

DIAGNOSTYKA STANU TECHNICZNEGO IZOLATORÓW PRZEPUSTOWYCH ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

Marek OLESZ¹, Jacek HARAS²

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki,
Katedra Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć
tel: 58 347-18-20, e-mail: marek.olesz@pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny
tel: 58 347-18-63, e-mail: jacharas@pg.edu.pl

Streszczenie: W referacie przedstawiono zasady sprawdzania jakości izolatorów przepustowych średniego napięcia (SN) za pomocą metody radiograficznej (RT) oraz pomiaru wyładowań niezupełnych (wnz). Ostatnie badanie jest jedną z pozycji zawartych w badaniach wyrobu normy [5]. Dodatkowo badania te rozszerzono o próby napięciem probierczym przemiennym. Z uwagi na negatywne wyniki pomiaru wnz za pomocą metody RT udało się określić lokalizację wtrąceń gazowych i ich korelacje z poziomem rejestrowanych wnz.

Słowa kluczowe: izolatory przepustowe, próby wyrobu, lokalizacja wad

1. WSTĘP

Izolatory przepustowe są ważnym elementem układu izolacyjnego rozdzielnic elektrycznej lub transformatora energetycznego z uwagi na odpowiednią konstrukcję zapewniającą prawidłową wytrzymałość cieplną przy przepływie prądu w wewnętrznym torze prądowym, elektryczną w warunkach przepięć i długotrwałych narażeń (przy niskim poziomie wyładowań niezupełnych) oraz mechaniczną dla przepływu prądów zwarciovych.

Przepusty powinny wytrzymywać podane wyżej narażenia w stanie pracy normalnej jak i awaryjnej tak, aby nie stanowiły zagrożenia dla pracy innych układów stacyjnych i ludzi [1, 2].



Rys. 1. Przykładowe konstrukcje izolatorów przepustowych różnych producentów

Podstawę oceny izolatorów przepustowych średniego napięcia stanowi norma PN-EN 60137 - Izolatory przepustowe na napięcie przemiennie powyżej 1000 V [5]. Ze względu na systemy kontroli produkcji w artykule

skoncentrowano się nad oceną gotowego wyrobu pod kątem potwierdzenia jego rzeczywistego stanu technicznego. Wymagania dotyczące badań zawarto w dokumencie [5] w punkcie 7, gdzie podzielono je na próby typu (p. 7.2.1) oraz wyrobu (p. 7.2.2). Badania te pozwalają w sposób jednoznaczny potwierdzić jakość proponowanego do sprzedaży wyrobu i są gwarantem jego bezpiecznej eksploatacji. W przypadku kontroli produkcji i uzyskania negatywnych wyników badań należy określić innymi metodami przyczynę wad wewnętrznych w celu zmiany komponentów materiałowych, technologii produkcji, czy warunków magazynowania lub transportu.

pozytywne wyniki podanych badań są istotne z punktu niezawodności systemu elektroenergetycznego lub instalacji wewnętrznej odbiorcy, gdyż zapewniają prawidłowe działanie izolatora zarówno przy narażeniach długotrwałych i dorywczych.

2. PRÓBY WYROBU DLA IZOLATORÓW PRZEPUSTOWYCH SN

Norma [5] dotycząca izolatorów przepustowych w badaniach wyrobu proponuje następujący zestaw badań (tablica 1) obowiązujący dla izolatorów żywicznych:

- pomiar za pomocą mostka Scheringa współczynnika strat dielektrycznych $\tan \delta$ oraz pojemności własnej izolatora oraz ładunku wyładowań niezupełnych przed badaniami napięciowymi,
- próbę napięciem wytrzymywanym udarowym piorunowym na sucho (dotyczy wyłącznie przepustów typu transformatorowego o $U_m \geq 245$ kV),
- próbę napięciem wytrzymywanym udarowym przemiennym na sucho,
- ponowny pomiar najpierw intensywności wnz, a potem współczynnika strat dielektrycznych mostkiem Scheringa w celu określenia uszkodzenia izolacji wyrobu,
- oględziny i pomiary.

