Grzegorz Czempik
Ireneusz Hasiec
ZPBE „ENERGOPOMIAR - ELEKTRYKA" Sp. z o.o. Gliwice

BADANIA DIAGNOSTYCZNE UKŁADÓW IZOLACYJNYCH GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH

Generatory synchroniczne są jednym z podstawowych elementów układu blokowego elektrowni, a ze względu na swoje znaczenie w energetyce są obiektami strategicznymi. Straty wynikające z ewentualnej awarii są z reguły ogromne. Aby im zapobiegać oraz zminimalizować skutki awarii, w okresach przeglądów/remontów bloku energetycznego przeprowadza się badania diagnostyczne układu izolacyjnego uzwojeń, który jest jednym z kluczowych elementów niezawodności pracy generatora.

Badania diagnostyczne wykonywane okresowo pozwalają na oszacowanie stopnia degradacji izolacji uzwojeń oraz pozwalają ocenić czas jej życia. Działania w tym zakresie zapobiegają wydatkom związanym z kosztowną awarią generatora, postojem bloku energetycznego i innymi przypadkami będącymi rezultatem niebezpiecznych uszkodzeń izolacji.

Układ izolacyjny uzwojeń generatora pracuje w bardzo trudnych warunkach. Jest narażony na działanie pola elektrycznego, temperaturowego oraz sił mechanicznych. Niezawodność pracy generatora jest zatem uzależniona od procesów degradacji układu izolacyjnego jakim podlega on w czasie eksploatacji. Na procesy te wpływ mają:

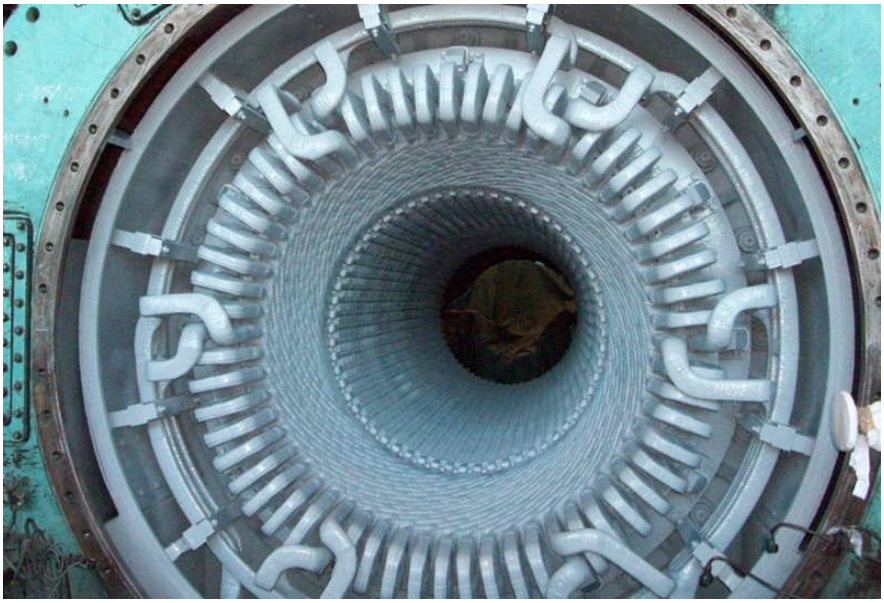
- parametry konstrukcyjne i rodzaje użytych materiałów;
- przebieg eksploatacji i warunki pracy maszyny m.in. stopień obciążenia, przeciążenia, przepięcia, praca asynchroniczna;
- warunki środowiskowe w tym: wilgotność, temperatura, zabrudzenia (pyły, pary olejów);
- częstotliwość remontów.

Istnieje wiele metod diagnostycznych, które pozwalają określać stan techniczny oraz śledzić proces starzenia się układu izolacyjnego uzwojeń. Badania te możemy podzielić na:

a. badania diagnostyczne napięciem stałym, do których zalicza się:
   - pomiar rezystancji izolacji - wyznaczenie współczynnika absorpcji DAR i polaryzacji PI,
   - pomiar rozładowania dielektryka DD,

- pomiar napięciem narastającym schodkowo SV,
- wielokryterialna metodę prądu stałego;

b. badania diagnostyczne napięciem przemiennym, które obejmują:
- pomiar współczynnika strat dielektrycznych tgδ,
- pomiar poziomu wyładowań niezupełnych.



Zdjęcie 1. Przykładowy obiekt badań - stojan generatora 200 MW.

Poniżej zostaną przybliżone metody badań diagnostycznych układów izolacyjnych uzwojeń stojanów generatorów synchronicznych.

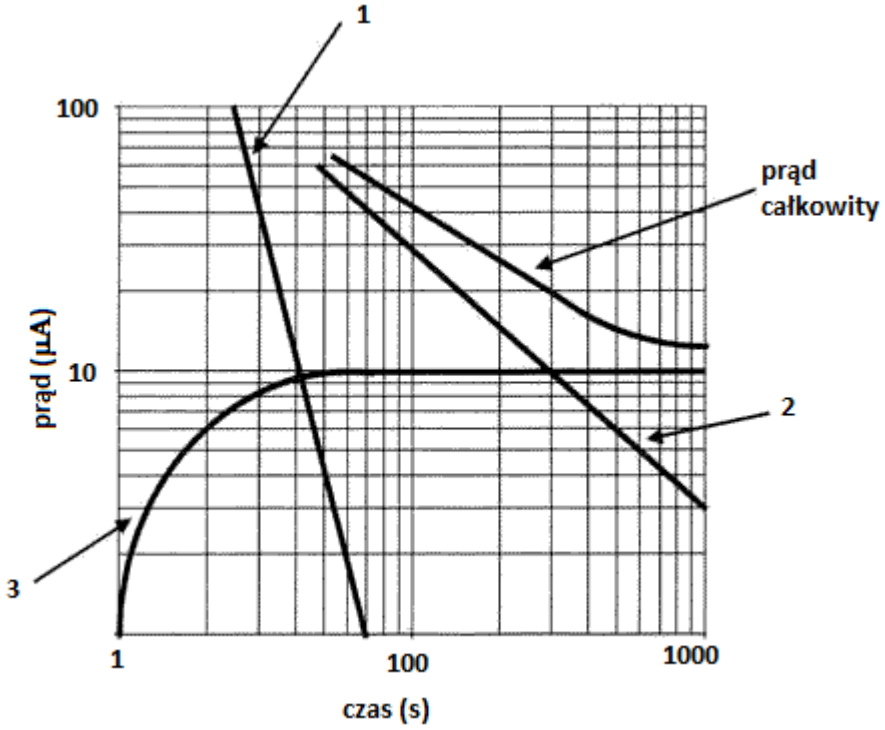
Diagnostyka układu izolacyjnego napięciem stałym

Badanie rezystancji izolacji opiera się na pomiarze natężenia płynącego przez izolację prądu pod wpływem przyłożonego napięcia stałego i może być rozpatrywana na podstawie prawa Ohma: $R = \frac{U}{I}$,

gdzie: U – przyłożone napięcie stałe
I – prąd płynący przez izolację.

