

Tadeusz Łaś, Gerard Lebioda

## POMIARY WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH JAKO OCENA IZOLATORÓW PRZEPUSTOWYCH KONDENSATOROWYCH

### 1. Wstęp

Pomiary wyładowań niezupełnych /wnz/ w izolatorach przepustowych kondensatorowych o izolacji twardej papierowo-bakelitowej, produkowanych w Zakładach Tworzyw Sztucznych ERG w Gliwicach, są prowadzone od kilkunastu lat w Zakładzie Wysokich Napięć IEI i ZTS ERG. Pomiary wnz wykonywane są głównie przy pomocy mierników ERA mod. 3,4,5, okresowo również miernikiem zakłóceń radiowych w paśmie częstotliwości 0,9 - - 1,9 MHz, głównie 1 MHz. Na każdym przepuszczeniu jest wykonywany pomiar  $\tan \delta = f/U$ , możliwa jest więc ocena przydatności tej charakterystyki do określenia intensywności wnz w przepustach oraz znalezienie pewnych zależności pomiędzy wynikami tych pomiarów.

### 2. Intensywność wnz w przepustach

Ostatni projekt nowelizacji przepisów IEC Publ.137 /1973/ [1] normalizuje najwyższe dopuszczalne wartości pozornego ładunku wnz  $q$  w przepustach różnych konstrukcji. Wartości te podano w tabeli 1.

Wartości  $q$  w krajowych przepustach przy napięciu probierczym o wartości  $U_N$  na ogół nie przekraczają wartości 1000 - 2000 pC. Większe wartości można spotkać w przypadku wystąpienia znaczniejszych wad w

---

Mgr inż. Tadeusz Łaś - Instytut Elektrotechniki, Zakład Wysokich Napięć,  
Warszawa  
Gerard Lebioda - Zakład Doświadczalny Materiałów Elektroizolacyjnych  
Zakładów Tworzyw Sztucznych "ERG", Gliwice

izolacji przepustu. Pomiary wnz w przepustach transformatorowych są wykonywane z zasady z kulą o średnicy 125 do 250 mm, podwieszoną w części olejowej. Bez podwieszenia kuli wartość  $q$  wnz, których źródłem jest zakończenie toru prądowego /najczęściej rury/ w części olejowej, osiąga wartość rzędu 100 nC.

Tabela 1

Dopuszczalne wartości pozornego ładunku wnz

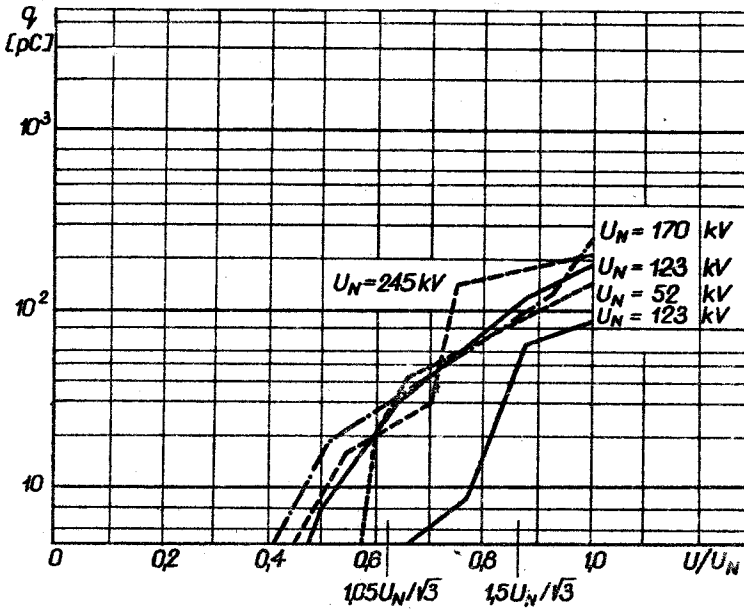
Typ izolacji przepustu	Wielkość ładunku w $10^{-12}$ C przy	
	$1,05 U_N / \sqrt{3}$	$1,5 U_N / \sqrt{3}$
Papier impregnowany olejem	-	10
Papier związany żywicą z nie-metalowymi ekranami	100	250
Papier związany żywicą z metalowymi ekranami	300	-
Papier impregnowany żywicą	-	10
Izolacja lana	-	10
Gaz	-	10

Dla wyładowań krawędziowych, których rozróżnienie umożliwia obserwacja monitora mierników ERA, intensywność wnz nie przekracza na ogół wartości  $q = 50+100$  pC. Stwierdzone i w tym przypadku korzystny ekranujący wpływ kuli w części olejowej. W przypadku znacznych wad technologicznych, np. przesunięcia ekranów w procesie nawijania rdzenia izolacyjnego przepustu, obserwowano wnz krawędziowe do 500 pC przy napięciu probierczym o wartości  $U_N$ .