Wyprodukowany izolator należy umieścić w komorze probierczej, a badanie przeprowadzić po 24 h w celu uzyskania równowagi termicznej między izolatorem i otaczającym go powietrzem. Przed pomiarem mierzy się temperaturę, ciśnienie i wilgotność w celu wprowadzenia

odpowiednich poprawek na wpływ warunków atmosferycznych powietrza.

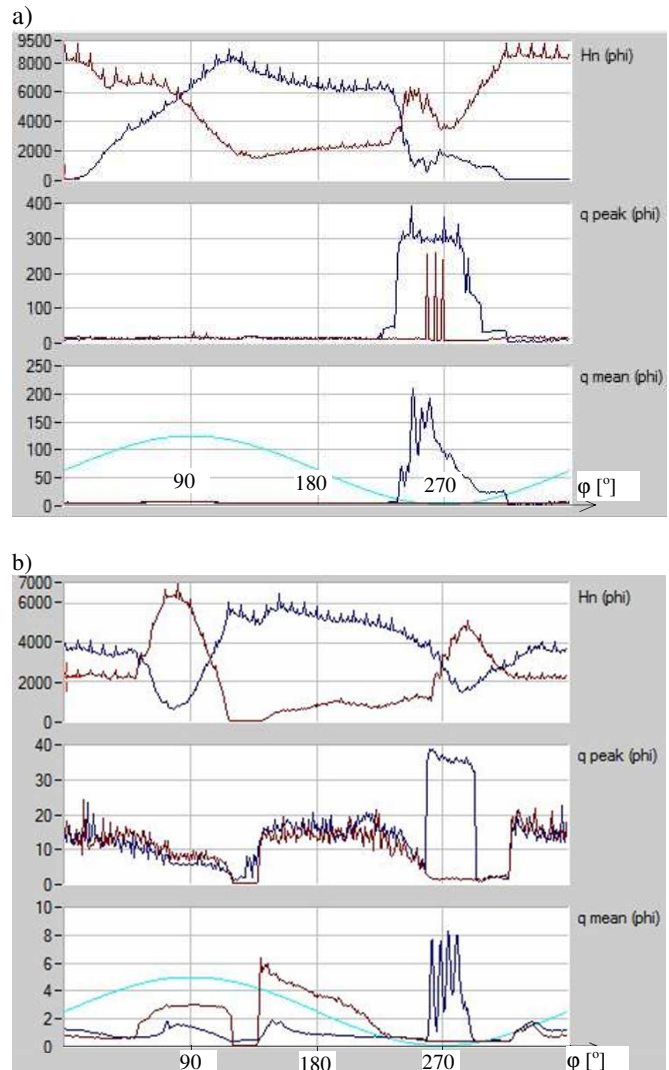
Tablica 1. Warunki przeprowadzanych prób wyrobu dla izolatorów przepustowych typu kondensatorowego o napięciu znamionowym nie przekraczającym 36 kV, o izolacji z żywicy lanej lub prasowanej [5]

próba	warunki próby	wymaganie
współcz. strat $\text{tg}\delta$	brak prądu w przepięciach, temperatura 10 – 40°C	napięcie $1,05 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$
pomiar pojemności	10 – 40°C	napięcie w zakresie 2 – 20 kV wg ustalonego programu, $\text{tg}\delta_{\text{max}} < 0,007$ dla napięcia próby, nie wprowadza się parametru dotyczącego przyrostu $\text{tg}\delta$
napięcie udarowe	nie dotyczy	
pomiar napięciem przemienicznym	czas próby 60 sekund	$U_m=3,6 \text{ kV}$ $U_{wps}=10 \text{ kV}$ $U_m=7,2 \text{ kV}$ $U_{wps}=20 \text{ kV}$ $U_m=12 \text{ kV}$ $U_{wps}=28 \text{ kV}$ $U_m=17,5 \text{ kV}$ $U_{wps}=38 \text{ kV}$ $U_m=24 \text{ kV}$ $U_{wps}=50 \text{ kV}$ $U_m=36 \text{ kV}$ $U_{wps}=70 \text{ kV}$
pomiar wnz	podczas obniżania napięcia wytrzymawanego na sucho	czułość 5 pC lub 20% spodziewanej wartości 10 pC dla $1,5 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$ 5 pC dla $1,05 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$
próba izolacji zacisku		zacisk probierczy $U > 2 \text{ kV}$ zacisk napięciowy $2 \times U_n$