Całkowity prąd płynący przez układ izolacyjny, jest sumą trzech prądów [6]:
- prądu pojemności – jest prądem ładowania izolacji i zależy od pojemności C badanego obiektu, początkowo duży i spada w miarę jak ładowana jest pojemność;
- prądu absorpcji – początkowo duży, maleje dużo wolniej niż prąd pojemności co wynika z natury zjawisk fizycznych zachodzących w materiale izolacyjnym;

- prądu upływności - prąd o niewielkiej ustalonej wartości, składający się dwóch składowych:
  - prądu płynącego przez układ izolacyjny, tzw. upływność skrośna, która zależy od rodzaju użytego materiału izolacyjnego,
  - prądu płynącego po powierzchni układu, tzw. upływność powierzchniowa, zależna od czystości materiału izolacyjnego.



Rysunek 1. Prądy płynące przez układ izolacyjny: 1 – prąd pojemności, 2 – prąd absorpcji, 3 – prąd upływności.

Pomiar rezystancji izolacji jest pomiarem, którym w szybki i prosty sposób można zobrazować ogólny stan układu izolacyjnego uzwojeń.

Pomiar wykonywany jest przy stałej wartości napięcia, a do jego wykonania zaleca się stosować megaomomierze [7]:

- o napięciu 500 V – dla uzwojeń na napięcie < 1000 V;
- o napięciu 500 – 1000 V – dla uzwojeń na napięcie 1000 – 2500 V;
- o napięciu 1000 – 2500 V – dla uzwojeń na napięcie 2501 – 5000 V;
- o napięciu 2500 – 5000 V – dla uzwojeń na napięcie 5001 – 12000 V;
- o napięciu 5000 – 10000 V – dla uzwojeń na napięcie > 12000 V.

Wynik pomiaru należy uznać za pozytywny, jeżeli dla każdej fazy uzwojenia (gałęzi równoległej) spełnione są następujące warunki:

a. wartość minimalna rezystancji izolacji po czasie 60 sek. wynosi:

$$R_{60} \geq \frac{k_{75} \cdot U}{1000 + 10 \cdot S} \cdot M\Omega \ ,$$

gdzie: U – znamionowe napięcie uzwojeń w woltach,
S – znamionowa moc pozorna generatora w MVA,
k_{75} – współczynnik zależny od temperatury w jakiej wykonano pomiar [5].

b. **współczynnik absorpcji DAR** - stosunek rezystancji izolacji mierzony po 60 sek. (R_{60}) do rezystancji zmierzonej po 15 sek. (R_{15}) nie powinien być mniejszy niż [7]:

1,5 – w temperaturze 20°C,
1,4 – w temperaturze 40°C,
1,3 – w temperaturze 60°C.

Pomiar **wskaźnika polaryzacji PI** (R_{600}/R_{60}) może być uznany za pozytywny, jeżeli uzyskane wartości wynoszą minimum [7]:

1,5 – dla uzwojeń klasy A,
2,0 – dla uzwojeń klasy B,
2,0 – dla uzwojeń klasy F,
2,0 – dla uzwojeń klasy H.

Współczynnik absorpcji w krótkim czasie pomiaru daje obraz stanu zawilgocenia lub zanieczyszczenia izolacji. Podobną informację uzyskuje się podczas pomiaru współczynnika polaryzacji, jednak pomiar ten nie jest obarczony tak dużym błędem temperaturowym, jak pomiar współczynnika absorpcji i nie wymaga temperaturowej korekcji. Może on być używany w trakcie pomiarów okresowych w celu obserwacji zmian zachodzących w układzie izolacyjnym.

Pomiar rozładowania dielektryka DD *(eng. dielectric discharge)* jest stosunkowo nową metodą badania stanu izolacji. W odróżnieniu od innych metod pomiarowych, w trakcie których mierzony jest prąd podczas ładowania dielektryka, w czasie pomiaru parametru DD mierzony jest prąd płynący w układzie izolacyjnym podczas rozładowania dielektryka.
Pomiar diagnozuje problem, który może zostać niewykryty w trakcie pomiaru rezystancji izolacji i współczynnika polaryzacji. W wielowarstwowych układach izolacyjnych uszkodzenie jednej z warstw nie zostanie zauważone, jeżeli pozostałe warstwy będą miały wysoką rezystancję. Mierzona jest absorpcja dielektryka, przy zignorowaniu efektu równoległych upływów od ścieżek powierzchniowych [6].
Podczas pomiaru parametru DD, w celu osiągnięcia stanu stabilnego, układ izolacyjny ładowany jest przez długi czas – zalecany czas ok. 30 minut. Następnie przeprowadzane jest szybkie rozładowanie układu izolacyjnego, w trakcie którego mierzona jest pojemność. Aby

wyeliminować składową rozładowania pojemności pomiar prądu rozpoczyna się po 1 minucie, a wartość parametru DD obliczana jest z zależności:

$$DD = \frac{I_{1\min}}{U \cdot C},$$

gdzie: I_{1min} – prąd mierzony po 1 minucie od rozpoczęcia rozładowywania izolacji,

U – napięcie próby [V],

C – pojemność badanego układu izolacyjnego [µF].

Kryterium oceny pomiaru rozładowania dielektryka [6] przedstawia tabela 1:

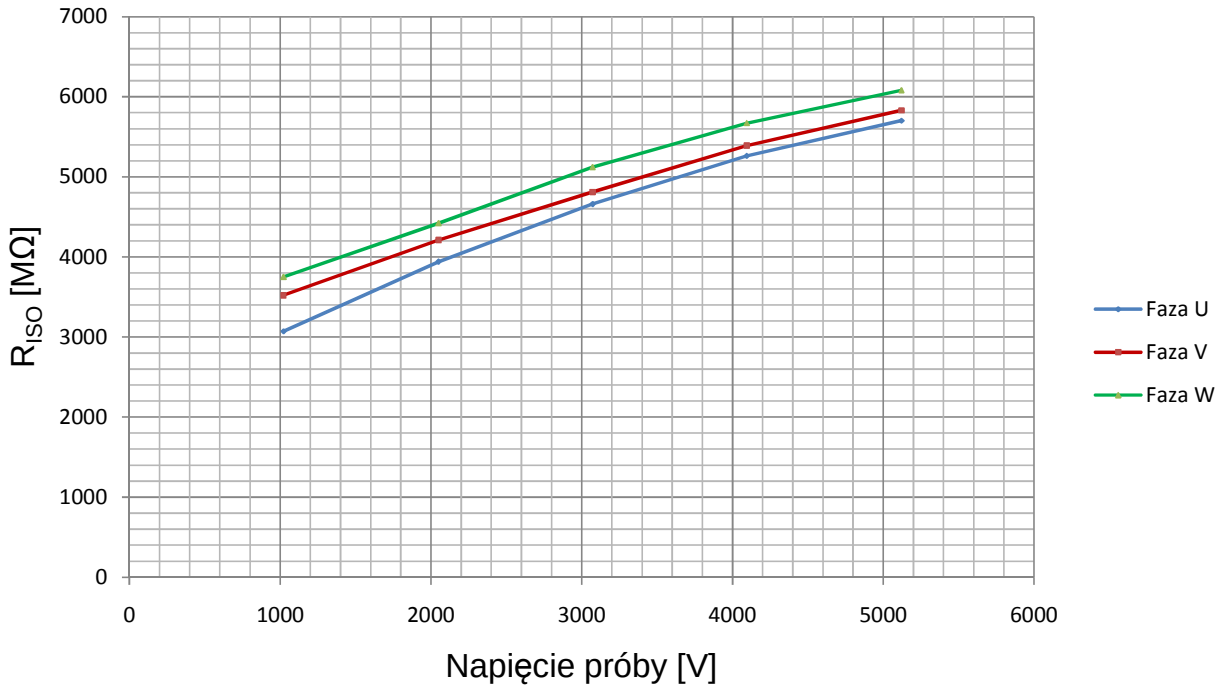
Tabela 1. Kryteria oceny pomiaru rozładowania dielektryka

Wynik pomiaru DD	**Ocena stanu izolacji**
> 7,0	nie satysfakcjonujący
> 4,0	wątpliwy
2,0 ÷ 4,0	dobry
< 2,0	bardzo dobry

Pomiar napięciem narastającym schodkowo SV *(eng. step voltage)* opiera się na założeniu, że układ izolacyjny w dobrej kondycji będzie dostarczał takich samych wyników niezależnie od przyłożonego napięcia. Zwiększenie napięcia będzie powodowało zwiększenie prądu, lecz rezystancja izolacji będąca wynikiem pomiaru będzie niezmienna, a jakakolwiek odchyłka może świadczyć o defektach w układzie izolacyjnym.

W pomiarze metodą SV dokonuje się ciągłej rejestracji wartości rezystancji izolacji, a napięcie jest stopniowo podnoszone w pięciu równych krokach. Zakłada się że odchyłki rezystancji izolacji większe niż 25% wskazują na obecność zanieczyszczeń lub wilgoci [6].

Na rysunku 2 przedstawiony został przykładowy wynik pomiaru metodą SV izolacji uzwojeń generatora 120 MVA i napięciu znamionowym 11,5 kV, o dobrym stanie układu izolacyjnego.



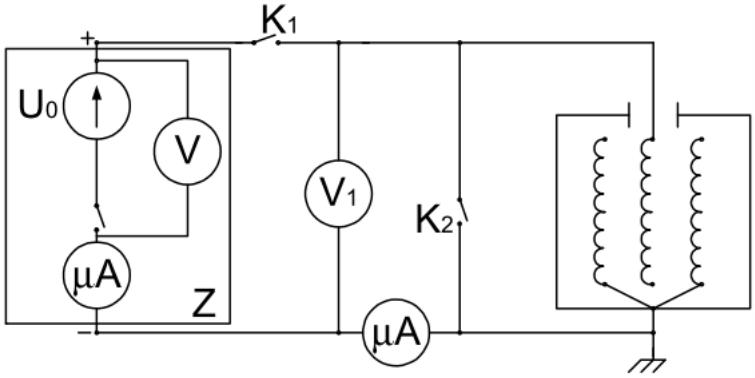
Rysunek 2. Wynik pomiaru rezystancji izolacji napięciem narastającym schodkowo generatora 120 MVA.

Wielokryterialna metoda prądu stałego (WMPS) została wpisana do normy [5] jako metoda nieobowiązkowa. Badanie układu izolacyjnego wg. tej metody obejmuje następujące próby [1, 7]:

- wyznaczenie charakterystyki $R_{60} = f(U)$,
- pomiar przebiegu czasowego prądu upływu i_p po skokowym załączeniu na całkowicie rozładowany układ izolacyjny napięcia stałego o wartości U_n,
- naładowanie układu izolacyjnego do napięcia znamionowego, aż do uzyskania stanu ustalonego, następnie odłączenie napięcia zasilającego i zwarcie układu izolacyjnego na czas t_z, po czym rozwarcie układu izolacyjnego i zdjęcie przebiegu odbudowy napięcia na układzie izolacyjnym $U_{od}(t)$.

Badanie odbudowy napięcia jest próbą najważniejszą dla diagnostyki stanu technicznego izolacji, oceny stopnia jej zużycia i prognozowania czasu niezawodnej pracy generatora. Próbę odbudowy napięcia uzwojeń przeprowadza się przy napięciu:

- U_O = 6 kV – dla uzwojeń o napięciu znamionowym $U_n \geq$ 6 kV,
- $U_O = U_n$ – dla uzwojeń o napięciu znamionowym 6kV $\geq U_n \geq$ 500 V,
- U_O = 500 V – dla uzwojeń o napięciu znamionowym $U_n <$ 500 V.



Rysunek 3. Schemat układu pomiarowego do diagnostyki stanu technicznego izolacji.
Oznaczenia: Z – zasilacz wysokonapięciowy, V – woltomierz elektrostatyczny, K_1,K_2 – wyłączniki.

W oparciu o przeprowadzone pomiary wyznacza się następujące charakterystyki i parametry układu izolacyjnego:

- wykres rezystancji izolacji R_{60} = f(U) w zakresie napięcia od 0 do $2U_n$, z którego określa się rezystancję R_{60} przy U_n,
- z ekstrapolacji krzywej R_{60} = f(U) szacuje się poziom napięcia przebicia U_p układu izolacyjnego,
- wykres odbudowy napięcia $U_{od}(t)$ na układzie izolacyjnym, z którego odczytuje się czas odbudowy napięcia t_{od} i wartość maksymalną odbudowanego napięcia U_{odmax},
- współczynnik absorpcji układu izolacyjnego,
- poziom wahań prądu upływu i_{p60} max i $i_{p60\ min}$ liczony po czasie t>60 s od chwili załączenia napięcia (dla stanu ustabilizowanego).

Otrzymane wyniki badań porównuje się z zawartymi w normie [5] kryteriami oceny stanu izolacji.

Tabela 3. Kryteria oceny wyników badań.