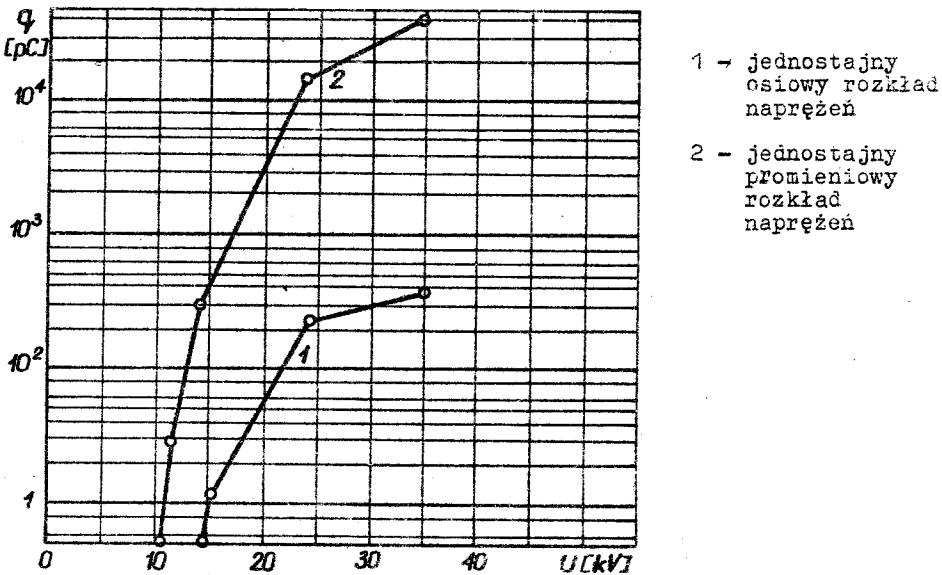
Typowe zależności maksymalnego ładunku pozornego od napięcia podano na rysunku 1.

Duży wpływ na wartość maksymalnego ładunku wnz mogą mieć niedokładności w umieszczaniu ekranów sterujących w procesie zwijania rdzenia. Zmiana obliczeniowego rozkładu ekranów sterujących może łatwo spowodować przekroczenie napięcia zapłonu wnz i ślizgowych. Ilustruje to przykład intensywności wnz i napięcia zapłonu wnz w specjalnie przygotowa-

nym modelach o jednakowych gabarytach, lecz obliczonych na jednostajny osiowy lub jednostajny promieniowy rozkład naprężeń /rys.2/.



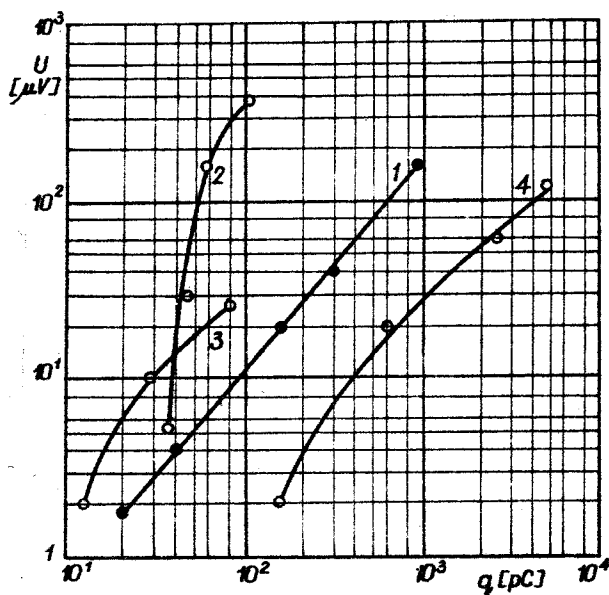
Rys.1. Typowy przebieg  $q=f/U/$  dla przepustów kondensatorowych



Rys.2.  $q=f/U/$  w modelach o jednostajnym osiowym i jednostajnie promieniowym rozkładzie naprężeń

### 3. Korelacje pomiędzy intensywnością wnz mierzoną różnymi metodami

Na rysunku 3 przedstawiono zależność pomiędzy napięciem zakłóceń radioelektrycznych a pozornym ładunkiem wnz. Wynika z niego, że brak jest jednoznacznych zależności, które by pozwoliły na wyznaczenie liczbowego współczynnika umożliwiającego porównywanie pomiarów, wykonywanych obiema metodami.



