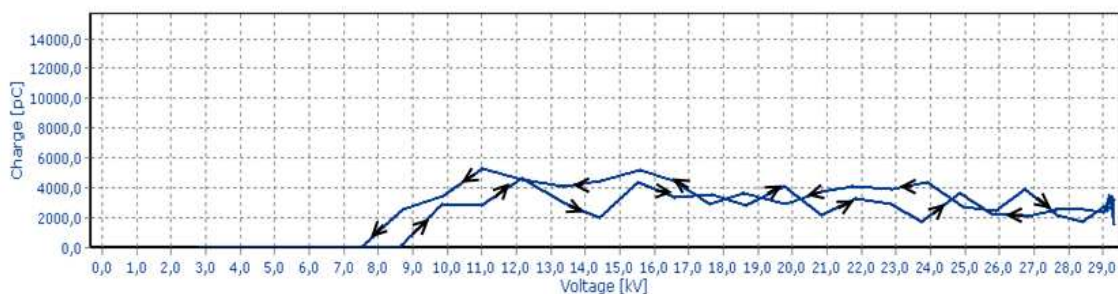
Rys. 5.42. Pręty stojana generatora WY21Z-097LLT: a) na stacji prób elektrycznych podczas próby przebicia, b) w makiecie technologicznej

Pręt przeszedł z wynikiem pozytywnym wszystkie próby elektryczne. Jednak podczas próby napięciowej zauważono niskie napięcie gaszenia wnz (rys. 5.43)



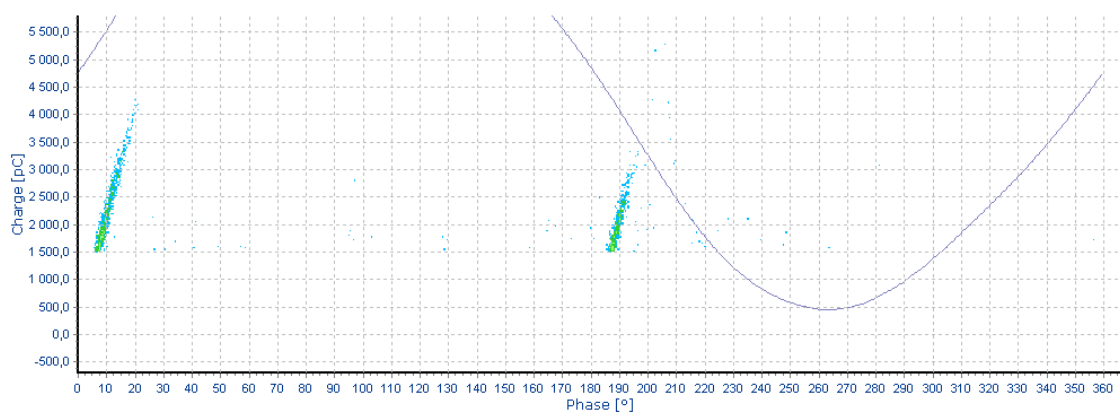
Rys. 5.43 Krzywa qV pręta z uszkodzoną wewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową

Kolejny pomiar wykazał niskie napięcie zapłonu wnz poniżej wartości dopuszczalnej w PBiP. (rys 5.44). W pozostałych wynikach pomiarów, w tym pomiaru rezystancji izolacji oraz współczynnika strat dielektrycznych nie zaobserwowano żadnych zmian.



Rys. 5.44 Krzywa qV pręta z uszkodzoną wewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową po próbie napięciowej

W pomiarze analitycznym przy wartości napięcia $U=1,5U_n$ zarejestrowano obraz wnz jak na rys. 5.45.



Rys. 5.45 Rozkład gęstości ładunku wnz pręta z uszkodzoną wewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową

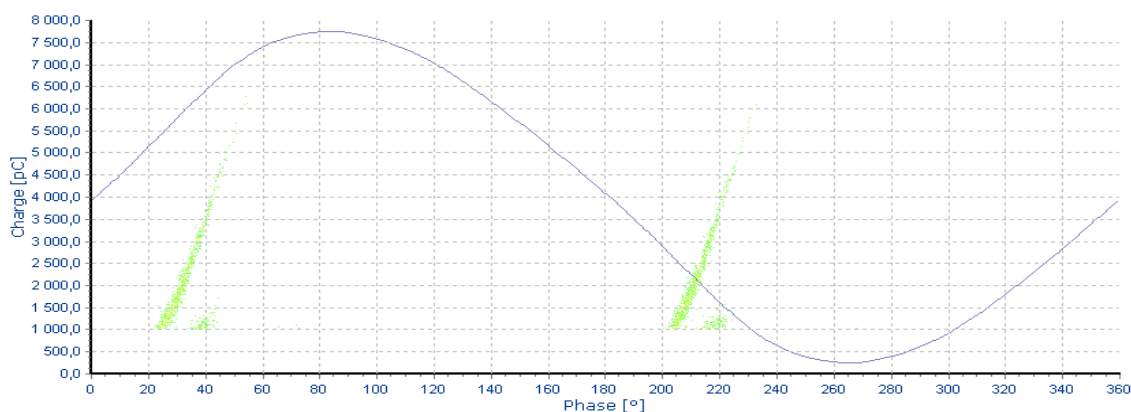
Przy pomocy przenośnego lokalizatora wnz zlokalizowano źródło wyładowań w części prostej pręta. Obraz wnz nie wskazywał na wyładowania spowodowane źle przyklejoną izolacją, rozwarstwieniami czy też uszkodzoną zewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową. Zdjęto izolację główną z pręta (rys 5.41) w miejscu połączenia taśmy miedzianej z miedzią pręta. Zmierzona rezystancja izolacji pomiędzy wewnętrznym ekranem a miedzią wynosiła:

$R= 2,3 \text{ k}\Omega$ – pomiar miernikiem uniwersalnym,

$R < 10 \text{ }\Omega$ – pomiar miernikiem rezystancji izolacji na zakresie 50V.

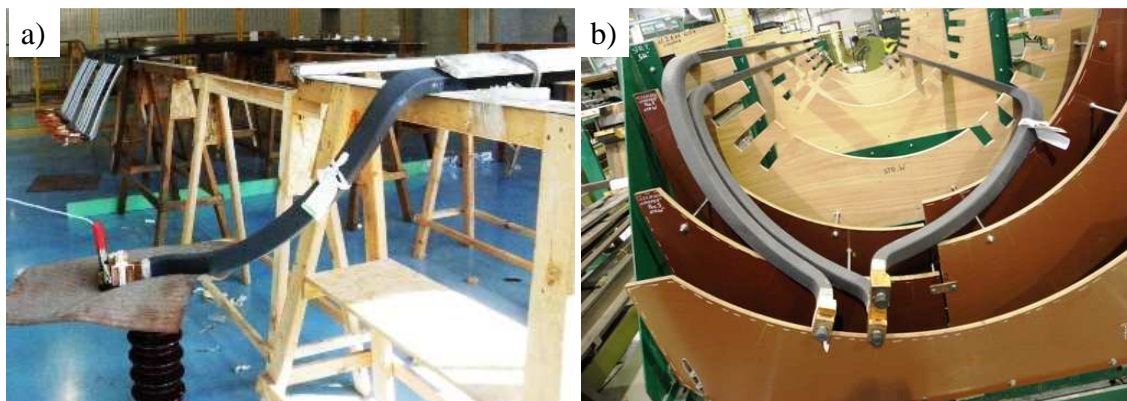
Miejsce występowania wnz było miejscem lokalnego osłabienia cienkiej izolacji pomiędzy wewnętrznym ekranem a miedzią pręta. Kąt fazowy koncentracji ładunków wnz dla tego typu uszkodzeń zawiera się w granicach $0 \div 60^0$ oraz $180 \div 240^0$. Istotną cechą

tego typu defektu jest fakt, że kąt koncentracji ładunków wzn nie zależy od wartości napięcia zasilania a jedynie od miejsca występowania defektu. Kąt ten zależy od miejsca występowania osłabienia izolacji pomiędzy ekranem a miedzią pręta. (rys. 5.41. a). W jednym pręcie może występować kilka lokalnych osłabień izolacji ekran – miedz. Wówczas na wykresie fazowo – rozdzielczym można zaobserwować kilka charakterystycznych kształtów obrazujących opisywaną wadę (rys. 5.46.).



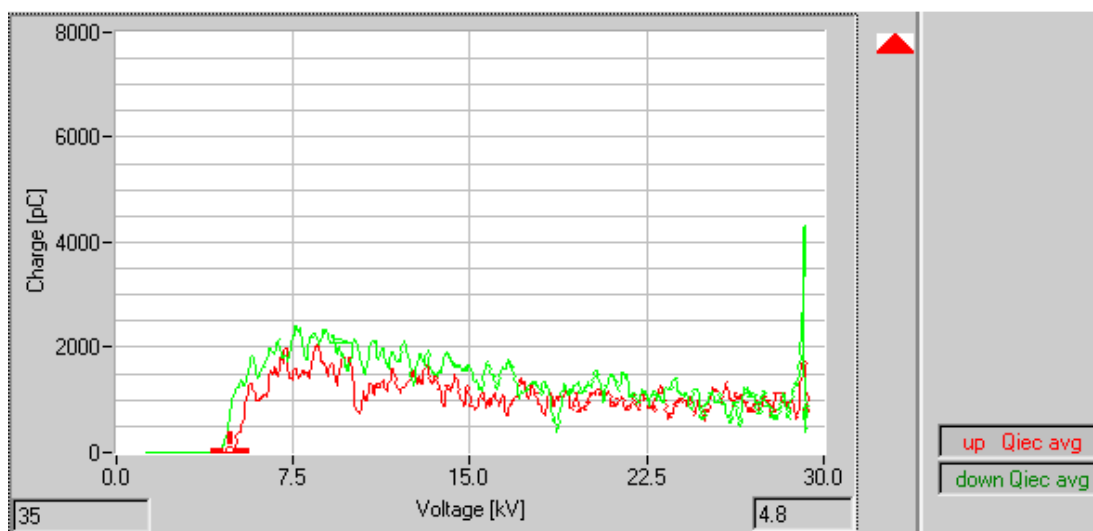
Rys. 5.46 Rozkład gęstości ładunku wzn pręta z uszkodzoną wewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową

Warunkiem skuteczności pełnej wewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej jest nie tylko jej ciągłość i dostateczna izolacja pomiędzy ekranem a przewodnikami pręta ale i odpowiednie parametry taśmy przewodzącej stanowiącej ekran. Taśma miedziana (rys. 5.41. b) rozprowadza potencjał miedzi wzdłuż całej długości części prostej pręta lecz tylko przy jednym boku pręta. Dostateczna wartość oporności taśmy przewodzącej musi zapewnić odpowiednio mały gradient natężenia pola elektrycznego na drugim boku pręta. W przypadku zastosowania taśmy o niedostatecznej oporności natężenie pola w tym miejscu może przekroczyć wartość inicjacji wyładowań niezupełnych. Zjawisko takie zaobserwowano wielokrotnie. Analizie został poddany przykładowy pręt stojana generatora GE ATB 180x325 o mocy $P=200$ MW na napięcie $U=20$ kV z wewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową o nieodpowiednich parametrach elektrycznych (rys. 5.47.).



