

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: 583471820 e-mail: marek.olesz@pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny,
tel: 583471863 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]

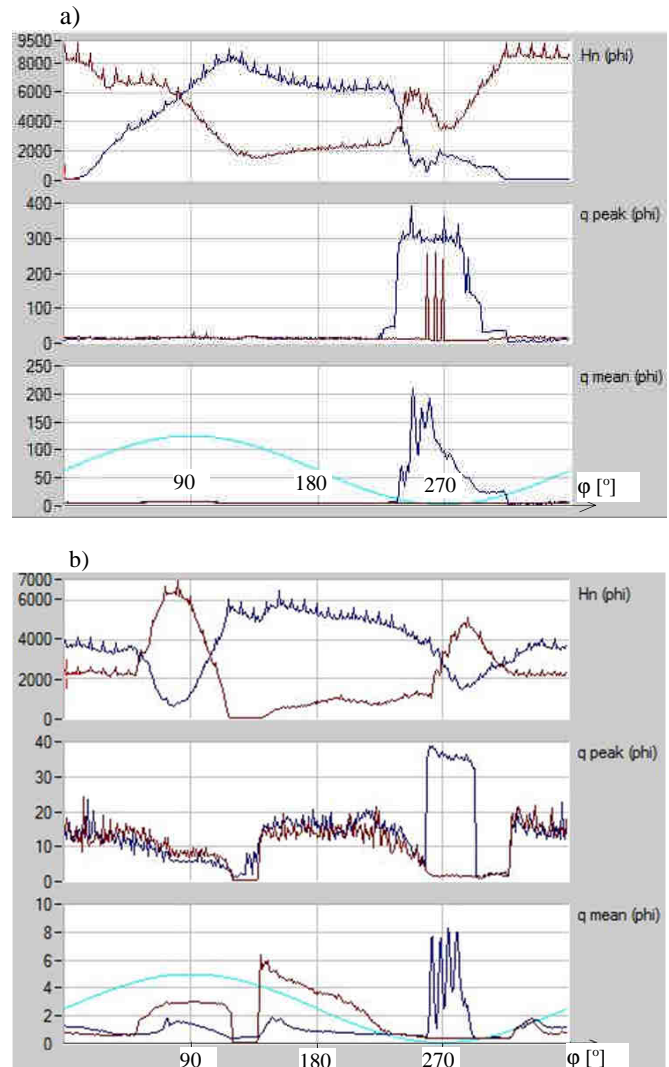
próba	warunki próby	wymaganie
współcz. strat $\text{tg}\delta$	brak prądu w przepięciu, temperatura 10 – 40°C	napięcie $1,05 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$
pomiar pojemności		napięcie w zakresie 2 – 20 kV wg ustalonego programu, $\text{tg}\delta_{\text{max}} < 0,007$ dla napięcia próby, nie wprowadza się parametru dotyczącego przyrostu $\text{tg}\delta$
napięcie udarowe	nie dotyczy	
pomiar napięciem przemiennym	czas próby 60 sekund	$U_m=3,6 \text{ kV } U_{\text{wps}}=10 \text{ kV}$ $U_m=7,2 \text{ kV } U_{\text{wps}}=20 \text{ kV}$ $U_m=12 \text{ kV } U_{\text{wps}}=28 \text{ kV}$ $U_m=17,5 \text{ kV } U_{\text{wps}}=38 \text{ kV}$ $U_m=24 \text{ kV } U_{\text{wps}}=50 \text{ kV}$ $U_m=36 \text{ kV } U_{\text{wps}}=70 \text{ kV}$
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 $q_{\text{peak}}(\varphi)$ oraz uśrednionego $q_{\text{mean}}(\varphi)$ w funkcji kąta fazowego napięcia o wartości skutecznej odpowiednio 31,2 i 21,8 kV. Przy wyższym napięciu występowały głównie wyładowania o charakterze ulotowym charakteryzujące się wysokim poziomem wyładowań o biegunowości ujemnej występujących przy kącie fazowym około 270° ($q_{\text{peak}}(\varphi)$ 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.

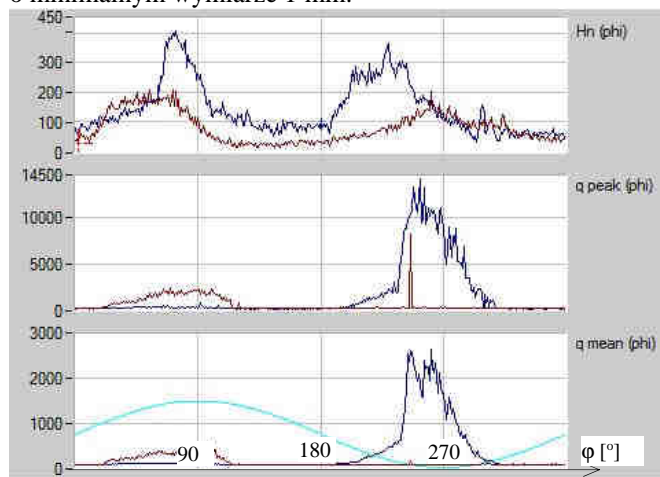


Rys. 2. Wyniki pomiaru natężenia ładunku wnz dla izolatora A otrzymane przy napięciu a) 31,2 kV oraz b) 21,8 kV

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 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 wzn 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 kołnierkami, 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 zmierzono zdecydowanie wyższy poziom wzn, 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 wyładowań niepełnych 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 wyładowań.