3. POMIARY WNZ WYBRANYCH IZOLATORÓW

Badania wnz dotyczą dwóch wybranych izolatorów SN oznaczonych jako A i B do których zgodnie z wymaganiami opisanymi w p. 2 przykładano na 60 sekund napięcie probiercze $U_m=36 \text{ kV}$. Następnie po obniżeniu napięcia do 31,2 kV i 21,8 kV wykonywano pomiar wnz przyrządem LDS – 6 z odpowiednim oprogramowaniem do ich analizy. Wyładowania niezupełne analizowano przez 1 minutę dla obu podanych napięć 31,2 kV i 21,8 kV oczekując maksymalnego ładunku wnz q_{max} na poziomie odpowiednio 10 pC i 5 pC. Konstrukcja izolatora charakteryzowała się wysterowaniem pola elektrycznego za pomocą wewnętrznej dodatkowej elektrody z siatki miedzianej w kształcie walca. Tego rodzaju rozwiązanie w stosunku do stosowania kieszeni przeciwulotowych oraz metalizacji powierzchni pozwala skutecznie kontrolować składową promieniową i osiową pola elektrycznego, aby ograniczać występowanie iskier ślizgowych. Z drugiej strony wskutek błędów technologicznych mogą łatwiej występować niejednorodności struktury wewnętrznej przy pierścieniu sterującym, co może intensyfikować liczbę i poziom wnz. Na rysunku 2a) i 2b) pokazano wykresy liczby wnz $H_n(\varphi)$, ładunku maksymalnego q_{peak} (φ oraz uśrednionego q_{mean} (φ w funkcji kąta fazowego napięcia o wartości skutecznej odpowiednio 31,2 i 21,8 kV. Przy wyższym napięciu występowały głównie wyładowania o charakterze ulotowym wyładowania charakteryzujące się wysokim poziomem wyładowań o biegunowości ujemnej występujących przy kącie fazowym około 270° (q_{peak} (φ do 400 pC) [3]. Źródłem tego rodzaju wnz ze względu na duże wartości natężenia pola elektrycznego może być nieprawidłowe wykończenie powierzchni pierścienia wysterowującego pole,

bądź elektrody wysokiego napięcia lub uziemionej [4]. Zmniejszenie napięcia do 21,8 kV drastycznie ogranicza poziom wnz (rys. 2b) do 40 pC o podobnym charakterze. Dodatkowo przy niskim napięciu występuje drugi typ wnz o wartości do 20 pC wskazujący na charakter wyładowań wewnętrznych lub ślizgowych. W celu potwierdzenia tej tezy wykonano badania radiograficzne szerzej opisane w kolejnym punkcie artykułu.

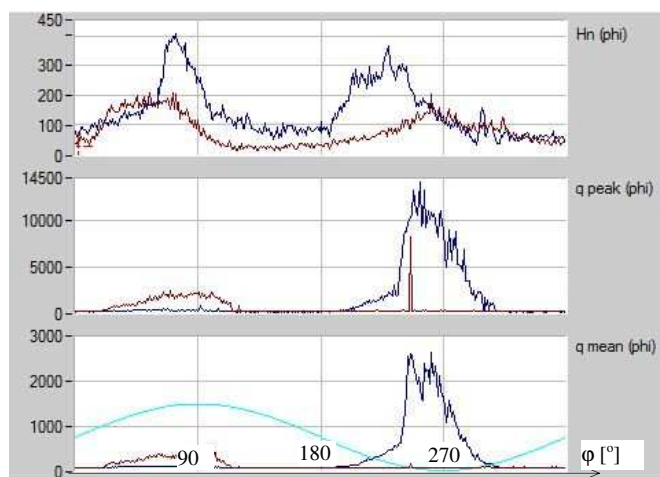


Rys. 2. Wyniki pomiaru natężenia ładunku wnz dla izolatora A otrzymane przy napięciu a) 31,2 kV oraz b) 21,8 kV