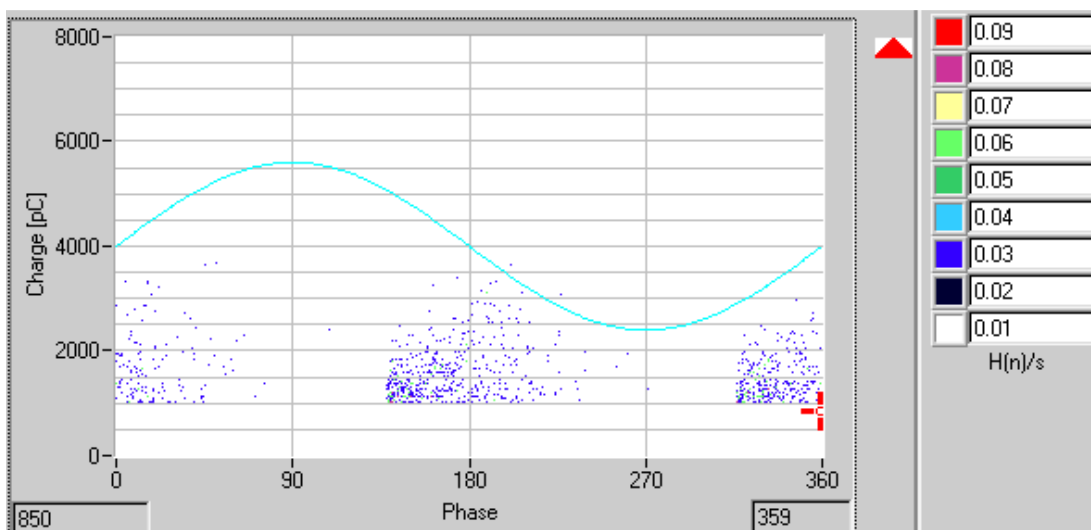
Rys. 5.47. Pręty stojana generatora GE ATB 180x325: na stacji prób elektrycznych podczas próby przebicia, b) w makiecie technologicznej

Podobnie jak we wcześniejszym przypadku wartość ładunku nie zależy od napięcia a nawet maleje wraz z jego wzrostem (rys.5.48).



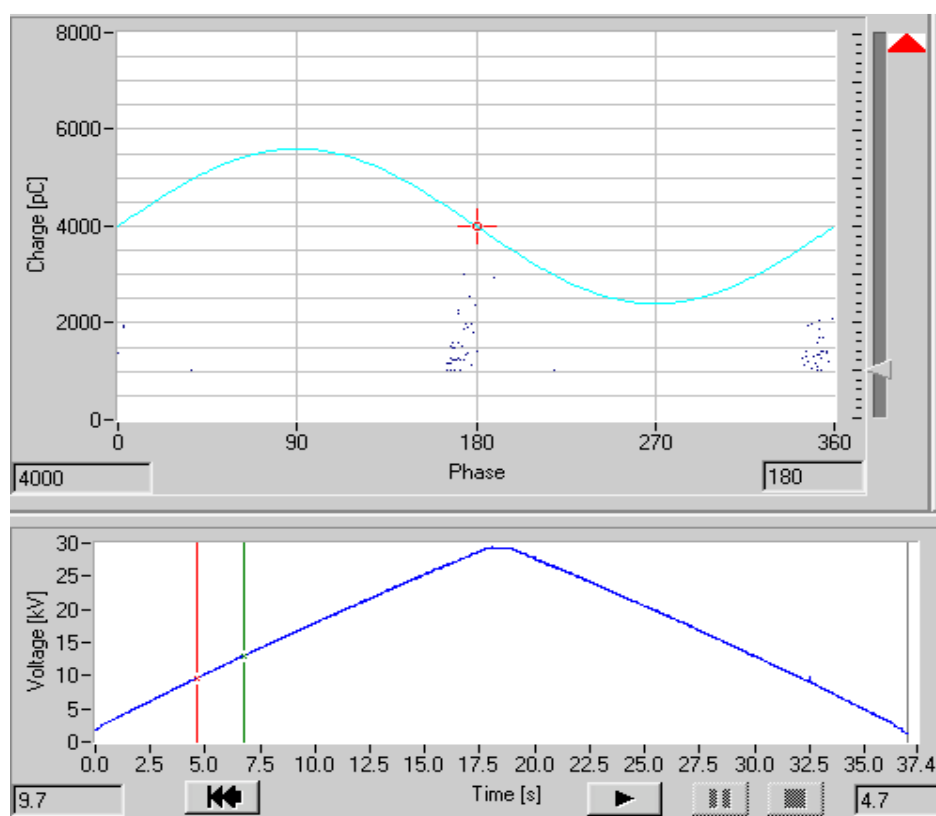
Rys. 5.48 Krzywa qV pręta ze zaprojektowaną wewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową

Istotną różnicą w tego typu defekcie jest zależność kąta koncentracji wnz od wartości napięcia zasilania. rys. 5.49. przedstawia rozkład gęstości ładunku podczas pomiaru rutynowego w zakresie badanego napięcia $0 \div 2U_n \div 0$.

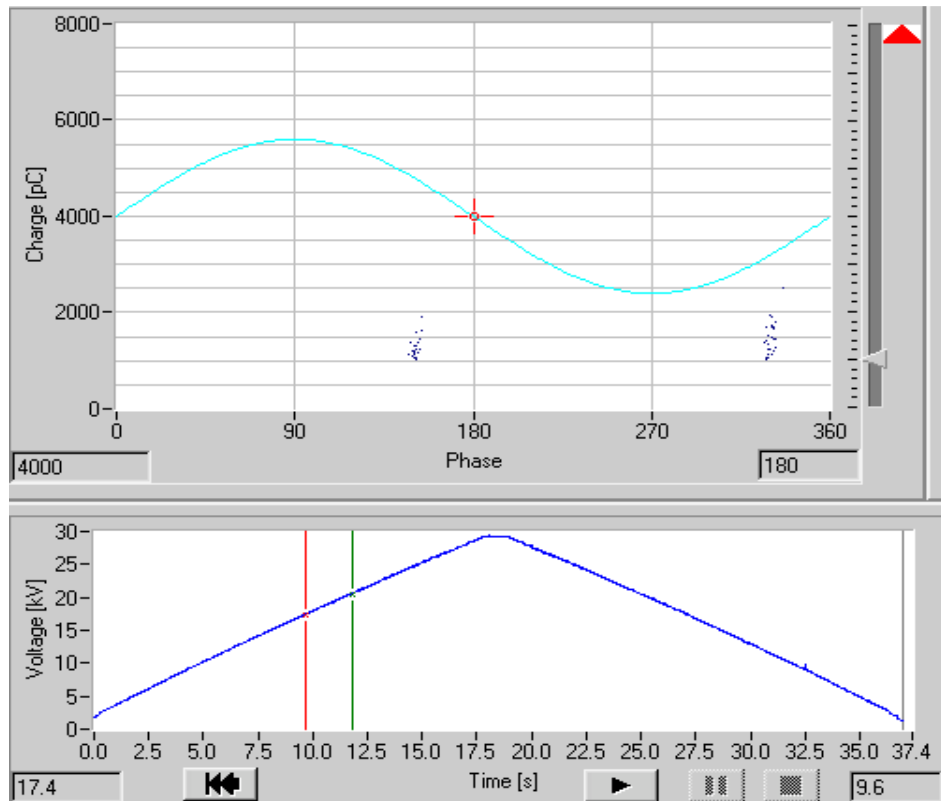


Rys. 5.49 Rozkład gęstości ładunku wzdłuż pręta ze źle zaprojektowaną wewnętrzną ochroną przeciwzwarzeniową

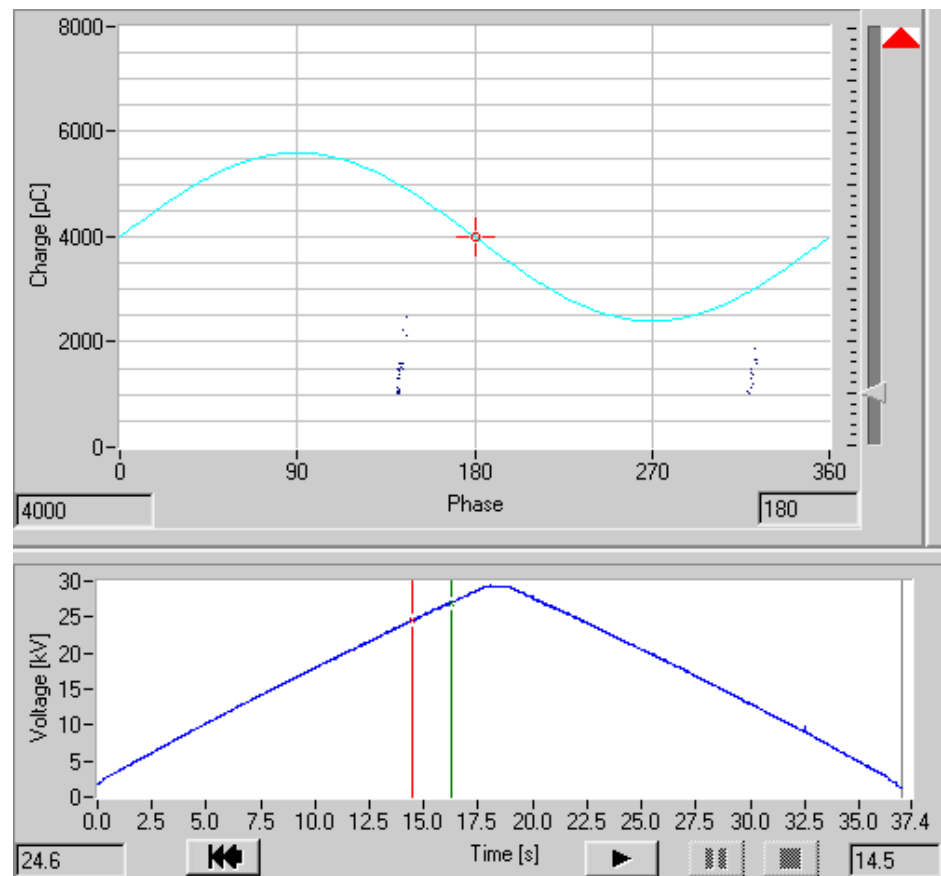
Analiza poszczególnych przedziałów napięcia zasilania wskazuje na odwrotnie proporcjonalnie zależność kąta koncentracji ładunków w stosunku do wartości napięcia zasilania (rys. 5.50, ÷5.51).



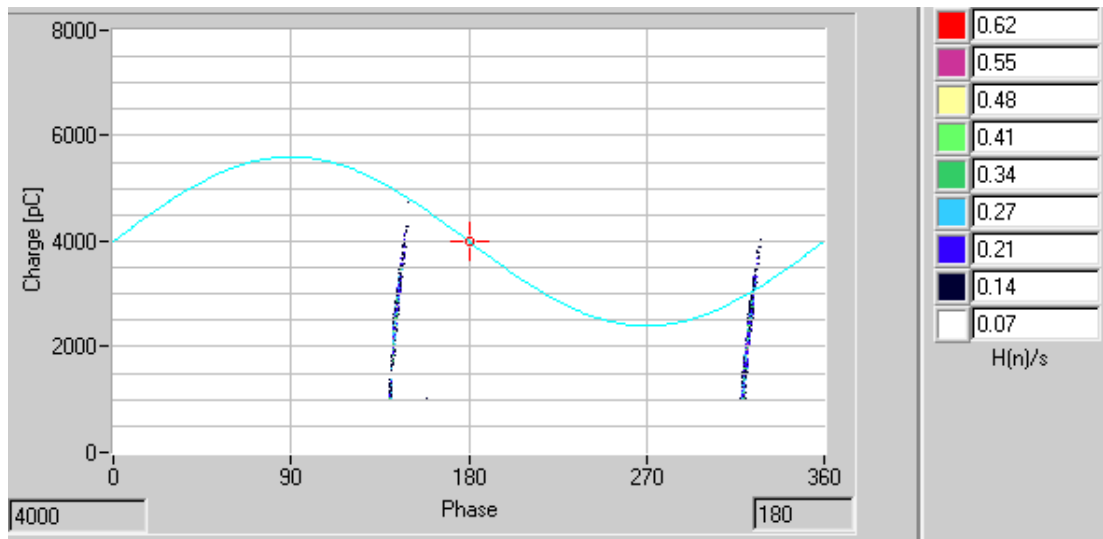
Rys. 5.50 Rozkład gęstości ładunku wzdłuż w przedziale napięć 10 ÷12kV