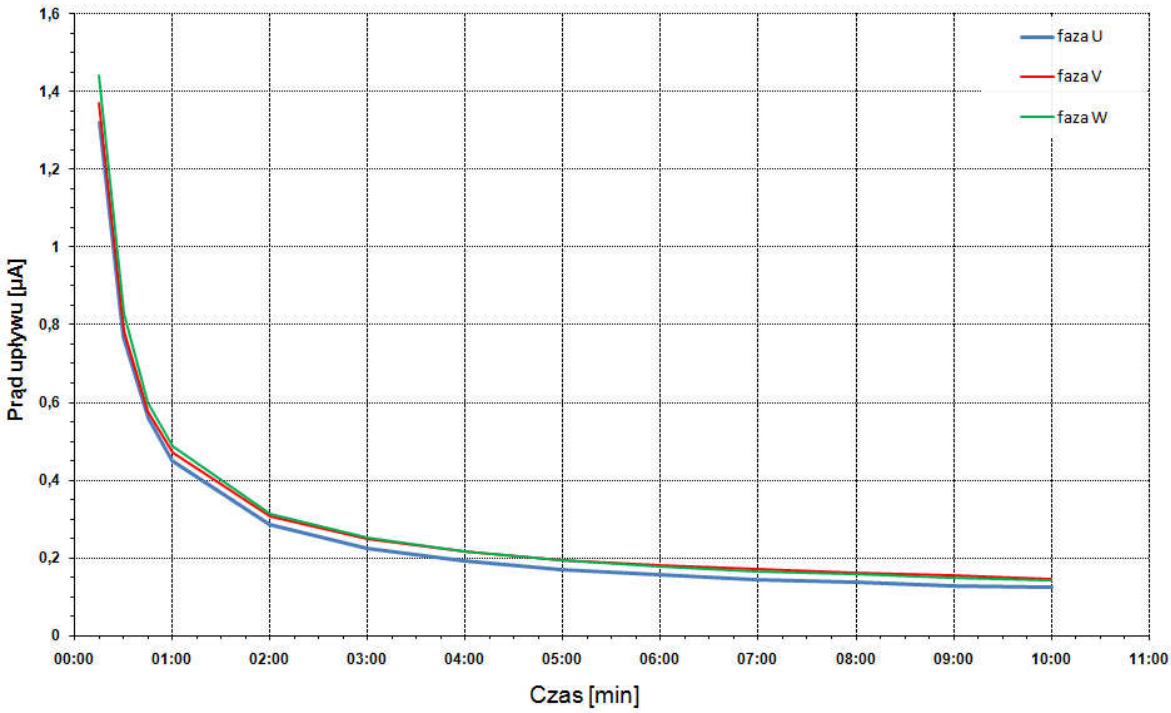
Lp.	Parametr układu izolacyjnego		Ocena punktowa					Izolacja zawilgocona
			5	4	3	2	1	
1.	Napięcie przebicia Up/U_N		>3	>3	>2	~1,5	~1	~1
2.	Rezystancja R_{60N}/U_N [kΩ/V]	przy U_N = 6kW	>50	>20	>10	>10	>10	<3
		przy U_N < 1kV	>50	>20	>10	>3	>1	<1
3a	Czas zwarcia dla t_z [s]	dla U_N = 6kV	30	30	30	1	1	0
		dla U_N<6kV	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 =6kV	>240	>120	>30	~10	0	0
		dla U_N <1kV	>120	>60	>15	~5	0	0
4.	Wahania prądu upływu przy U_N $\frac{i_{p60\,max} - i_{p60\,min}}{i_{p60\,śr}}$		<0,5	<1	>1	>1	>2	0
5	i_{p15}/i_{p60}	U_N =6kV	>1,5	>1,2	>1	1	1	1
		U_N < 1kV	>1,3	>1,1	>1	1	1	1

Stan techniczny układu izolacyjnego według tych kryteriów sklasyfikowany został w skali ocen od 5 do 0. Ocenę:

- **5 punktów** – izolacja nowa, której stan techniczny jest bardzo dobry,
- **4 punkty** – izolacja dobra, może być to izolacja nowego generatora, po remoncie lub kilkuletniej eksploatacji,
- **3 punkty** – izolacja o zauważalnym stopniu zużycia, generator w okresie 2 do 3 lat powinien mieć przeprowadzony remont,
- **2 punkty** – izolacja o dużym stopniu zużycia, generator w możliwie krótkim czasie powinien być przeznaczony do remontu,
- **1 punkt** – izolacja zużyta, generator z takim stanem izolacji może w każdej chwili ulec awarii,
- **0 punktów** – generator nie nadający się do eksploatacji z całkowicie zużytym układem izolacyjnym lub po awarii.

Należy zwrócić uwagę, że układ izolacyjny zużyty w stopniu 1 czy 2 może posiadać bardzo wysoką rezystancję, nawet kilka GΩ/V, a więc ocena układu izolacyjnego na podstawie wartości rezystancji nie będzie wiarygodna. W podanej ocenie punktowej nie mieści się izolacji zawilgocona, którą rozpoznaje się po małej wartości rezystancji (< 10 kΩ/V), którą należy wysuszyć. Już sam fakt, że izolacja wchłania wilgoć, świadczy o znacznym stopniu jej zużycia.

Na rysunku 4 przedstawiony został przykładowy przebieg prądu upływu w funkcji czasu izolacji uzwojeń stojana generatora 150 MVA o napięciu znamionowym 13,8 kV.



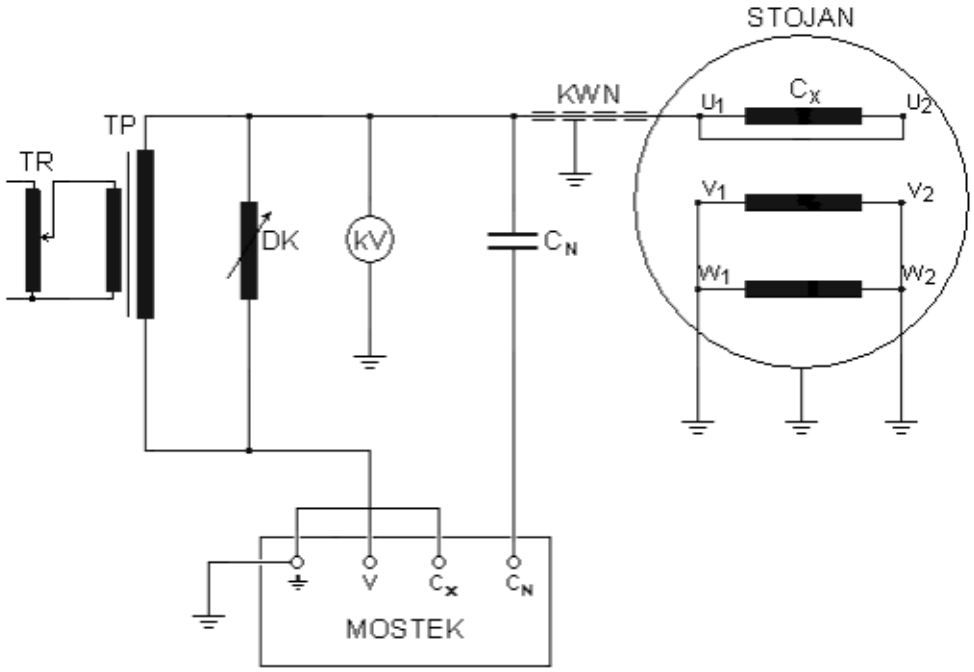
Rysunek 4. Przebieg prądu upływu izolacji uzwojeń generatora 150 MVA.