Z kolei na rysunku 3 pokazano wyniki pomiaru wnz dla izolatora B, gdzie przy napięciu 31,2 kV występuje, podobnie jak w poprzednim wypadku, silna grupa wnz o charakterze ulotowym, ale o znacznie większym ładunku maksymalnym wyładowań dochodzącym aż do 14500 pC. Oprócz grupy wnz o charakterze ulotowym występują wyładowania ślizgowe lub wewnętrzne o mniejszym natężeniu do 2100 pC.

Na podstawie tak określonych wyników badań wnz można postawić tezę o nieprawidłowej jakości wykonania obu izolatorów, ze wskazaniem dla przypadku B wysokiego prawdopodobieństwa obecności wewnętrznych wad o dużej liczbie i rozmiarach intensyfikujących występowanie wyższych poziomów wnz. W obu przypadkach przekroczenie dopuszczalnego przez normę [5] poziomu wnz wskazuje na problemy technologiczne w czasie produkcji izolatora, które powodują występowanie wtrąceń

gazowych i rozwarstwień. W celu potwierdzenia tej tezy wykonano dodatkowe badania radiograficzne, które dla analizowanego izolatora pozwalają na wykrywanie wad o minimalnym wymiarze 1 mm.



Rys. 3. Wyniki pomiaru natężenia ładunku wnz dla izolatora B otrzymane przy napięciu 31,2 kV

4. WYNIKI BADAŃ RADIOGRAFICZNYCH (RT)

Badania RT wykonano w celu wykrycia nieciągłości w korpusie izolatora, który nałożono metodą odlewania na wewnętrzne elementy izolatora: rurę z kołnierzami, siatkę wewnętrzną, wtopkę M12 i siatkę.

Prześwietlane ścianki zostały wykonane z kompozycji żywicznej o składzie typowym dla przemysłu elektrotechnicznego i miały grubości z zakresu od 50 ÷ 125 mm. Powierzchnia izolatora jest zakrzywiona, więc dla pokazania wewnętrznych nieciągłości wykonano po osiem ekspozycji na obwodzie dwóch badanych izolatorów stosując następującą metodykę badań:

- błona: kodak MX125 (klasa klasa C4 wg PN-EN ISO 11699-1: 2012),
- okładki wzmacniające - 0,05 mm Pb,
- odległość ogniskowa – 650 mm,
- parametry ekspozycji: 3,5 mA, 120 kV, 2,5 min.,
- uzyskana wykrywalność - W15 wg EN ISO19232-1 (0,125 mm Fe).

Wyniki badań RT zestawiono w tablicach 2 i 3 odpowiednio dla dwóch badanych izolatorów oznaczonych odpowiednio jako A i B.

Na podstawie analizy tablic 1 i 2 wynika, że w przypadku izolatora B dla którego zmierzano zdecydowanie wyższy poziom wnz, stwierdzono większą liczbę wad i ich uśredniony wymiar. Dodatkowo w izolatorze B występowały pęcherze podłużne o znacznej długości około 20 mm i średnicy 2 mm. Najprawdopodobniej ze względu na ich liczbę (wykryto 4 takie obiekty) i wymiary obserwowano dla izolatora B znacznie wyższy poziom wylądowań niezupełnych w stosunku do wyrobu A. Przypadkowość powstawania miejsc nieciągłości izolacji wskazuje na konieczność poprawy technologii odlewania izolatora. Należy także rozważyć lepszą obróbkę wszelkich krawędzi elektrod, tak aby ograniczać w tych miejscach pole elektryczne i nie dopuszczać do powstawania wylądowań.

Wykryte na radiogramach wskazania szczelin miały długości od 16 mm do 65 mm. Suma długości wykrytych wskazań wyniosła odpowiednio: około 260 mm dla izolatora oznaczonego B i 414 mm dla izolatora oznaczonego A.

Stanowiło to około 41,4÷65,9% długości obwodu izolatora (w miejscu występowania wskazań przyjęto

następujące średnie wartości: dla średnicy podziałowej preformu około 200 mm i długość związanego z nim obwodu około 628 mm.