Rys. 5.51 Rozkład gęstości ładunku wnz w przedziale napięć 19 ÷ 21kV

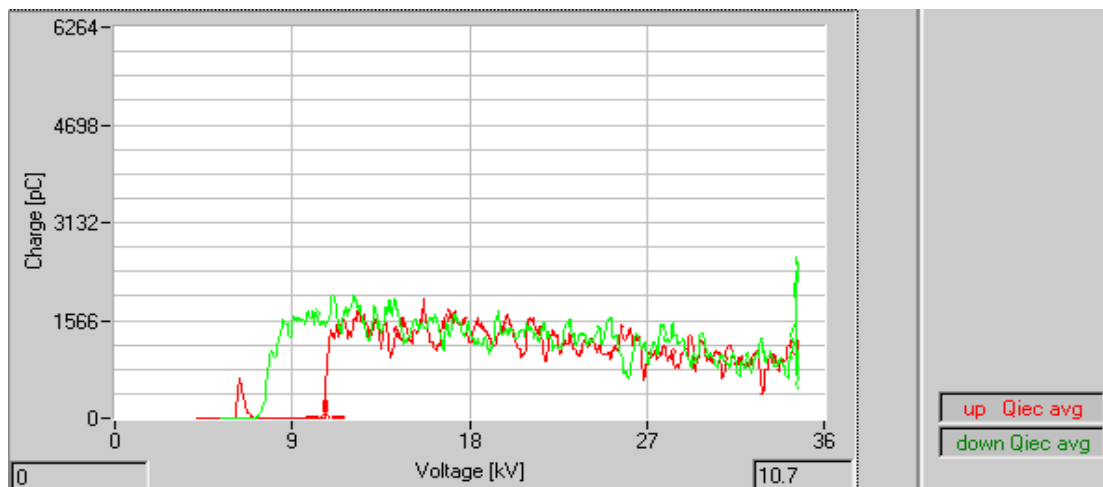


Rys. 5.52 Rozkład gęstości ładunku wnz w przedziale napięć 25 ÷ 27kV

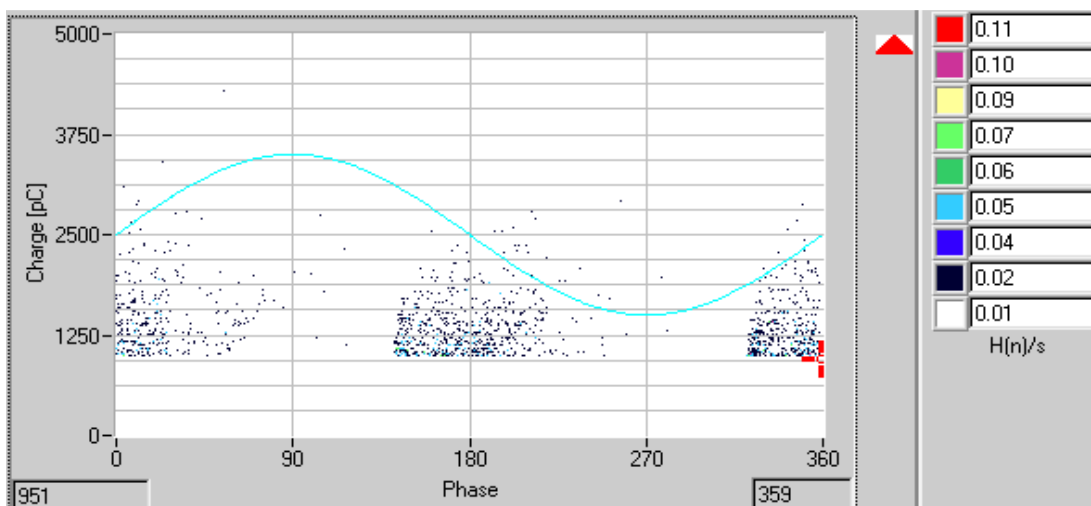


Rys. 5.53 Rozkład gęstości ładunku wnz w pomiarze analitycznym przy stałej wartości napięcia $U=1,5U_n=30kV$

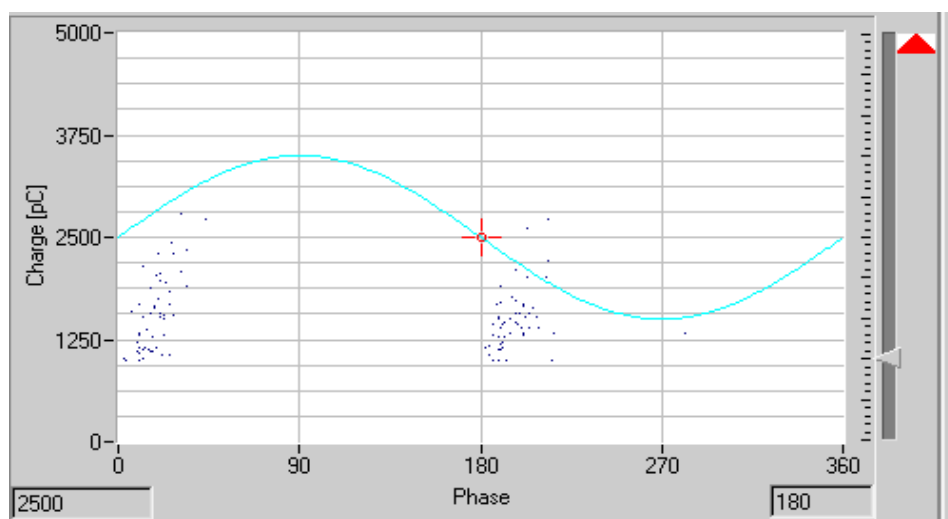
Wyniki pomiarów prętów z tą samą wadą są powtarzalne, dają jednakowe, jednoznaczne obrazy wnz co obrazują rysunki 5.54 ÷ 5.59.



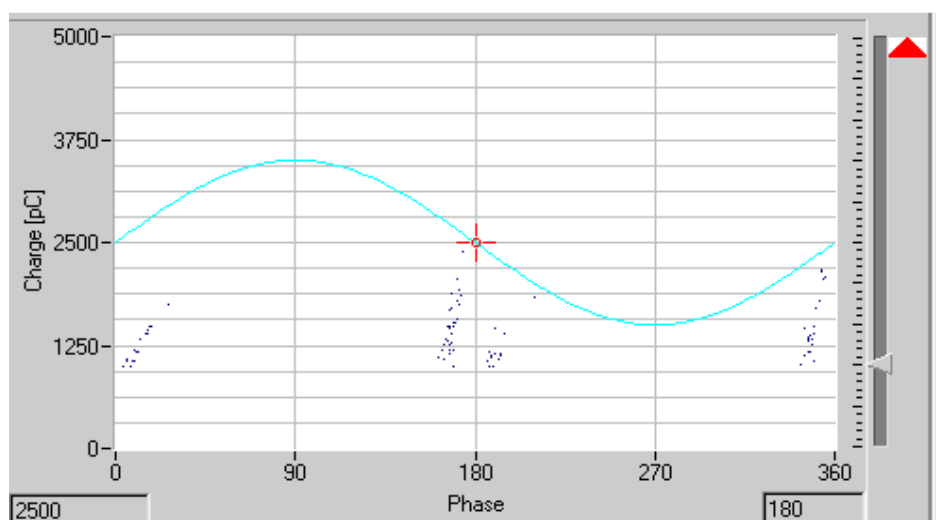
Rys. 5.54 Krzywa qV pręta z niewłaściwie zaprojektowaną wewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową



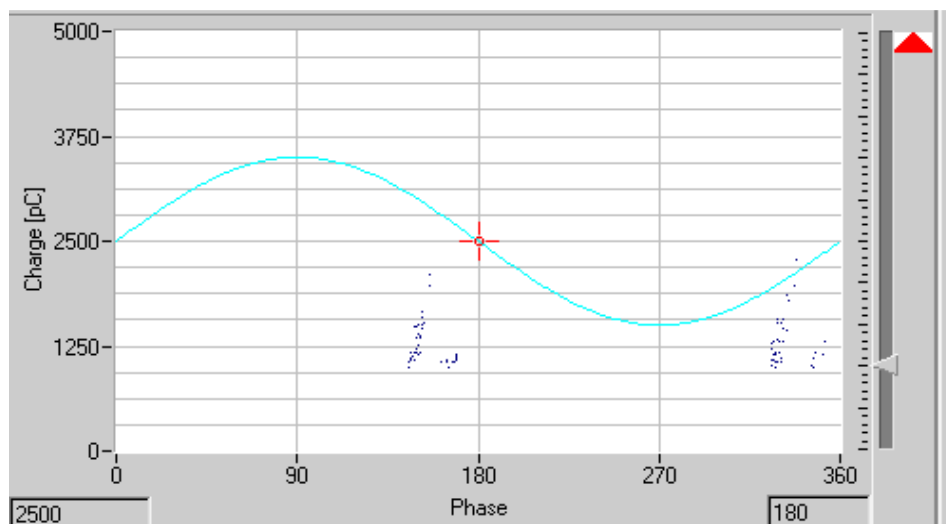
Rys. 5.55 Rozkład gęstości ładunku wnz pręta z niewłaściwie zaprojektowaną wewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową



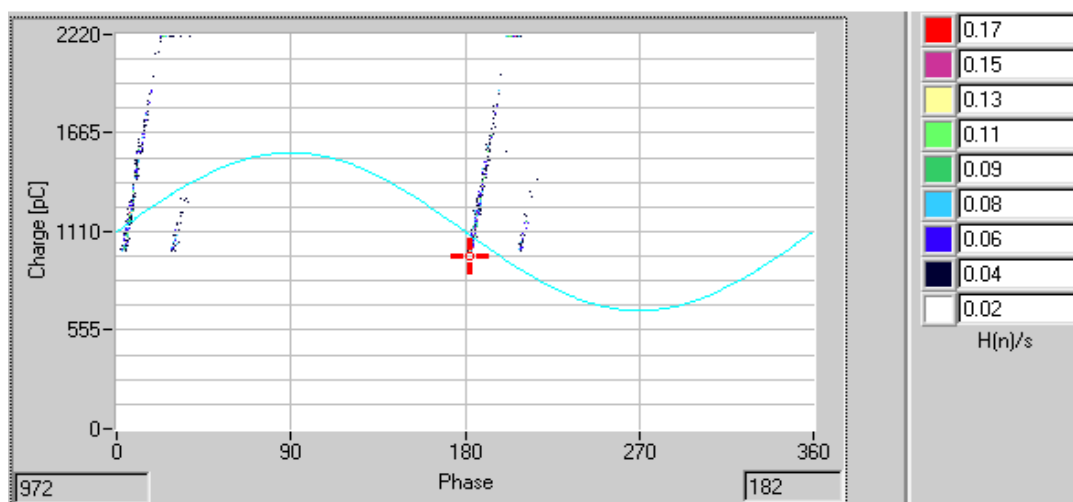
Rys. 5.56 Rozkład gęstości ładunku wnz w przedziale napięć 10 ÷ 12kV



Rys. 5.57 Rozkład gęstości ładunku wnz w przedziale napięć 17 ÷ 19kV



Rys. 5.58 Rozkład gęstości ładunku wnz w przedziale napięć $25 \div 27\text{kV}$



Rys. 5.59 Rozkład gęstości ładunku wnz w pomiarze analitycznym przy stałej wartości napięcia $U=1,0U_n=20\text{kV}$

Zastosowanie taśmy o mniejszej oporności wyeliminowało całkowicie powyższe zjawisko. Wadę tego typu można stwierdzić jedynie na podstawie analizy wnz. Jedynie przy zasilaniu pręta napięciem przemiennym występuje zwiększony gradient napięcia pomiędzy ekranem a miedzią pręta. Na podstawie pomiarów napięciem stałym nie można stwierdzić występowania wady izolacji. Szybkie rozpoznanie problemu pozwala na natychmiastową zmianę technologii wykonania uzwojenia co generuje znaczne oszczędności czasu oraz pieniędzy. Zastosowanie taśmy o mniejszej oporności wyeliminowało całkowicie powyższe zjawisko.