Diagnostyka układu izolacyjnego napięciem przemiennym

Pomiar współczynnika strat dielektrycznych tgδ oraz pojemności C izolacji uzwojeń generatora jest niezbędnym składnikiem oceny procesu starzenia izolacji nowoczesnych układów izolacyjnych. Zaleca się przeprowadzenie pomiaru tgδ w następujących przypadkach [7]:

- dla nowych uzwojeń po próbie odbiorczej 2Un+1 kV;
- w czasie okresowego przeglądu oraz przed i po remoncie generatora,
- w sytuacjach uzasadnionych trudnymi warunkami eksploatacyjnymi.

Pomiaru wykonuje się w układzie mostkowym przedstawionym na rysunku 5. W gałęzi wzorcowej występuje bezwyładowaniowy kondensator o niskiej stratności. Pomiaru prądu w torze pomiarowym dokonuje się najczęściej po stronie niskiego napięcia transformatora probierczego.



Rysunek 5. Schemat układu do pomiaru obiektów pojemnościowych jednostronnie uziemionych.

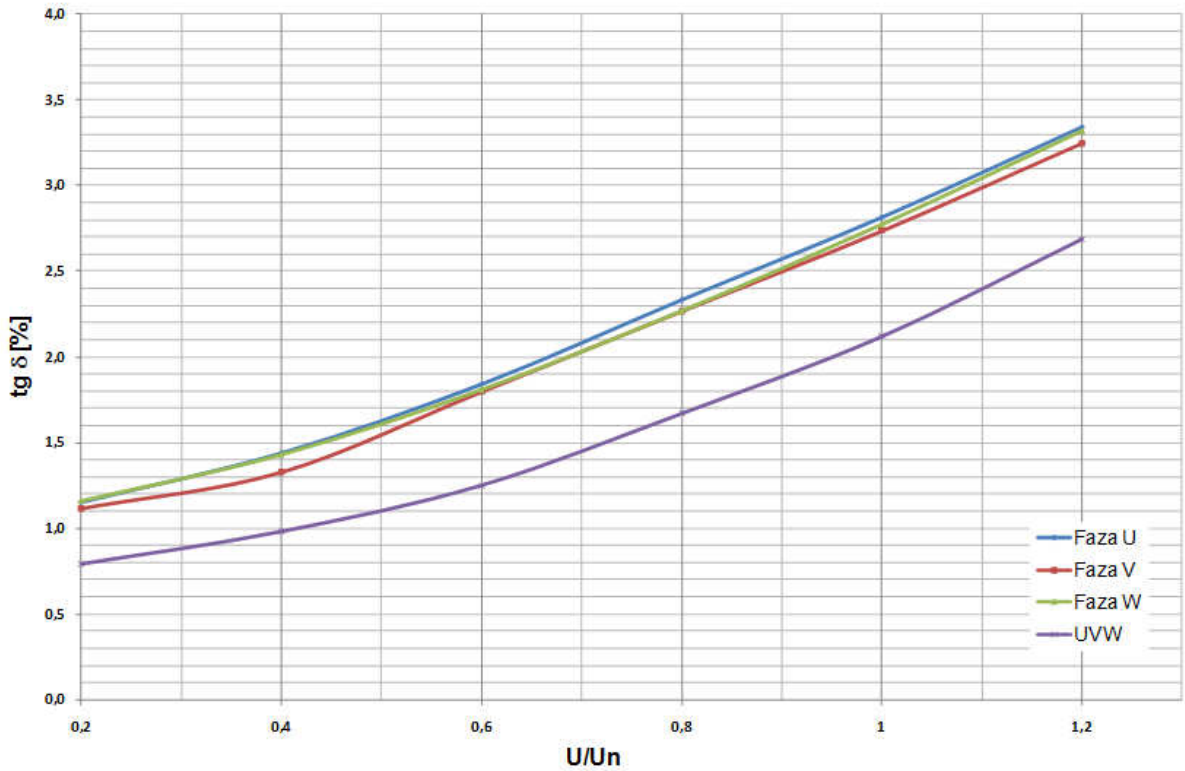
Oznaczenia: TR – autotransformator, TP – transformator probierczy, DK – dławik kompensacyjny, kV – kilowoltomierz, C_N – kondensator wzorcowy, C_x – badany obiekt pojemnościowy, KWN – przewód wysokonapięciowy

W trakcie pomiaru wyznacza się charakterystyki napięciowe pojemności C i współczynnika strat dielektrycznych tgδ układu izolacyjnego:

- wszystkich uzwojeń fazowych względem rdzenia i uziemionych pozostałych uzwojeniach fazowych od $0{,}2U_n$ do $1{,}2U_n$ w odstępach napięcia probierczego $0{,}2U_n$,

- wszystkich uzwojeń fazowych zwartych ze sobą względem rdzenia stojana.

Na tej podstawie wyznacza się maksymalny przyrost współczynnika strat dielektrycznych Δtgδ przy wzroście napięcia probierczego o $0{,}2U_n$ w całym zakresie do $1{,}2U_n$ oraz wskaźnik przyrostu $\Delta tg\delta_{0,6-0,2} = \frac{tg\delta_{0,6Un} - tg\delta_{0,2Un}}{2}$, oraz ocenia się wartość współczynnika strat przy napięciu $0{,}2U_n$, gdyż w większości przypadków na wartość $tg\delta_{0,2Un}$ nie mają wpływu wyładowania niezupełne w układzie izolacyjnym.



Rysunek 6. Wykres współczynnika strat dielektrycznych izolacji uzwojenia stojana generatora 33,75 MVA.

Analiza wyników pomiaru współczynnika tgδ pozwala ocenić stan układu izolacyjnego, gdyż znane są ogóle czynniki wpływające na ich wartość. Odpowiednie wartości współczynnika tgδ potwierdzają, że elementy uzwojenia posiadają izolację z materiałów o niskich stratach dielektrycznych. Na wartość $tg\delta_{0,2Un}$ wpływ mają:

- stopień utwardzenia żywicy termoutwardzalnej,
- straty dielektryczne układu izolacyjnego i jego ogólny stan,
- brak wewnętrznej ochrony przeciwjarzeniowej na przeplotach Roebla,
- charakterystyka powłoki półprzewodzącej czołowej prętów,
- jakość styku przewodzącej powierzchni prętów z rdzeniem,
- zawilgocenie i zanieczyszczenie układu izolacyjnego.