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

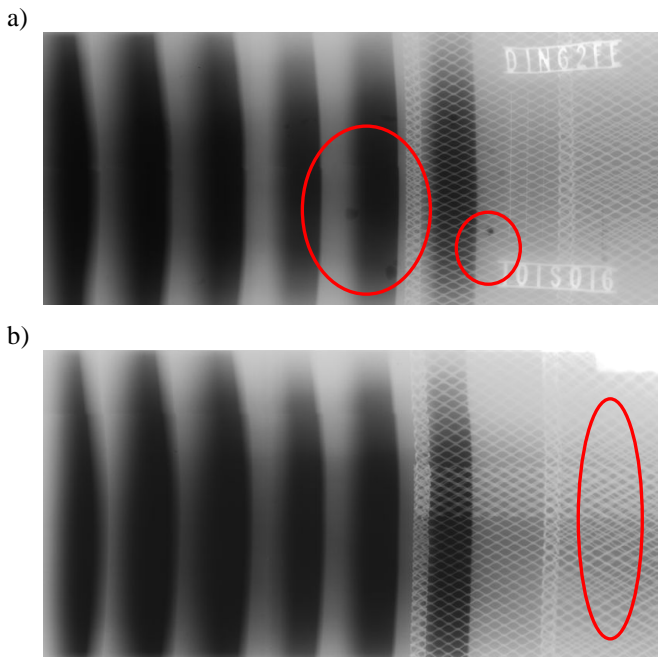
nr radio – gramu	opis wad (nieciągłości)		
	rodzaj wady - opis wskazania wg ASTM D2563-94	współrzędna x [mm]	wymiar wskazania L [mm], d x b [mm]
A - 0	brak wskazań od nieciągłości wewnętrznych	-	-
A - 2	2 szczeliny:	+36; +46	20; 20
A - 3	wad nie wykryto		
A - 4	3 szczeliny	+36; 46; 54	18; 16; 65
A - 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

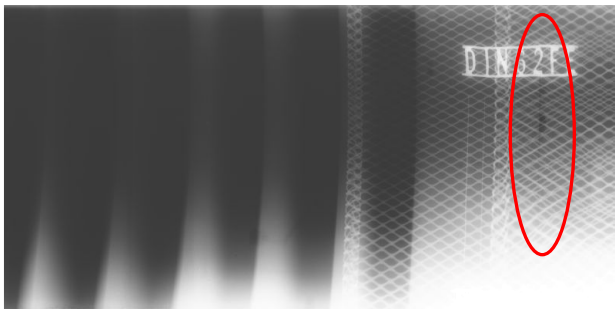
nr radio – gramu	opis wad (nieciągłości)		
	rodzaj wady - opis wskazania wg ASTM D2563-94	współrzędna x [mm]	wymiar wskazania L [mm], d x b [mm]
B-0	szczelina pęcherze kuliste pęcherz podłużny	-55 -92÷-140 -150	L=25 φ = 5; 6 25x2
B - 2	szczelina pęcherze kuliste pęcherz podłużny	-55 -150 -130	L=55 φ = 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° i przesunięta o 7 mm	-70; 50	L=50; 30
B - 6	pęcherze na żebrach - widoczne także na powierz. zewnątrz.	-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.



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:

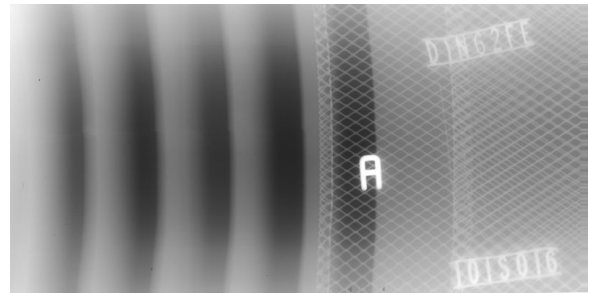
- brak zwilżania na powierzchni pierścienia - preforma żywicznego (zatłuszczona lub zabrudzona powierzchnia),
- miejscowe (nie wymieszane w mniejszej objętości) nieprawidłowe proporcje żywicy i mączki SiO₂,
- „zakurzenie” – np. zaproszenie mączką kwarcową powierzchni pierścieni lub siatki,
- nieusunięte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

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.

Key-words: bushing insulators, product tests, location defects

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., Zydróż 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 przemiennie powyżej 1 000 V.