6. Próba starzeniowa izolacji typu Resin-Rich

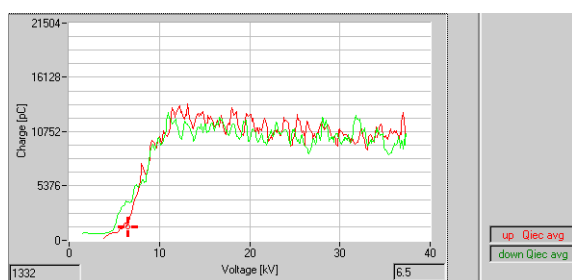
Wykonano przyspieszoną próbę starzeniową pręta hydrogeneratora typu GDH 7262S – 12 o mocy $S=335,555$ MVA na napięcie $U=18$ kV (rys. 5.18). Próbę tą przeprowadzono bazując na standardach dotyczących przeprowadzania prób starzeniowych oraz podobnych doświadczeniach innych placówek badawczych [2,4,,76,77]. W celu przeprowadzania długotrwałych prób o czasie trwania minimum 400godz autor zbudował bezobsługowe stanowisko pomiarowe zlokalizowane na dachu pomieszczenia kontrolerów stacji prób (rys. 6.1). Lokalizacja stanowiska była celowa ze względu na utrudniony, kontrolowany dostęp do miejsca przeprowadzania próby. W myśl wyżej opisanego standardu, napięcie próby dla pręta o napięciu znamionowym $U_n=18$ kV wynosi $U_p=39,1$ kV. Temperatura pręta podczas próby wynosiła $T=120^0$ C [76,77] i uzyskano ją dzięki grzałkom oporowym zamontowanym na całej długości pręta w jego części prostej. Proces nagrzewania był kontrolowany oraz rejestrowany. Zabezpieczenie prądowe nadmiarowe szybkie w obwodzie wysokiego napięcia natychmiast odcinało napięcie w razie wystąpienia przebicia oraz informowało o awarii układu.



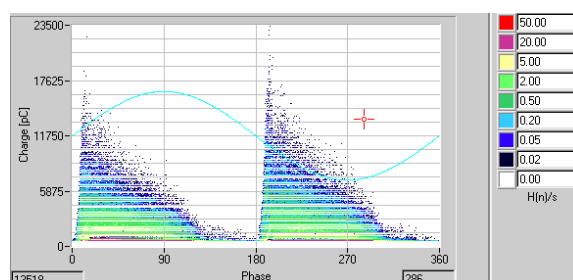
Rys. 6.1. Stanowisko do przeprowadzania prób starzeniowych uzwojeń

Do próby wykorzystano pręt z wadą technologiczną typu rozwarstwienie. Tor pomiarowy skalibrowano pod względem napięciowym oraz dokonano bezpośredniej kalibracji ładunku kalibratorem wzorcowym. Jako detektor wnz użyto kondensatora wzorcowego, który pozostał na stanowisku przez cały czas przeprowadzania próby. Celem uniknięcia błędów wynikających z kalibracji toru pomiarowego zapisano plik kalibracyjny, który był zawsze wykorzystywany przy okresowych pomiarach parametrów wnz. Przed

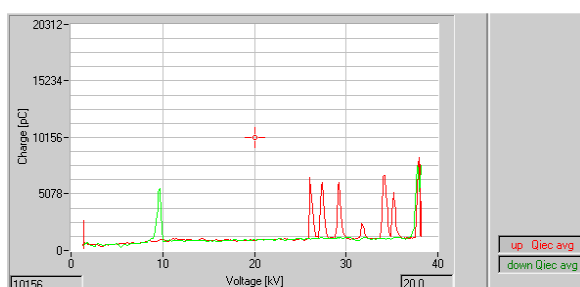
przystąpieniem do próby starzeniowej wykonano pomiary wnz na stanowisku pomiarowym w temperaturze $T=20^{\circ}\text{C}$ (Rys 6.2÷6.3). Uzyskano obrazy charakterystyczne dla wady typu rozwarstwienie izolacji, które zostały opisane w rozdziale 5.3.2. Po uzyskaniu temperatury pręta $T=120^{\circ}\text{C}$ powtórzono pomiar wnz i stwierdzono dziesięciokrotny spadek intensywności wnz (Rys 6.4÷6.5). Zdaniem autora po nagraniu pręta do temperatury $T=120^{\circ}\text{C}$ na skutek rozszerzalności cieplnej miedzi i dużego nacisku grzałek na powierzchnie pręta szczelina powietrzna w miejscu występowania defektu uległa zmniejszeniu.



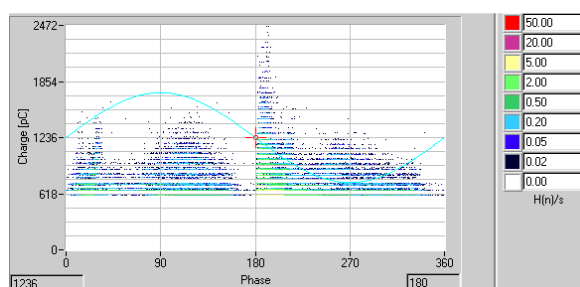
Rys. 6.2. Krzywa qV pręta w temperaturze $T=20^{\circ}\text{C}$



Rys. 6.3. Rozkład gęstości ładunku wnz pręta. $T=20^{\circ}\text{C}$, $U=18\text{kV}$

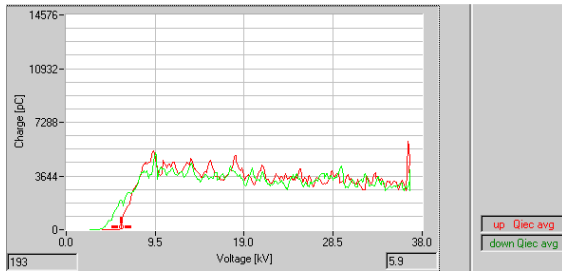


Rys. 6.4. Krzywa qV pręta w temperaturze $T=120^{\circ}\text{C}$, dzień pierwszy

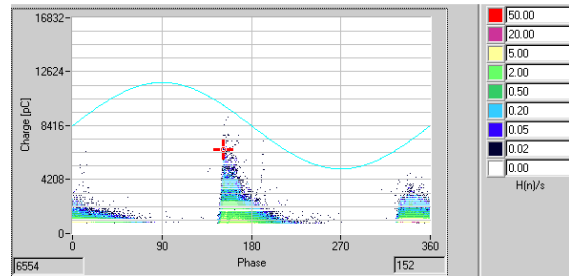


Rys. 6.5. Rozkład gęstości ładunku wnz pręta. $T=120^{\circ}\text{C}$, $U=18\text{kV}$, dzień pierwszy

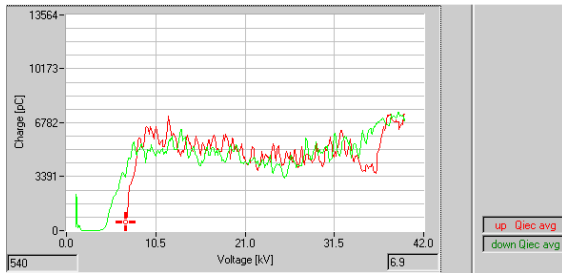
W drugim dniu próby starzeniowej zaobserwowano napięcie zapłonu wnz zbliżone do wartości początkowej. Stwierdzono przesunięcie na skutek temperatury kątów ekstremum koncentracji ładunków wnz z kątów 0° i 180° na -30° i 150° (Rys 6.6÷6.7).



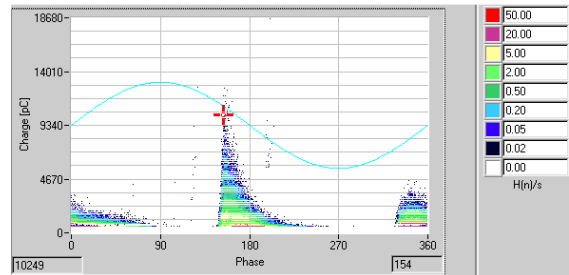
Rys. 6.6. Krzywa qV pręta w temperaturze $T=120^{\circ}\text{C}$, dzień drugi



Rys. 6.7. Rozkład gęstości ładunku wnz pręta. $T=120^{\circ}\text{C}$, $U=18\text{kV}$, dzień drugi

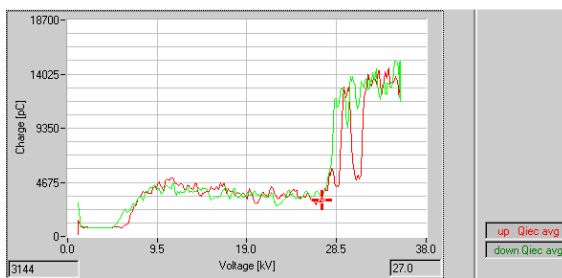


Rys. 6.8. Krzywa qV pręta w temperaturze $T=120^{\circ}\text{C}$, dzień 6

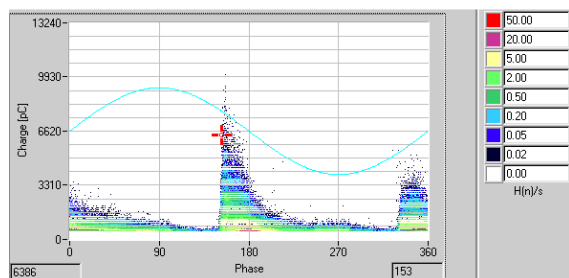


Rys. 6.9. Rozkład gęstości ładunku wnz pręta. $T=120^{\circ}\text{C}$, $U=18\text{kV}$, dzień 6

Kolejne pomiary parametrów wnz wskazywały na powolny proces degradacji izolacji (Rys 6.8÷6.9). W dwudziestym dniu próby starzeniowej zaobserwowano aktywację kolejnego źródła wnz co można było zaobserwować na krzywej qV (rys. 6.10)

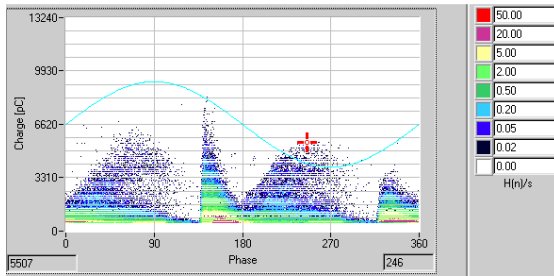


Rys. 6.10. Krzywa qV pręta w temperaturze $T=120^{\circ}\text{C}$, dzień 20

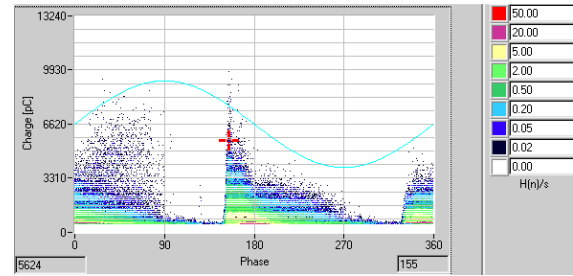


Rys. 6.11. Rozkład gęstości ładunku wnz pręta. $T=120^{\circ}\text{C}$, $U=18\text{kV}$, dzień 20

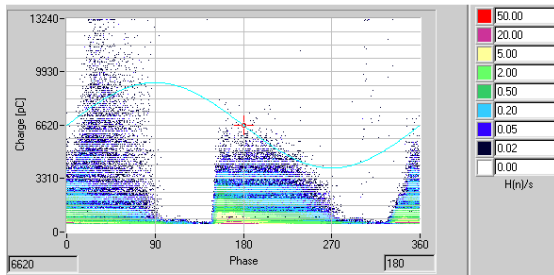
W kolejnych dniach próby starzeniowej napięcie zapłonu nowo powstałego źródła wnz spadło poniżej napięcia znamionowego pręta. Zmianie uległ rozkład gęstości ładunku co świadczy o powstaniu wady innej niż rozwarstwienie izolacji pręta (Rys 6.12÷6.15).