Otrzymane wartości współczynnika strat dielektrycznych i przyrostu Δtgδ dla poszczególnych uzwojeń fazowych należy porównać między sobą. Okresowe pomiary przeprowadzone w tej samej temperaturze i w tych samych warunkach na generatorze o ustabilizowanym stanie izolacji dają bardzo zbliżone wyniki. Podobnie zbliżone wyniki otrzymuje się dla tych samych konstrukcyjnie generatorów, z takim samym układem izolacyjnym.
Wartości współczynnika strat dielektrycznych i Δtgδ bardzo zależą od typu i stanu zestarzenia układu izolacyjnego. Należy więc rozróżniać wyniki uwzględniając, że mamy do czynienia z izolacją np.: asfaltowo - mikową, epoksydowo - mikową, poliestrowo - mikową lub że jest wykonana w technologii RESIN RICH lub próżniowo nasycaną VPI.
Istotne są również szczegóły dotyczące wykonania powłoki półprzewodzącej w częściach czołowych uzwojenia.
Na wartość współczynnika strat dielektrycznych znaczący wpływ ma temperatura izolacji uzwojenia, którą należy podać z wynikami pomiaru.

Pomiar poziomu wyładowań niezupełnych

Najistotniejszą cechą, ocenianą przy analizie stanu układu izolacyjnego stojana generatora – zarówno przewodów elementarnych jak i izolacji głównej – jest ogólnie określana jednorodność materiałowa, której zaburzenia są źródłem szkodliwych wyładowań niezupełnych (wnz, *ang. partial discharge*). Niektóre elementy układu izolacyjnego podlegają wielkim naprężeniom elektrycznym, dochodzącym lokalnie do 10 kV/mm (w zależności od napięcia znamionowego generatora i konkretnych rozwiązań technicznych). Tak duże natężenia pola elektrycznego są źródłem niszczących zjawisk fizycznych czy fizykochemicznych wewnątrz struktury dielektryka, którym jest każda izolacja.
Według autorów pozycji [3] *„Wyładowanie niezupełne jest lokalnym wyładowaniem elektrycznym, które odbywa się tylko w części układu elektroizolacyjnego i nie powoduje bezpośrednio utraty przez układ własności izolacyjnych. Natomiast długotrwałe działanie wyładowań niezupełnych prowadzi poprzez mikro- i makroskopowe zmiany w strukturze układów, do wyładowania zupełnego (czyli przebicia izolacji)”*. Tak więc szacowanie zaawansowania procesów wyładowań niezupełnych jest bardzo istotnym kryterium oceny stanu izolacji.
Wielkość emisji *wnz* zależy od intensyfikacji czynników inicjujących w postaci wewnętrznych defektów struktury. Wyładowania rozwijają się głównie w inkluzjach i porach oraz na powierzchniach granicznych między dielektrykiem stałym i gazowym.

Wskutek oddziaływań elektrycznych, cieplnych i mechanicznych następuje łączenie się inkluzji w większe wtrąciny gazowe co objawia się dalszym wzrostem emisji wyładowań niezupełnych.

Pomiar poziomu wnz nie jest zadaniem łatwym, szczególnie w warunkach przemysłowych. Nie da się bezpośrednio pomierzyć reprezentatywnych wielkości czyli ładunku rzeczywistego lub realnej energii wyładowań. Stosując metodę obwodów zastępczych przybliża się główny parametr fizyczny - ładunek rzeczywisty q_r ładunkiem pozornym q_p. Istotą sprawy jest tu liniowa zależność q_p od spadku napięcia ΔU w zewnętrznym układzie pomiarowym, co pozwala na wprowadzenie współczynnika proporcjonalności, wyznaczanego każdorazowo dla badanego obiektu (np. fazy uzwojenia stojana, która posiada swoją specyficzną pojemność). Czynność ta nazywa się ***kalibracją ładunkiem***. Wykonuje się ją za pomocą kalibratora, który podaje na układ pojemnościowy badanego obiektu impuls rozładowania dokładnie określonego ładunku elektrycznego. Odpowiedź mierzonego układu jest zapamiętywana przez detektor wnz i służy do skalowania wartości ładunków pozornych wyładowań niezupełnych, rejestrowanych podczas zasadniczej próby napięciowej.

Kolejnym problemem jest detekcja słabych sygnałów prądowych pojedynczych wyładowań niezupełnych – spadek napięcia ΔU na badanym obiekcie jest trzy do pięciu rzędów wielkości niższy od napięcia próby. Ponadto czas trwania impulsu wnz wynosi tylko 10^{-9} do 10^{-6} sekundy. Podstawowa metoda detekcji ładunku pozornego polega na wykorzystaniu szerokiego pasma widma generowanego przez pojedyncze impulsy wyładowań (górna granica to ok. 1500 kHz) i scałkowaniu ich sygnałów prądowych po czasie. W ogólności: $q_p = \int i(t)dt$. Obowiązuje tu zasada: im krótszy czas narastania i trwania impulsu tym szersze widmo.

Czułość pomiaru wnz zależy od pojemności kondensatora sprzęgającego C_k. Autorzy tego opracowania używają kondensatora o pojemności 1000 pF.

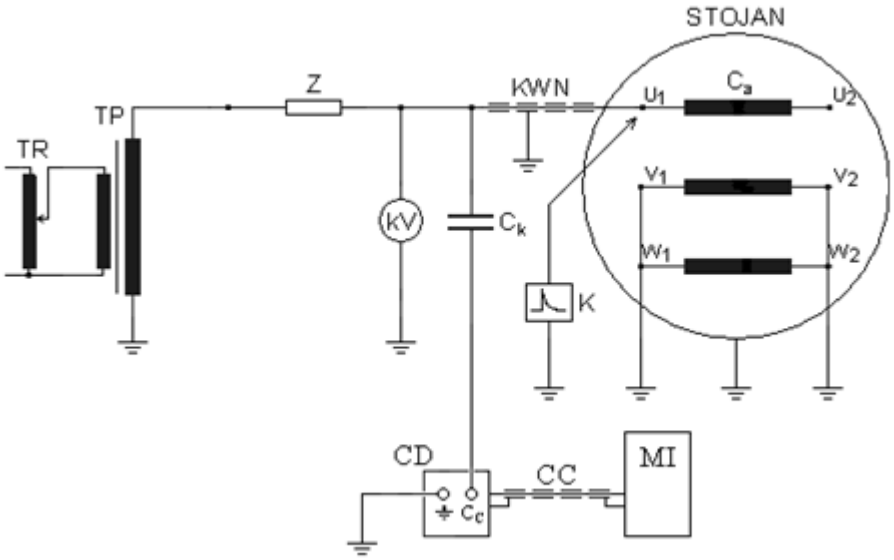
Jeśli chodzi o impedancję pomiarową Z_m to stanowi ona obwód rezonansowy RLC równoległy. Na wejściu wzmacniacza detektora impuls prądowy i(t) o charakterze impulsu Diraca zamienia się na napięciowy u(t), który można przedstawić wzorem ogólnym: $u(t) = \frac{q_p}{C} \cdot e^{-\alpha t}[\cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t]$

gdzie: q_p – ładunek pozorny impulsu wnz,

α – współczynnik tłumienia obwodu równy,

ω – pulsacja drgań własnych obwodu RLC,

Istotną cechą tej zależności jest proporcjonalność u(t) do wartości rejestrowanego ładunku pozornego q_p.