Tablica 2. Wyniki badań radiograficznych izolatora A, 36 kV

nr radio – gramu	opis wad (nieciągłości)		
	rodzaj wady - opis wskazania wg ASTM D2563-94	współrzędna x [mm]	wymiar wskazania L [mm], d x b [mm]
A - 0	brak wskazań od nieciągłości wewnętrznych	-	-
A - 2	2 szczeliny:	+36; +46	20; 20
A - 3	wad nie wykryto		
A - 4	3 szczeliny	+36; 46; 54	18; 16; 65
A - 5	2 szczeliny pęcherze kuliste	-70; +34	40; 50 φ = 2 mm
A - 6	2 szczeliny	-70; +36	30; 15
A - 7	szczelina	-75	60
A - 8	2 szczeliny	-70; +50	50; 30
liczba szczelin		12	
średni wymiar szczeliny		34,5 mm	
liczba pęcherzy		1	
średnia średnica pęcherza		2 mm	

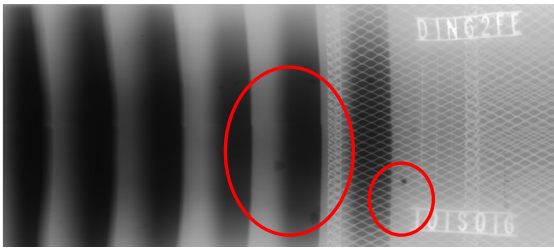
Tablica 3. Wyniki badań radiograficznych izolatora B, 36 kV

nr radio – gramu	opis wad (nieciągłości)		
	rodzaj wady - opis wskazania wg ASTM D2563-94	współrzędna x [mm]	wymiar wskazania L [mm], d x b [mm]
B-0	szczelina pęcherze kuliste pęcherz podłużny	-55 -92÷-140 -150	L=25 φ = 5; 6 25x2
B - 2	szczelina pęcherze kuliste pęcherz podłużny	-55 -150 -130	L=55 φ = 5 20x2
B - 3	pęcherz podłużny	-130	25x2
B - 4	2 szczeliny pęcherze podłużne	-70 +50	L=14; 20 20x2
B - 5	2 szczeliny; wygięta siatka metalowa przy "zakładce": ok.120 ⁰ i przesunięta o 7 mm	-70; 50	L=50; 30
B - 6	pęcherze na żebrach - widoczne także na powierz. zewnętrz.	-130	φ =1 ÷ 3
B - 7	szczelina pęcherze podłużne pęcherze kuliste	-55 -130 -90	L=65 20x φ = 3 ÷ 5
B - 8	wskazań wad nie wykryto	-	-
liczba szczelin		7	
średni wymiar szczeliny		41,3 mm	
liczba pęcherzy w tym 4 podłużne		8	
średnia średnica pęcherza		4 mm	

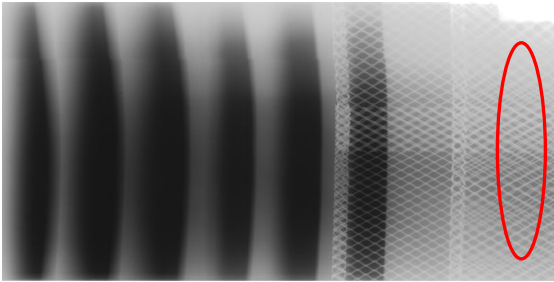
Na podstawie lokalizacji miejsc występowania wskazań typu szczeliny należy stwierdzić, że prawdopodobnie powstały one w miejscu nieprawidłowego spojenia „niesklejenia” masy żywicznej z pierścieniami wewnętrznymi (preformami żywicznymi), ustalającymi położenie siatki wewnętrznej względem osi izolatora.

Szczeliny te ze względu na znaczne wymiary i umiejscowienie w pobliżu elektrody sterującej powodują generowanie silnych wnz typu ulotowego widocznych na rysunkach 2 i 3.