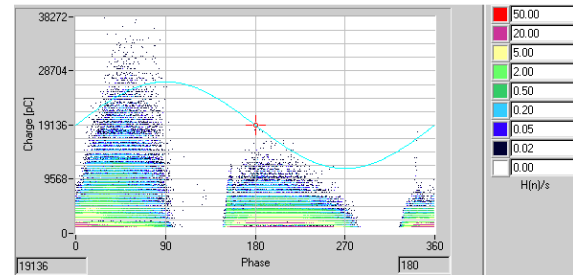
Rys. 6.12. Rozkład gęstości ładunku wzn pręta. $T=120^{\circ}\text{C}$, $U=18\text{kV}$, dzień 25



Rys. 6.13. Rozkład gęstości ładunku wzn pręta. $T=120^{\circ}\text{C}$, $U=18\text{kV}$, dzień 30

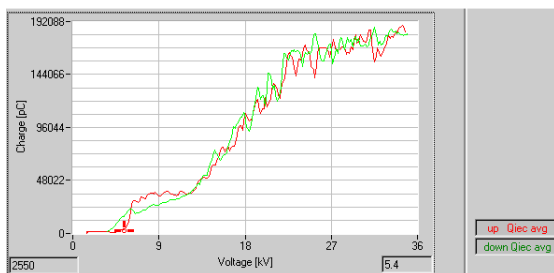


Rys. 6.14. Rozkład gęstości ładunku wzn pręta. $T=120^{\circ}\text{C}$, $U=18\text{kV}$, dzień 40

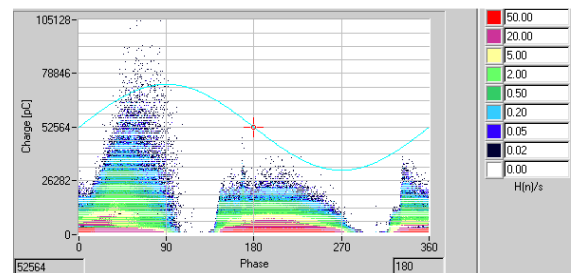


Rys. 6.15. Rozkład gęstości ładunku wzn pręta. $T=120^{\circ}\text{C}$, $U=18\text{kV}$, dzień 50

Pomiar rutynowy w zakresie napięcia $U=0 - 2U_n$ wykazał wyładowania o bardzo dużych wartościach ładunku $q > 190\text{nC}$ (rys. 6.16.). Wyładowania te liniowo zależą od wartości napięcia. Rozkład gęstości ładunku wzn po dwóch miesiącach próby wykazuje zwiększoną koncentrację ładunków o bardzo dużych wartościach w pierwszym cyklu napięcia zasilania (rys. 6.16). Dominacja ładunków dodatnich jak i ujemnych może świadczyć o wyładowaniach koronowych czy też przyelektrodowych.



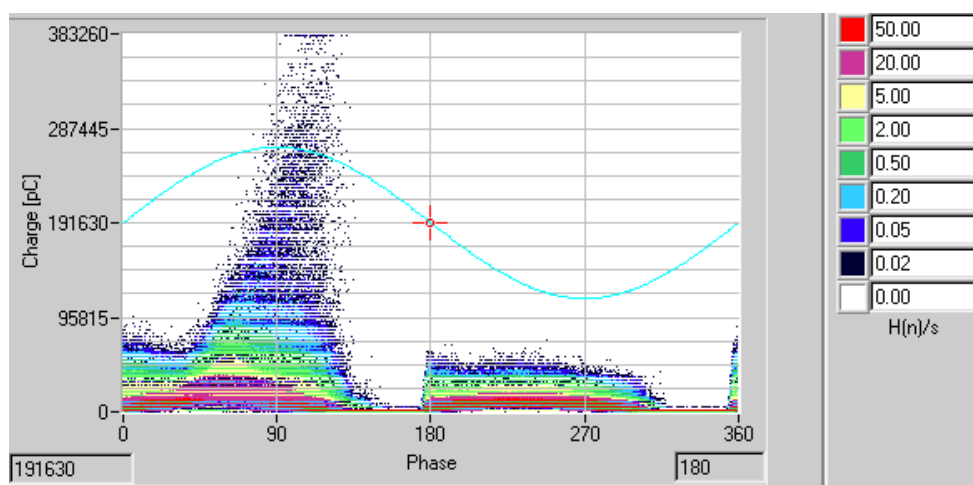
Rys. 6.16. Krzywa qV pręta w temperaturze $T=120^{\circ}\text{C}$, dzień 60



Rys. 6.17. Rozkład gęstości ładunku wzn pręta. $T=120^{\circ}\text{C}$, $U=18\text{kV}$, dzień 60

Dalsze pomiary intensywności wzn wskazywały na przyspieszony proces degradacji izolacji. W 80 dniu próby ładunek maksymalny wzn osiągnął wartość $q \approx 400\text{nC}$

(rys. 6.18). W dalszym ciągu występowała koncentracja ładunków w pierwszej ćwiartce sinusoidy napięcia zasilania. Postanowiono przerwać próbę oraz dokonać inspekcji pręta.



Rys. 6.18. Rozkład gęstości ładunku wzdłuż pręta. $T=120^{\circ}\text{C}$, $U=18\text{kV}$, dzień 80

Na podstawie inspekcji pręta stwierdzono przyelektrodowe wyładowania występujące na skutek uszkodzenia zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej pręta wykonane w postaci taśmy przewodzącej (rys. 6.19).



Rys. 6.19. Uszkodzenie zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej pręta

Autorowi znane są liczne uszkodzenia tego typu w praktyce. Uszkodzenie powłoki przewodzącej w części prostej może nastąpić na skutek wibracji pręta będących wynikiem poluzowanego uzwojenia lub degradacji powłoki przewodzącej na skutek występowania

wnz. Praktyczne przykłady uszkodzenia zewnętrznej powłoki przeciwjarzeniowej obrazuje rysunek 6.20.



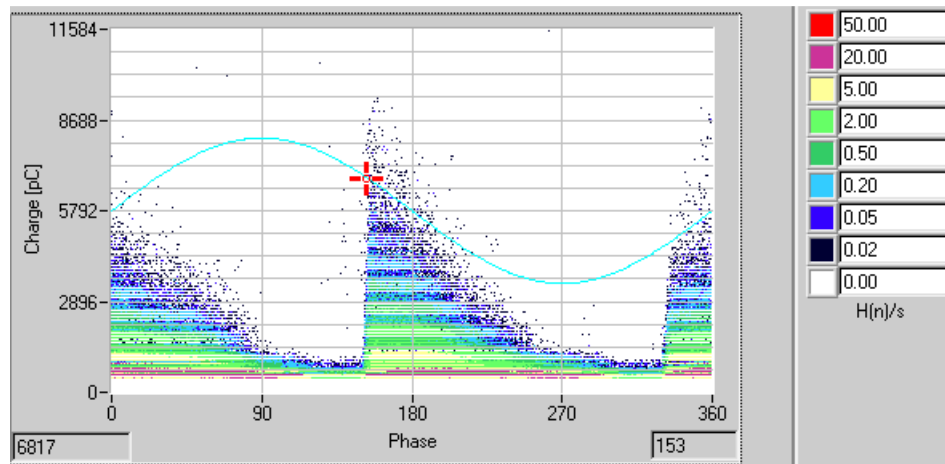
Rys. 6.20. Przykłady degradacji zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej prętów generatorów

Występowanie tego typu wady powoduje proces przyspieszonej degradacji izolacji na skutek występowania wnz o bardzo dużych wartościach. Wada ta wykryta we właściwym czasie może jednak zostać usunięta lub jej skutki mogą zostać zminimalizowane poprzez naprawę warstwy przewodzącej pręta. Naprawy tego typu są często wykonywane na obiektach będących w eksploatacji. W przypadku uszkodzonego pręta będącego obiektem próby starzeniowej pomalowano część prostą lakierem przewodzącym żłobkowym (rys. 6.21).



Rys. 6.21. Pręt hydrogeneratora po naprawie zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej

Naprawa zewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej całkowicie wyeliminowała źródło wnz o dużych wartościach. Rozkład gęstości ładunków wnz po naprawie pręta wskazuje na występowanie jedynie wady typu rozwarstwienie (rys. 6.22). Wada ta jednak nie powoduje przyspieszonego procesu degradacji.



Rys. 6.22. Rozkład gęstości ładunku wnz pręta. $T=120^{\circ}\text{C}$, $U=18\text{kV}$, dzień 82

7. Kondensatory do pomiaru wnz wysokonapięciowych silników elektrycznych

W poprzednim rozdziale wykazano, że okresowe lub też ciągłe pomiary wysokonapięciowych układów izolacyjnych pozwalają we właściwym czasie podjąć decyzję o czasie dalszej bezawaryjnej pracy maszyny. Punktowy pomiar parametrów izolacji nie daje nam żadnej informacji o szybkości pogarszania się kondycji układu izolacyjnego maszyny. Badania okresowe kluczowych maszyn elektrycznych zainstalowanych w przemyśle są wykonywane w stosunkowo długich odstępach czasu. Rozwój wady i przyspieszony proces degradacji może nastąpić pomiędzy kolejnymi badaniami. Autor widzi potrzebę ciągłego monitoringu kluczowych maszyn elektrycznych. Diagnostyka on-line w kraju nie jest niestety popularna. Wynika to z wysokich cen aparatury do diagnostyki on-line oraz wąskiej grupy krajowych ekspertów mogących analizować otrzymane wyniki pomiarów. Autor postanowił zbudować komplet czujników pojemnościowych do ciągłego pomiaru stanu izolacji silników na napięcie $U=6\text{kV}$. Do budowy czujników autor zastosował wysokonapięciowe kondensatory ceramiczne do zastosowań w aplikacjach impulsowych oraz w wysokich częstotliwościach. Izolację w opisywanych kondensatorach stanowi tytanian strontu. Do głównych zalet tego typu kondensatorów należą:

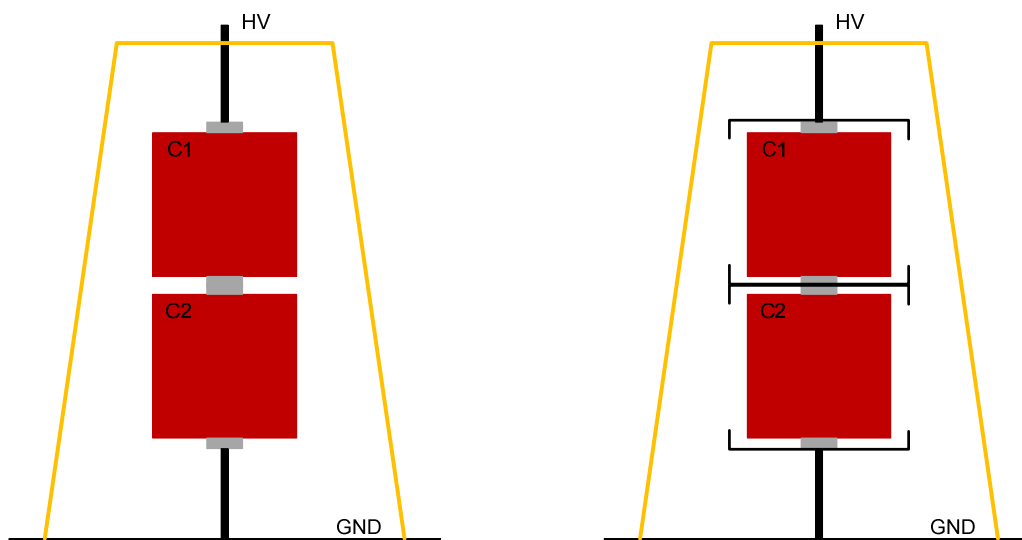
- małe gabaryty,
- niski współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg}\delta < 1\%$,
- duża wytrzymałość elektryczna.