Rysunek 7. Schemat układu do pomiaru wyładowań niezupełnych w izolacji uzwojeń stojana
Oznaczenia: TR – transformator regulacyjny, TP – transformator probierczy, Z – filtr, kV – kilowoltomierz, C_k – kondensator sprzęgający, C_a – badany obiekt pojemnościowy, KWN – kabel wysokonapięciowy, K – kalibrator, CD – urządzenie sprzęgające, CC – kabel połączeniowy, MI – przyrząd pomiarowy.

Zasadniczo istnieją dwie metody rejestracji wyładowań niezupełnych. Metoda **on-line**, czyli stałego monitoringu rozwoju wnz wymaga odpowiedniego przygotowania obiektu przed uruchomieniem (wybór i instalacja czujników) oraz wiąże się z koniecznością pokonania trudności z transmisją i zapisem danych. W praktyce podczas badań diagnostycznych stosuje się metodę **off-line**, czyli pomiarów i rejestracji wnz podczas postoju maszyny.
Metoda off-line opisana w [4] daje możliwość pomiaru ładunku pozornego wyładowań niezupełnych, będących następstwem typowych defektów izolacji [7]:

1. <u>w układzie wewnętrznym:</u>
   - szczeliny i jamki powstałe podczas produkcji izolacji uzwojenia, np. zły materiał (technologia RESIN RICH) lub złe przesycenie żywicą (VPI),
   - rozwarstwienia i pęknięcia izolacji powstałe w wyniku eksploatacyjnych naprężeń termoelektrycznych, elektrodynamicznych i mechanicznych,
   - rozwarstwienia na styku miedź – izolacja główna: szczeliny na przeplotach Roebla, nieefektywna wewnętrzna ochrona przeciwjarzeniowa;

2. <u>w układzie zewnętrznym:</u>

- wyładowania żłobkowe: nieskuteczna ochrona przeciwjarzeniowa na prętach lub szczeliny pomiędzy żelazem rdzenia a prętami (brak wypełnienia spoiwem przewodzącym),
- wyładowania powierzchniowe na połączeniach czołowych pomiędzy warstwami uzwojenia i na rozdziałach faz (wyprowadzenia ze żłobków),
- wyładowania powodowane występowaniem dużych natężeń pola elektrycznego w pobliżu części metalowych uziemionych lub pozostających na wolnym potencjale.

Podczas próby napięciowej aparatura rejestruje różnorodne parametry wyładowań niezupełnych, z których najistotniejsze to:

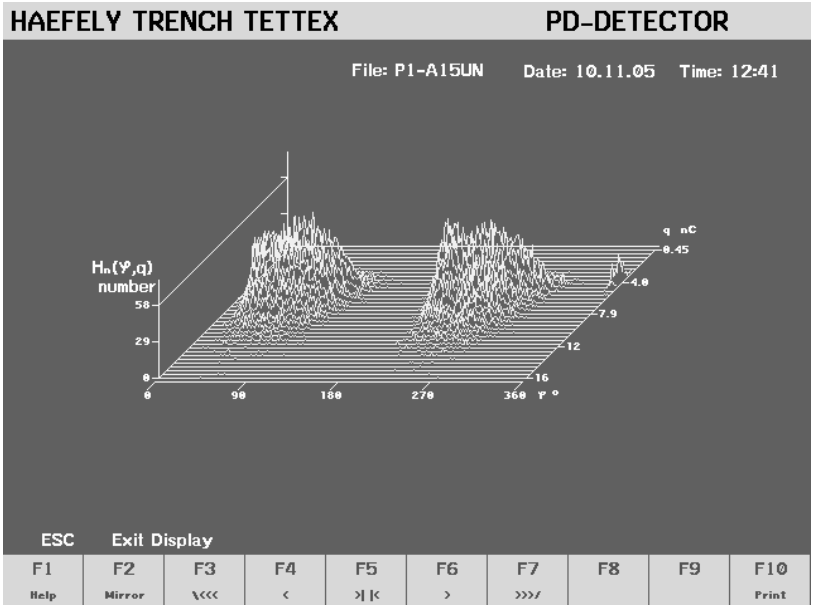
- $q_{max}(t)$ – ładunek pozorny maksymalny w funkcji czasu rejestracji,
- $w_{max}(t)$ – energia wyładowań niezupełnych w funkcji czasu rejestracji,
- $D(t)$ – parametr kwadratowy w funkcji czasu rejestracji,
- $H_n(\varphi,q)$ – rozkład liczbowy wyładowań wg kąta fazowego i q_{max},
- $H(q)$ – rozkład liczbowy wyładowań wg q_{max}

W praktyce pomiarowej stosuje się dwa sposoby rejestracji danych:

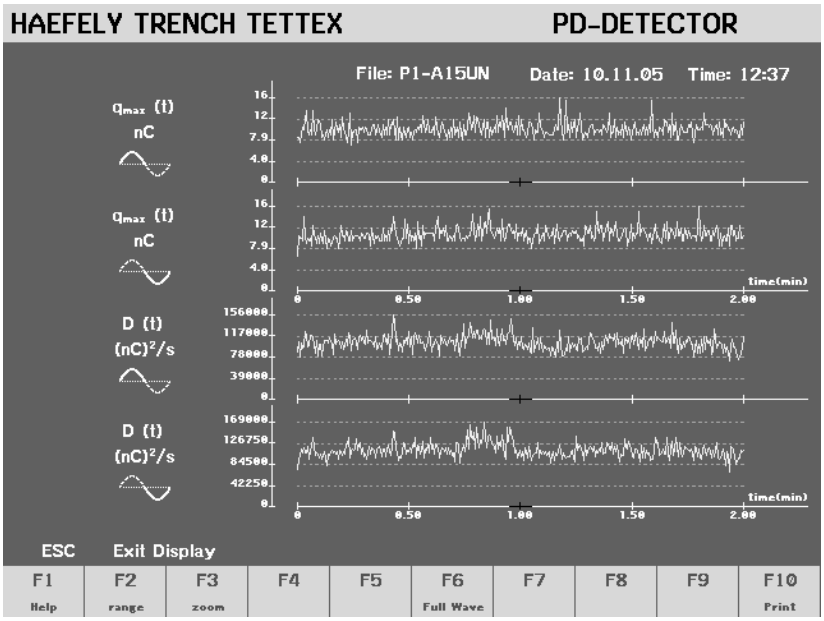
- pomiary standardowe (*routine mode*), oraz
- pomiary analityczne (*analyse mode*).