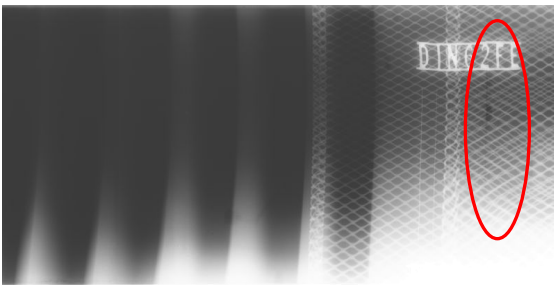
a)



b)



Rys. 4. Przykłady radiogramów ze wskazaniem wad na fragmencie obwodu izolatorów: a) izolator A - pęcherze gazowe; b) izolator B – szczelina (nr 1).

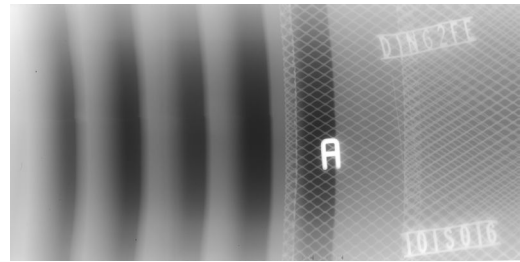


Rys. 5. Przykład wady typu szczelina (nr 2) na fragmencie obwodu izolatora B

Najbardziej prawdopodobne, bezpośrednie przyczyny niesklejenia – to:

- brak zwilżania na powierzchni pierścienia - preforma żywicznego (zatłuszczona lub zabrudzona powierzchnia),
- miejscowe (nie wymieszane w mniejszej objętości) nieprawidłowe proporcje żywicy i mączki SiO₂,
- „zakurzenie” – np. zaproszenie mączką kwarcową powierzchni pierścieni lub siatki,
- nieusunięte nierówności krawędzi („grat”) pierścienia (preforma żywicznego), ustalającego siatkę wewnętrzną izolatora względem jego osi podłużnej.

Prawidłowy obraz struktury wewnętrznej pokazano na rys. 6 dla którego rozdzielczość aparatury pozwala wykluczyć występowanie wad wewnętrznych o wymiarach większych niż 1 mm, dla których mogą mieć miejsce wykrywalne w metodzie elektrycznej wnz.



Rys. 6. Przykład radiogramów dla obszarów bez widocznych defektów na fragmentach obwodu izolatora A

5. WNIOSKI

Poziom mierzonych wnz jest skorelowany z liczbą i rozmiarem wad stwierdzonych w strukturze materiału izolacyjnego.

Niewielkie zwiększenie wymiaru wady powoduje silny wzrost poziomu wyładowań niezupełnych.

Wprowadzona do normy [5] metoda pomiaru wnz jako aprobaty wyrobu gotowego jest skutecznym narzędziem do wykrywania nieprawidłowych konstrukcji lub wad wewnętrznych w układzie izolacyjnym.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Chunyu Wang, Xiongyi Huang i inni, Influence of void defects on partial discharge behavior of superconducting busbar insulation, Fusion Engineering and Design, Volume 119, June 2017, Pages 29-34.
2. Adamczyk B., Florkowska B., Analiza warunków sterowania pola elektrycznego w wysokonapięciowych izolatorach przepustowych, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 30, 2011, str. 13 -16.
3. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia. Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa 2001.
4. Gacek Z., Kiś W., Szadkowski M., Model izolatora przepustowego transformatorowego z izolacją miękką, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Elektryka z. 137, 1994, str. 17 -33.
5. PN-EN 60137:2010 - Izolatory przepustowe na napięcia przemienne powyżej 1 000 V.

TESTING OF TECHNICAL STATUS OF MIDDLE TRANSMISSION BUSBARS INSULATORS

The paper presents principles of checking the quality of medium voltage MV busbars insulators by X-ray method and measurement of partial discharges (PD). The last test is one of the items included in the product standard [5]. In addition, these tests have been extended by power frequency voltage withstand test. Due to the negative results of the measurement, the X-ray method successfully determined the location of the air voids and their correlation with the level recorded partial discharges.

Keywords: bushing insulators, product tests, location defects