Do budowy czujników autor zastosował kondensatory ceramiczne serii UHV (z ang. *ultra high voltage*) na napięcie $U=50\text{kV DC} / 15\text{kV AC}$ o pojemności $C=560\text{pF}$ (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Wysokonapięciowe kondensatory ceramiczne

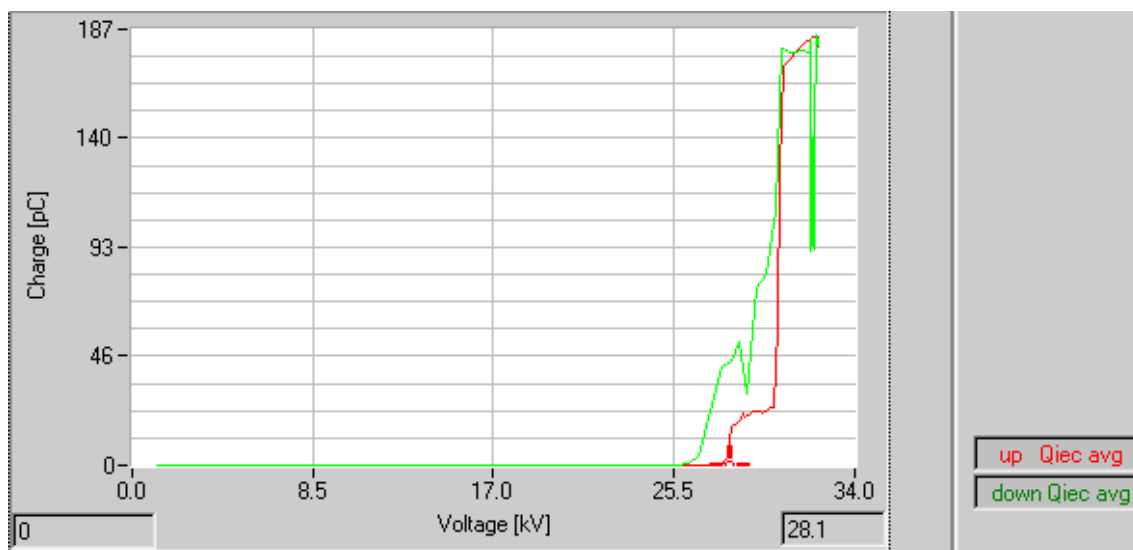
Kondensatory wykonane są jako cylindryczne z wyprowadzeniami śrubowymi. Na podstawie pomiaru rutynowego wzn kondensatora w zakresie napięć $U= 0 \div 15\text{kV}$ stwierdzono zapłon wzn typu koronowe przy napięciu $U_z=8\text{kV}$. Zastosowanie czujnika w maszynie na napięcie $U=6\text{kV}$ stwarzało zagrożenie występowania wzn w kondensatorze na skutek zesterzenia się izolacji kondensatora lub podczas pracy w podwyższonej temperaturze. Zastosowanie dwóch szeregowo połączonych kondensatorów znacznie poprawia bezpieczeństwo i zapobiega przebicciu nawet podczas awarii jednego z kondensatorów. Uszkodzenie jednego z dwóch kondensatorów objawia się wzrostem wyjściowego sygnału napięciowego i można je szybko zdiagnozować dzięki systemowi monitorującemu wzn. Z uwagi na fakt, że kondensatory mogą pracować w agresywnej atmosferze należy je zabezpieczyć przed powierzchniowymi wzn. Dwa szeregowo połączone kondensatory zamontowano w wydrążonym otworze izolatora wsporczego nanapięcie $U=12\text{kV}$ (rys. 7.2. a). Na podstawie pomiaru rutynowego czujnika w zakresie napięć $U=0 \div 30\text{kV}$ stwierdzono zapłon wzn typu koronowe przy napięciu $U_z=11,5\text{kV}$. Wartość ta była niepokojąco niska w porównaniu do napięcia zapłonu wzn pojedynczego czujnika. Celem zwiększenia napięcia zapłonu wzn zastosowano wewnętrzne metalowe ekrany przyłączone do każdej z elektrod kondensatora (rys. 7.2. b)



Rys. 7.2. Rysunek poglądowy połączenia kondensatorów napięciowych: a) bez ekranów, b) z zamontowanymi elektrodami ochronnymi

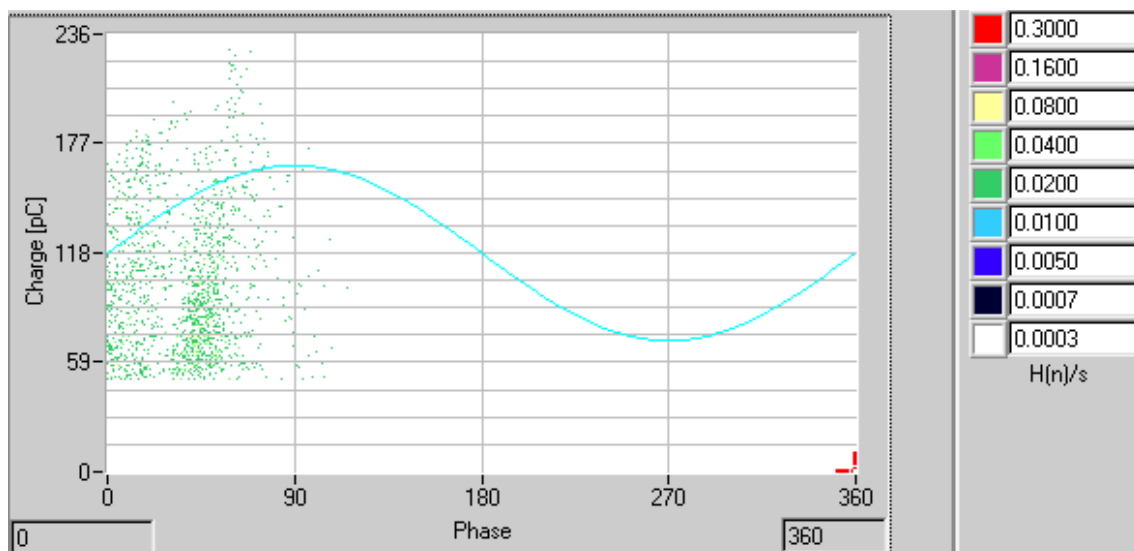
HV- wysokie napięcie, C1, C2 – kondensatory wysokonapięciowe, GND – masa układu

Kolejny pomiar rutynowy czujnika wykazał znaczny wzrost napięcia zapłonu wnz z poziomu $U_z=11,5\text{kV}$ do poziomu $U_z=28,1\text{kV}$ (rys. 7.3.) Do napięcia inicjacji wnz nie stwierdzono występowania żadnych wyładowań powyżej wartości $Q=5\text{pC}$.



Rys. 7.3. Krzywa qV czujnika do pomiaru wnz on-line

Koncentracja ładunków o bardzo małej powtarzalności $n<3$ w pierwszym cyklu napięcia zasilania wskazuje na wnz koronowe. Wyładowania te jednak nie będą występowały w przypadku instalacji czujnika do silnika na napięciu $U=6\text{kV}$



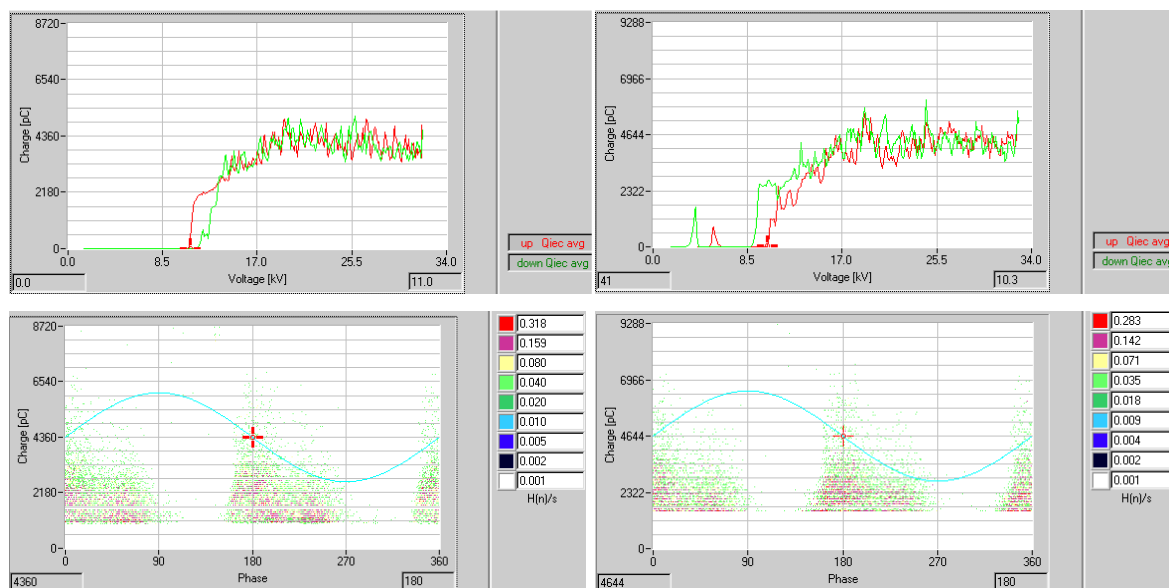
Rys. 7.4. Rozkład gęstości ładunku czujnika przy napięciu $U=30\text{kV}$

Kondensatory po zamontowaniu w otworze izolatora wsporcze zostały zalane żywicą epoksydową celem zabezpieczenia przed czynnikami atmosferycznymi. Aby zminimalizować obecność pęcherzyków powietrza w żywicy, czujnik podgrzano do temperatury $T=60^{\circ}\text{C}$ a następnie przestrzeń wypełniono rozcieńczoną żywicą z zastosowaniem utwardzacza chemicznego o długim czasie żelowania żywicy (rys. 7.5.). Czujnik został przystosowany do współpracy z systemem monitoringu wzn on-line i nie wymaga budowy impedancji sprzęgającej. Wyjście kondensatora jest zwarte do masy poprzez rezystor bezindukcyjny o wartości $R=500\Omega$ [45] który zabezpiecza wyjście układu przed występowaniem niebezpiecznego potencjału. Dodatkowym zabezpieczeniem wyjścia jest ogranicznik przepięć o wartości nominalnej $U=250\text{V}$.



Rys. 7.5. Kondensator do pomiaru wzn silnika na napięciu $U=6\text{kV}$

Dokonano porównania wyników pomiaru wnz otrzymanych ze zbudowanego czujnika z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu wzorcowego kondensatora sprzęgającego o pojemności $C=1nF$. Pomiaru dokonano przy użyciu tej samej impedancji sprzęgającej. Obiektem badań był przykładowy pręt stojana z wadą izolacji. Wyniki pomiaru dają bardzo zbliżone wyniki co do napięcia zapłonu wnz, ładunku maksymalnego oraz rozkładu gęstości ładunków wnz (rys. 7.6).



Rys. 7.6. Wyniki pomiaru wnz pręta generatora wykonane przy użyciu zbudowanego kondensatora (po lewej stronie) oraz przy użyciu kondensatora wzorcowego (po prawej stronie)

8. Wnioski

W czasie realizacji niniejszej pracy w celu wykazania słuszności postawionych tez wykonano szereg prób i pomiarów elektrycznych grupy uzwojeń wysokonapięciowych maszyn wykonanych w technologii Resin-Rich. Autor w czasie swojej siedmioletniej pracy w zakładzie TurboCare wielokrotnie spotykał się z problemami wadliwie wykonanego układu izolacyjnego. Do poprawnej klasyfikacji defektów niezbędne było zrozumienie zjawisk zachodzących w różnych układach wnz oraz budowa modeli fizycznych wnz różnego rodzaju wad. Zbudowano bazę występujących w praktyce wnz. Autor opracował kompleksową, efektywną diagnostykę układów izolacyjnych na potrzeby macierzystego zakładu. Autor klasyfikując defekty opierał się wyłącznie na powtarzalnych wynikach oraz obrazach wnz co pozwala na szybsze oraz dokładniejsze rozpoznawanie wad w czasie produkcji nowych uzwojeń. Na podstawie pomiaru oraz analizy wnz autor sklasyfikował następujące wady:

- kawerna (Tabela 8.1),
- rozwarstwienie izolacji (Tabela 8.2),
- zanieczyszczenie powierzchniowe izolacji (Tabela 8.3),
- nieciągłość w zewnętrznej ochronie przeciwjarzeniowej (Tabela 8.4),
- uszkodzenie wewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej (przebiecie izolacji) (Tabela 8.5),
- uszkodzenie wewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej (nieodpowiednia oporność taśmy ekranującej) (Tabela 8.6),

Tabela 8.1. Parametry charakterystyczne wnz obrazujące wadę typu kawerna

Pomiar rutynowy wnz	Pomiar analityczny wnz	Zależność ładunku od napięcia
<p>- Niskie napięcie zapłonu wnz podczas pierwszego najazdu napięcia.</p> <p>- Wada niewidoczna podczas kolejnych najazdów napięcia.</p>	<p>- Koncentracje ładunku w kącie fazowym napięcia zasilania 135° - 210° oraz 305° - 45°.</p> <p>- Ładunki o małej powtarzalności $n < 10$ i amplitudzie $1 < Q < 10nC$</p>	<p>- Wartość ładunku wnz zanika wraz ze wzrostem napięcia.</p> <p>- Kąt koncentracji ładunków nie zależy od wartości napięcia.</p>

Tabela 8.2. Parametry charakterystyczne wnz obrazujące wadę typu rozwarstwienie

Pomiar rutynowy wnz	Pomiar analityczny wnz	Zależność ładunku od napięcia
<ul style="list-style-type: none"> - Niskie napięcie zapłonu wnz. - Powtarzalność wyników pomiaru. 	<ul style="list-style-type: none"> - Koncentracje ładunku w kącie fazowym napięcia zasilania 0^0 oraz 180^0. - Symetryczny rozkład ładunków dodatnich oraz ujemnych. - Rozkład gęstości ładunku w kształcie trójkąta prostokątnego. - Ładunki o dużej powtarzalności $n > 1000$ amplitudzie $5 < Q < 100 \text{nC}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Wartość ładunku wnz praktycznie nie zależy od napięcia. - Kąt koncentracji ładunków nie zależy od wartości napięcia. - Kąt koncentracji ładunków maleje ze wzrostem temperatury.