W przypadku pomiarów standardowych notuje się mniej danych niż przy pomiarach analitycznych, wykonuje się je głównie dla wyznaczenia tzw. *krzywej* q-v zależności ładunku pozornego od napięcia próby q = f(U). Aby otrzymać taką krzywą należy jednostajnie podnosić napięcie do wartości maksymalnej próby, a następnie obniżać je do zera. Na podstawie przebiegu q-v określa się <u>napięcie początkowe</u> wnz U_i (tj. napięcie, przy którym zaczynają pojawiać się istotne poziomy ładunku pozornego q), <u>napięcie gaśnięcia</u> wnz U_e (tj. napięcie, przy którym zanikają wyładowania niezupełne) oraz ładunek maksymalny Q_{max}, który zazwyczaj pojawia się w okolicach najwyższego napięcia probierczego.

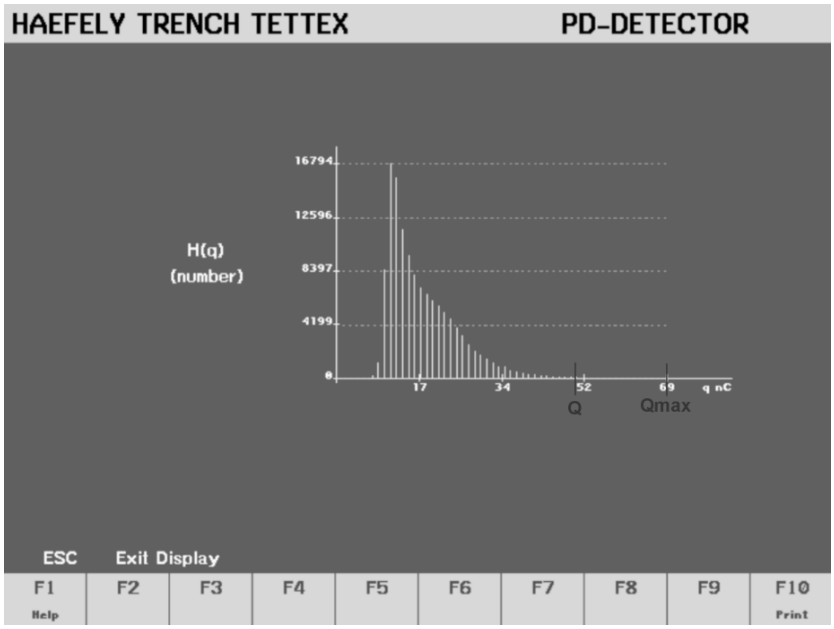
Poniżej przedstawiono przykłady wydruków, otrzymanych z detektora wnz typu *Haefely TE-571* podczas pomiarów układu izolacyjnego uzwojeń stojana generatora:



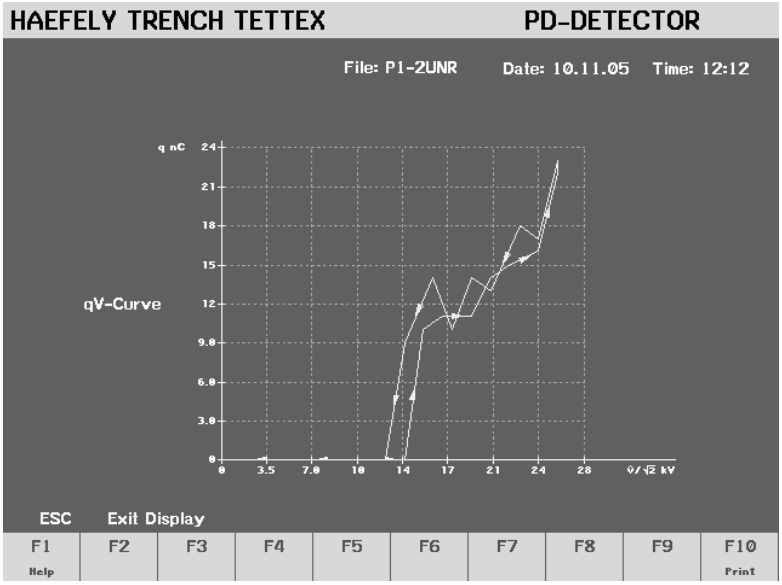
Rysunek 8. Trójwymiarowy obraz liczby ładunków n w funkcji ładunku q i kąta fazowego.



Rysunek 9. Wyznaczenie ładunku qmax i parametru D w dodatniej ujemnej połówce sinusoidy napięcia probierczego.



Rysunek 10. Rozkład gęstości ładunku n-q. Wyznaczenie ładunku Q¬max oraz Q powtarzającego się z częstością 10 razy na sekundę.



Rysunek 11. Przykład wyznaczenia krzywej q-v

Przyjmuje się, że przekroczenie pułapu 50 - 60 nC świadczy o zaawansowanym stadium degradacji izolacji stojana, a w przypadku nowego generatora o poważnych wadach w procesie produkcji i montażu uzwojeń i/lub izolacji.

Nie mniej istotnym, jeśli nie ważniejszym, czynnikiem jest trend zmian parametrów wnz, uzyskiwanych w trakcie badań powtarzanych okresowo na tym samym generatorze.

Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym artykule metody diagnostyczne są skutecznym narzędziem w diagnostyce układów izolacyjnych generatorów, a kompetentna ocena wyników badań pozwala określić stan techniczny izolacji uzwojeń oraz prognozować „czas życia” układu izolacyjnego. Służby odpowiedzialne ze eksploatację generatorów mogą na bazie posiadanych wyników badań prowadzić odpowiedzialną politykę w zakresie przeglądów i remontów, które wykonywane w odpowiednich czasookresach wydłużają czas eksploatacji generatora oraz zabezpieczają przed skutkami awarii. Lepiej bowiem zapobiegać niż leczyć, gdyż koszt diagnostyki nie przekracza kilku % kosztów związanych z remontem, a koszty ewentualnej awarii są z reguły ogromne.

Literatura:

1. Glinka T.: *Badania maszyn elektrycznych w przemyśle.*; KOMEL, Katowice 2002,
2. Florkowska B.: *Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych*. AGH, Kraków 2009,
3. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydroń P.: *„Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia.* PAN, Warszawa 2001,
4. PN – EN – 60270 : 2003 *„Wysokonapięciowa technika probiercza – Pomiary wyładowań niezupełnych”*.
5. PN – E – 04700 : 1998 „Wytyczne przeprowadzania pomontażowych badań odbiorczych”
6. *Podręcznik diagnostyki izolacji powyżej 1 kV.* Materiały MEGGER
7. *Ramowa Instrukcja Eksploatacji Generatorów Synchronicznych*, ENERGOPOMIAR – ELEKTRYKA Sp. z o.o., Gliwice 2009;