Tabela 8.3. Parametry charakterystyczne wnz obrazujące wadę typu zanieczyszczenie powierzchniowe izolacji

Pomiar rutynowy wnz	Pomiar analityczny wnz	Zależność ładunku od napięcia
<ul style="list-style-type: none"> - Niskie napięcie zapłonu wnz. - Powtarzalność wyników pomiaru. 	<ul style="list-style-type: none"> - Koncentracje ładunku w kącie fazowym napięcia zasilania $30^0 - 150^0$. - Dominacja ładunków dodatnich. - Rozkład gęstości ładunku w kształcie trójkąta równobocznego. - Ładunki o powtarzalności $10 < n < 100$ i amplitudzie $10 < Q < 100 \text{nC}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Wartość ładunku wnz rośnie wraz z napięciem. - Kąt koncentracji ładunków nie zależy od wartości napięcia.

Tabela 8.4. Parametry charakterystyczne wnz obrazujące wadę typu nieciągłość w zewnętrznej ochronie przeciwjarzeniowej

Pomiar rutynowy wnz	Pomiar analityczny wnz	Zależność ładunku od napięcia
<ul style="list-style-type: none"> - Niskie napięcie zapłonu wnz podczas pierwszego najazdu napięcia. - Mała powtarzalność wyników pomiaru. 	<ul style="list-style-type: none"> - Koncentracje ładunku w kącie fazowym napięcia zasilania 0° - 45°. - Dominacja ładunków dodatnich. - Ładunki o małej powtarzalności $n < 10$ amplitudzie $1 < Q < 5nC$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Wada często zanika podczas próby napięciowej.

Tabela 8.5. Parametry charakterystyczne wnz obrazujące wadę typu uszkodzenie wewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej (przebiecie izolacji)

Pomiar rutynowy wnz	Pomiar analityczny wnz	Zależność ładunku od napięcia
<ul style="list-style-type: none"> - Wysokie napięcie zapłonu wnz podczas pierwszej próby napięciowej. - Niskie napięcie gaśnięcia wnz podczas pierwszej próby napięciowej. - Niskie napięcie zapłonu oraz gaśnięcia wnz podczas kolejnych prób napięciowych. 	<ul style="list-style-type: none"> - Koncentracje ładunku w kącie fazowym napięcia zasilania 0° - 60° oraz 180° - 240° - kąt koncentracji ładunków wnz zależy od miejsca występowania defektu - Symetryczny rozkład ładunków dodatnich oraz ujemnych. - Ostre rozkłady gęstości ładunków wnz. - Liczba obrazów charakterystycznych proporcjonalna do ilości osłabień izolacji. - Ładunki o powtarzalności $10 < n < 100$ i amplitudzie $1 < Q < 10nC$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Wartość ładunku wnz nie zależy od napięcia - Kąt koncentracji ładunków nie zależy od wartości napięcia.

Tabela 8.6. Parametry charakterystyczne wnz obrazujące wadę typu uszkodzenie wewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej (nieodpowiednia oporność taśmy ekranującej)

Pomiar rutynowy wnz	Pomiar analityczny wnz	Zależność ładunku od napięcia
<ul style="list-style-type: none"> - Niskie napięcie zapłonu oraz gaśnięcia wnz. - Powtarzalność wyników pomiaru. 	<ul style="list-style-type: none"> - Koncentracje ładunku w kącie fazowym napięcia zasilania 0°-60° oraz 180°-240° - kąt koncentracji ładunków wnz zależy od miejsca występowania defektu - Symetryczny rozkład ładunków dodatnich oraz ujemnych. - Ostre rozkłady gęstości ładunków wnz. - Liczba obrazów charakterystycznych proporcjonalna do ilości osłabień izolacji. - Ładunki o powtarzalności $10 < n < 100$ i amplitudzie $1 < Q < 10nC$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Wartość ładunku wnz nie zależy od napięcia - Kąt koncentracji ładunków zależy odwrotnie proporcjonalnie od wartości napięcia.

W wyniku przeprowadzenia licznych pomiarów diagnostycznych napięciem stałym autor stwierdza dużą skuteczność metody prof. Tadeusza Glinki w przypadku rozwarstwień izolacji. Dla wadliwej izolacji napięcie odbudowy jest znacznie niższe niż w przypadku pręta bez wady; zaobserwowano również duże wahania prądu przy napięciu znamionowym. W teście Meggera również można zaobserwować wahania prądu podczas ładowania układu izolacyjnego co świadczy o występowaniu wnz w izolacji. Autor stwierdza, że metoda napięcia schodkowego nie daje miarodajnych wyników w przypadku badania izolacji nowych uzwojeń wykonanych w technologii Resin-Rich. Przebiegi czasowe wartości rezystancji izolacji nie zależą od występowania wady a jedynie od budowy układu izolacyjnego uzwojenia. Wyniki pomiarów dla uzwojeń tego samego typu są identyczne zarówno dla prętów z wadami jak i prętów z dobrą izolacją. Zauważono również, że różnice w wartościach rezystancji na poszczególnych poziomach napięcia zależą w znacznym stopniu od rodzaju wewnętrznej oraz zewnętrznej powłoki przeciwjarzeniowej.

Zastosowanie taśm półprzewodzących o zmiennych parametrach w funkcji napięcia ma istotny wpływ na wynik pomiaru tą metodą.

Bazując na wynikach przeprowadzonej próby starzeniowej pręta hydrogeneratora oraz na własnych doświadczeniach, autor widzi potrzebę ciągłego monitoringu kluczowych maszyn elektrycznych. Słaby rozwój diagnostyki maszyn on-line w kraju wynika w dużej mierze z kosztów aparatury pomiarowej oraz kondensatorów sprzęgających do pomiaru wnz. Autor podjął próbę budowy czujnika typu pojemnościowego do ciągłego monitoringu wnz maszyn na napięcie $U=6kV$. Osiągnięte parametry elektryczne czujników, w tym poziom oraz napięcie zapłonu wnz pozwalają zastosować kondensatory do monitoringu maszyn na napięcie $U=6kV$ i wyższe. Skuteczność pomiaru została potwierdzona pomiarami. Wszystkie prace, badania eksperymentalne oraz pomiary wykonane przez autora, potwierdziły w całej rozciągłości postawione tezy:

- jest możliwe opracowanie efektywnej metody diagnostyki off-line izolacji uzwojeń typu pręty oraz cewki maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin-Rich w oparciu o pomiar i analizę sygnału wnz,
- w sygnale wnz zawarte są informacje na temat rodzaju występującego defektu izolacji głównej uzwojeń wysokonapięciowych maszyn elektrycznych. Metody diagnostyczne prądu stałego mogą być istotnym uzupełnieniem pomiarów wnz,
- jest możliwe w warunkach krajowych zaprojektowanie i zbudowanie czujników do pomiarów wyładowań niezupełnych silników elektrycznych WN typu kondensatory pomiarowe.

Do najważniejszych osiągnięć autor zalicza:

- projekt możliwie najlepiej odseparowanego od źródeł zakłóceń stanowiska pomiarowego,
- budowa stanowiska pomiarowego do przeprowadzania prób starzeniowych uzwojeń,
- budowa bazy danych defektów izolacji uzwojeń występujących w praktyce,
- opracowanie kompleksowej, efektywnej diagnostyki układów izolacyjnych na potrzeby macierzystego zakładu,
- budowa modeli fizycznych defektów izolacji,
- budowa bezwyładowaniowych czujników pojemnościowych do pomiaru wnz,
- weryfikacja doświadczalna opracowanych metod oraz założeń.

9. Bibliografia

1. *A guid to diagnostic insulation above 1kV*. Materiały informacyjne Megger.
2. Andrzejewski K., Tułodziecka E.: *Analiza intensywności wylądowań niezupetnych prototypowego układu izolacyjnego VPI stojana hydrogeneratora 200MW 15,75 kV*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr64/2002.
3. Andrzejewski K., Tułodziecka E., Pietrzak K.: *Monitorowanie układów izolacyjnych uzwojeń stojanów turbogeneratorów GTHW-360 w Elektrowni Bełchatów na podstawie pomiarów wnz w systemie off-line*. XIV Konferencja Energetyki, Książ
4. Andrzejewski K., Tułodziecka E.: *Pomiary i analiza wylądowań niezupetnych w próbie starzeniowej typu Resin Rich Compact*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr64/2002.
5. Anuszczyk J.: *Maszyny elektryczne w energetyce*. WNT Warszawa 2005 ISBN: 83-204-3247-2.
6. Ariastina W.G., Blackburn T.R., James R.E., Liu Z. Phung B.T.: *Optimization of measurement error in partial discharge testing*. School of Electrical Engineering and Telecommunications University of New South Wales.
7. Blokhintsev M., Golovkov A., Golubev Kane C.: *Field Experiences on the Measurement of Partial Discharges on Rotating Equipment*. IEEE PES'98, February 1-5, Tampa.
8. Boczar T.: *Analiza zakłóceń w pomiarach akustycznych wylądowań niezupetnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 259/2010.
9. Boczar T.: *Widma emisji akustycznej generowanej przez wylądowania niezupetne w izolacji olejowej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 114/2000.
10. Boulter E., Culbert I., Dhirani H., Stone .: *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, testing and repair*. ISBN 0 -471-44506-1.
11. Brüttsch R., Fröhlich K, Tari M, Weiers T., Vogelsang R.: *Insulation Failure Mechanisms of Power Generators*. IEEE Electrical Insulation Magazine, August 2008 Vol. 24.
12. Bytnar A.: *Wybrane zagadnienia z konstrukcji i eksploatacji turbogeneratorów*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1983.
13. Celiński Z.: *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*. WPW Warszawa 1994r. ISBN: 83-7207-524-7.

14. Chang C., Su Q.: *Statistical characteristics of partial discharges from a rod-plane arrangement*, Department of Electrical & Computer System Engineering Monash University, Clayton VIC 3168 Australia.
15. Charoy A.: *Zakłócenia w urządzeniach elektrotechnicznych*. WNT Warszawa 1999 ISBN: 83-204-2429-1.
16. Cichoń A.J., Boczar T., Borucki S.M.: *Dobór parametrów sygnałów emisji akustycznej od wyładowań niezupełnych dla potrzeb systemu eksperckiego*, Of. Wyd. Politechniki Opolskiej ISBN 978-83-60-691-50-2.
17. Cichoń A.J.: *Nowa metoda diagnostyki stanu technicznego podobciążeniowych przełączników zaczepów*. Studia i Monografie z. 279. Of. Wyd. Politechniki Opolskiej, Opole 2011.
18. Cichoń A.J., Lorenc M., Boczar T., Borucki S.M.: *Czasowo - częstotliwościowa analiza wieloźródłowych wyładowań niezupełnych*. Przegląd elektrotechniczny R.84, Nr 12/2008.
19. Danilewicz J.B.: *Wybrane problemy budowy i eksploatacji generatorów dużych mocy*. Politechnika Krakowska 2003 ISBN: 83-7242-275-3.
20. Decner A., Glinka T., Polak A., Zawilak J.: *Badania diagnostyczne izolacji zwojowej*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 62, 28/2008.
21. Decner A., Glinka T., Polak A.: *Degradacja izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych pod wpływem czasu ich eksploatacji*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 74/2006 [21]
22. Decner A., Glinka T., Polak A.: *Obserwacja procesu starzenia izolacji uzwojeń Maszyn elektrycznych z wykorzystaniem metody napięcia stałego*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 76/2007.
23. Decner A., Glinka T., Polak A.: *Wpływ czasu eksploatacji maszyn elektrycznych na stopień degradacji izolacji uzwojeń*. Przegląd elektrotechniczny 11/2006.
24. *EMC – technika ekranowania i uszczelniania*. Materiały informacyjne ASTAT.
25. Emery F. T.: *Principles of Power Factor Testing of Complete Generator Stator Windings*. International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis USA, 2004.
26. Fiskowski Z.: *Technika wysokich napięć*. WNT Warszawa 1999 ISBN 83-204-2312-0.
27. Florkowska B., Moskwa S., Nowak W., Włodek R., Zydrón P.: *Modelowanie procedur diagnostycznych w eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. AGH Kraków 2006 ISBN 83-7464-081-2.

28. Florkowska B., Furgał J., Szczerbiński M., Włodek R.: *Materiały elektrotechniczne. Podstawy teoretyczne i zastosowania* wydawnictwo. AGH ISBN: 9788374643740.
29. Florkowska B., Roehrich J. Zydrón P.: *Distributions and phase-resolved patterns of partial discharges forms in non-uniform electric field in air*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 28.
30. Florkowska B.: *Badania układów elektroizolacyjnych*. AGH Kraków 1976.
31. Florkowska B.: *Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych*. AGH Kraków 2009 ISBN 978-83-7464-193-7.
32. Florkowska B.: *Wyładowania niezupętne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia analiza mechanizmów, form i obrazów*. Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 1997
33. Florkowski M., Zydrón P.: *Pomiary wyładowań niezupętnych w diagnostyce silników wysokonapięciowych – wpływ zakłóceń i wyższych harmonicznych na pomiary i interpretację wyników*. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 4, rok 1998.
34. Frey G., Wiedenbrug E., Wilson J.: *Impulse testing and turn insulation deterioration in electric motors*. Industry Applications Magazine, IEEE Sept.-Oct. 2004.
35. Gacek Z., Szadkowski M., Duda D., Witos F., Maźniewski K.: *Poszukiwanie kompleksowej metody pomiaru, identyfikacji i lokalizacji wyładowań niezupętnych w wysokonapięciowych układach izolacyjnych*. Przegląd Elektrotechniczny rok: 2004, R. 80, nr 9.
36. Glinka T., Kulesz B.: *Wyładowania niezupętne w izolacji zwojowej silników indukcyjnych zasilanych z falowników pwm*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 49 21/2000.
37. Glinka T.: *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle*. Wyd. BOBRME Komel w Katowicach, 2002r.
38. Glinka T.: *Porównanie parametrów układu izolacyjnego maszyn elektrycznych o różnym stopniu zużycia*. Wyd. BOBRME, Katowice 2000, Maszyny Elektryczne, nr 61, 2000
39. Glinka T.: *Stan techniczny izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych i ich parametry wyznaczone napięciem stałym*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 48, 20/2000.
40. Goodeve T.E.: *Experience with compact epoxy-mica capacitors for rotating machine partial discharge detection* Iris Power Engineering Inc.
41. Gulski E.: *Diagnozowanie wyładowań niezupętnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji*. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.

42. Hickiewicz J., Ławrowski Z.: *Diagnostyka maszyn elektrycznych w Elektrowniach – przykłady praktyczne*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 71/2005.
43. IEEE 522-2004: *Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating Current Electric Machines*.
44. IEEE 95-2002: *Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage*.
45. IEEE Std 1434-2000: *Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery*.
46. IEEE Std 286-2000: *Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*.
47. IEEE Std 43-2000: *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*.
48. IEEE Std 522-2004: *Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines*
49. IEEE Std 56-1997: *Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10 000 kVA and Larger)*.
50. Jackowicz-Korczyński A.: *Analiza procesów polaryzacyjnych w polimerowych układach izolacyjnych wysokiego napięcia dla celów diagnostyki wysokonapięciowej*. Rozprawa doktorska AGH Kraków, 2003.
51. Jasiński J., Kaczmarczyk J., Kandora W., Szymków A.: *Możliwości pomiarowe TurboCare Poland S.A. XVII Konferencja Energetyki Jachranka 2011*.
52. Kajca R., Partyga S., Słowiński B.: *Generatory w polskiej energetyce. Historia, stan dzisiejszy, przyszłość*. Energetyka 2003, nr 2.
53. Kandora W., Smyczek A.: *Diagnostyka izolacji uzwojeń generatorów i silników wysokonapięciowych metodą rampy wysokonapięciowej*. XV Konferencja Energetyki Ryn 2007.
54. Kandora W.: *Badania własne izolacji zwojowej wysokonapięciową metodą impulsową – Of. Wyd. Politechniki Opolskiej V Środowiskowe Warsztaty Doktorantów Pokrzywna 2011*.
55. Kandora W.: *Diagnostic of the high voltage turbo generator stator insulation with use the partial discharge method*. Ofic. Wyd. Politechniki Opolskiej VI Środowiskowe Warsztaty Doktorantów Pokrzywna 2012.
56. Kandora W.: *Diagnostyka izolacji zwojowej wirników turbogeneratorów. Nowoczesne metody pomiarowe*. XVI Konferencja Energetyki Wojanów 2009.

57. Kandora W.: *Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń turbogeneratorów metodą pomiarów wyładowań niezupełnych* - Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr1/2012.
58. Kandora W.: *Przekładniki prądowe częstotliwości radiowych jako czujniki do pomiaru wyładowań niezupełnych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 91/2011.
59. Kandora W.: *Radio frequency current transformers as sensors for partial discharge measurement*. V Środowiskowe Warsztaty Doktoranckie Politechniki Opolskiej.
60. Kandora W.: *Wysokonapięciowa metoda impulsowa oceną stanu izolacji zwojowej maszyn wirujących*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 85/2010.
61. Kiameh F.: *Power generation handbook. Selection, Applications, Operation, and Maintenance*. ISBN: 0071396047, 2002
62. Klempner G. Kerszenbaum I.: *Operation and maintenance of large turbo-generators*. ISBN 0-471-61447-5, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Canada 2004.
63. Klempner G.: *Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance*. ISBN 978 – 0470- 16767 – 0.
64. Korczowicz T.: *Pomiary rezystancji izolacji w teorii i praktyce*. Elektroinfo, nr 9, rok 2004.
65. Kuffel E., Kuffel J., Zaengl W.S.: *High Voltage Engineering Fundamentals*. Butterworth Heinemann 2000.
66. Latek W.: *Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle*. WNT, Warszawa 1987.
67. Lechowski Ż., Szczepański Z., Rosicki A., Wodziński J.: *Układy izolacyjne urządzeń elektro-energetycznych*. WNT 1978.
68. Lechowski Ż.: *Narażenia uzwojeń stojanów generatorów dużej mocy*. PWN Warszawa- Poznań 1982 ISBN 83-01-04303-2.
69. Lemke E.: *Guide for partial discharge measurements on compliance to IEC 60270*. CIGRE 2008.
70. Lisowski M.: *Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Wrocław 2004.
71. Ławrowski Z.: *Badania eksperymentalne izolacji silnika 6kV o mocy 1MW z zastosowaniem nowej konstrukcji aparatury diagnostycznej wykorzystującej metody WMPS i ramp test*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 89/2011.
72. Morańda H.: *Metody identyfikacji defektów – Rozprawa doktorska Politechnika Poznańska 1999*.

73. Osvath P., Weber H.J., Zaengl W.: *Technika pomiaru wyladowań niezupetnych*. Materiały informacyjne Tettex nr 311.
74. Paduch P., Szymaniec S.: *Czujniki do pomiaru wyladowań niezupetnych w uzwojeniach maszyn elektrycznych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 89/2011.
75. Plutecki Z., Szymaniec S.: *Pomiary i monitoring stanu izolacji uzwojeń maszyn Elektrycznych w przemyśle – doświadczenia własne*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 89/2011.
76. PN-EN 50209: *Próba izolacji prętów i cewek uzwojeń maszyn wysokiego napięcia*.
77. PN-EN 60034-18-32 *Maszyny elektryczne wirujące. Ocena funkcjonalna układów izolacyjnych, Procedury badawcze uzwojeń z zezwojów ukształtowanych, Ocena elektrycznej trwałości układów izolacyjnych stosowanych w maszynach elektrycznych wirujących*.
78. PN-EN 60270: 2003: *Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiary wyladowań niezupetnych*.
79. PN-EN-04700: *Urządzenia i układy elektryczne w obiektach elektroenergetycznych. Wytyczne przeprowadzania pomontażowych badań odbiorczych*.
80. Praca zbiorowa pod redakcją Boचना A.: *Elektroenergetyka Polska*. QuixiMedia Bydgoszcz 2010, ISBN 978-83-61840-16-9.
81. Praca zbiorowa pod redakcją Kosztaluk R.: *Technika badań wysokonapięciowych*. WNT Warszawa 1985 ISBN 83-204-0615-3.
82. Praca zbiorowa pod redakcją Mościcka-Grzesiak H.: *Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1999 ISBN 83-7143-174-0.
83. Przybysz J.: *Diagnostyka izolacji uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 49 / 2000.
84. Przybysz J.: *Turbogeneratory* – IEN Warszawa 2004 ISBN 83-9193-320-2.
85. *Ramowa Instrukcja Eksploatacji Generatorów Synchronicznych*. Energopomiar-Elektryka Sp. z o.o. ISBN: 9788391604038.
86. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering USA 2004 ISBN 0-471-44506-1
87. Stone G.C, Campbel S.R.: *Digital Methods of Eliminating Noise in On-Line Generator PD Measurements*. IEEE Winter Power Meeting, Publication 92-THO-425-9-PWR, February 1992.

88. Stone G.C., Sedding H.G., Costello M. J.,: *Application of partial discharge testing to motor and generator stator winding maintenance*. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 32, No. 2, March/April 1996.
89. Subocz J., Szrot M., Płowucha J.: *Nowoczesne metody diagnostyki izolacji silników i generatorów wn*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 74/2006.
90. Subocz J.: *Ocena jakości wykonania izolacji maszyn wn na podstawie pomiarów niskoczęstotliwościowych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 76/2007.
91. Szymaniec S.: *Analiza wyników pomiarów wyładowań niezuppełnych w silnikach elektrycznych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 76/2007.
92. Szymaniec S.: *Diagnostyka stanu izolacji silników indukcyjnych wysokonapięciowych off-line w przemyśle*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 71/2005.
93. Szymaniec S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z.193. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2006.
94. Szymaniec S.: *Doświadczenia w stosowaniu czujników antenowych do pomiaru wyładowań niezuppełnych silników*. Wiadomości elektrotechniczne 2009-2.
95. Szymaniec S.: *Uszkodzenia i diagnostyka off-line izolacji uzwojeń silników w napędach potrzeb własnych w elektrowniach*. Archiwum Energetyki T.38 2008.
96. Wadhwa C.L.: *High voltage engineering*. University of Dheli 2007 ISBN 81-2243-090-2.
97. Weber H.J.: *Technika pomiaru wyładowań niezuppełnych*. Materiały informacyjne Tettex nr 310.
98. Zydrzeń P.: *Zastosowanie analizy czasowej i częstotliwościowej do badań wyładowań niezuppełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia*. Rozprawa doktorska. AGH Wydział Elektrotechniki Automatyki, Informatyki i Elektrotechniki. Kraków 2001.