Rys.3. Zależność pomiędzy napięciem zakłóceń radioelektrycznych  $U$ , a pozornym ładunkiem wnz  $q$  dla przepustów kondensatorowych 1 -  $U_n = 245$  kV, 2,3,4 -  $U_n = 123$  kV, różne egzemplarze tego samego typu

Wyznaczenie charakterystyki  $tq \sigma^f = f/U$  pozwala na określenie, nie zawsze w jednoznaczny sposób, napięcia  $U_0$ . Autorzy stwierdzili, iż określone tak napięcie  $U_0$  odpowiada napięciu zapłonu wnz krawędziowych, zmierzonemu za pomocą miernika wartości  $q_m$ . Natomiast w przypadku wystąpienia w szczelinach i pęcherzach wnz o amplitudach rzędu 1000+2000 pC i braku wnz krawędziowych charakterystyka  $tq \sigma^f = f/U$  jest płaska. Obserwację tę potwierdza obliczenie strat mocy  $\Delta P$  wyznaczonej z pomiaru  $tq \sigma^f$  w zakresie powyżej zagięcia charakterystyki oraz z pomiarów

q miernikiem ERA. Przyjmując typową dla przepustu transformatorowego  $U_N = 123 \text{ kV}$  wartość  $\text{tg } \delta = 70 \cdot 10^{-4}$  i  $\Delta \text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$  pomiędzy napięciami  $74,5 \text{ kV}$  i  $106,5 \text{ kV}$  /napięcia  $1,05 U_N / \sqrt{3}$  i  $1,5 U_N / \sqrt{3}$  wg projektu nowelizacji IEC Publ.137/ oraz pojemność przepustu  $C = 150 \text{ pF}$ , otrzymuje się stratę mocy  $\Delta P = 0,1 \text{ W}$ . Przyjmując z drugiej strony amplitudę wnz krawędziowych  $q = 100 \text{ pC}$  i częstość  $n = 10^4 \text{ s}^{-1}$  /tj.200 na okres/, otrzymuje się przy napięciu  $106 \text{ kV}$  tę samą stratę mocy

$\Delta P = 0,1 \text{ W}$ . Przy braku wyładowań krawędziowych wnz ślizgowe o ładunku pozornym  $q = 5 \text{ nC}$  i częstości  $200 \text{ s}^{-1}$  powoduje tę samą stratę mocy. Natomiast strata mocy pochodząca z wyładowań z mniejszych, pojedynczych defektów nie jest dostatecznie duża, by spowodować znaczniejsze zmiany w wartości  $\text{tg } \delta$ .

Występowanie wnz może spowodować w niektórych przypadkach nie podwyższenie a zmniejszenie zmierzonych wartości  $\text{tg } \delta$ . To pozorne obniżenie wartości  $\text{tg } \delta$  wystąpić może wówczas, gdy występuje źródło wnz w przepuscie w miejscu o pośrednim potencjale oraz silne sprzężenie pojemnościowe pomiędzy tymi wnz a ziemią, z ominięciem gałęzi  $R_3$  mostka Scheringa. Zjawisko takie stwierdzono m.in. w kilku przypadkach przepustów stacyjnych  $123 \text{ kV}$ , w których wystąpiły kawerny w zalewie izolacyjnej pomiędzy rdzeniem a osłoną porcelanową.

Pozorne zmniejszenie wartości  $\text{tg } \delta$  w przepustach i innych układach ze sterowaniem pojemnościowym pola stwierdza się również bez udziału wnz w przypadku występowania innego rodzaju sprzężeń RC pomiędzy punktem o pośrednim potencjale a ziemią [2] i [3].

#### 4. Zróżdła wnz w przepustach

Zasady konstrukcji i obliczeń przepustów kondensatorowych teoretycznie pozwalają na osiągnięcie wysokich napięć zapłonu wnz. Takie wnz powstają jednak na ogół przy niższych napięciach, wskutek istnienia wad w układzie izolacyjnym sterowanego rdzenia. Występowanie wad wynika głównie z faktu wprowadzenia w materiał izolacyjny rdzenia przepu-

stu nieciągłości, jakimi są ekrany sterujące, oraz z faktu warstwowej struktury izolacji. W takim układzie izolacyjnym łatwo mogą powstać szczeliny zarówno w obszarze pomiędzy ekranami, jak i na ich końcach. Źródłem intensywnych wnz mogą być nierówno obcięte krawędzie ekranów, zarówno w części napowietrznej, jak i obtoczonej części olejowej przepustów transformatorowych. Możliwe są również pęcherze i szczeliny w materiale izolacyjnym rdzenia, powstałe w skutek niedostatecznego odprowadzania na zewnątrz produktów gazowych polikondensacji żywicy w procesie nawijania i utwardzania rdzenia.

Występująca w niektórych przypadkach wyraźna pętla histerezy pozornego ładunku wnz przy obniżaniu napięcia oraz wahania  $q$  w czasie pomiaru wskazują na wnz na powierzchni części olejowej przepustu, obtoczonej do krawędzi ekranów. Przyczyną może być nie tylko wada w samym rdzeniu, lecz także niedostateczne odgazowanie i odwodnienie oleju.

Defekty wpływające na wnz krawędziowe odróżniają się od innych określoną lokalizacją w sąsiedztwie krawędzi ekranów, albo dużą gęstością i zbliżonym charakterem i wskutek tego zbliżonym napięciem zapłonu  $U_0$  wnz. W związku z tym klasyczne traktowanie  $U_0$  jako wspólnego dla tych wyładowań jest celowe i przydatne w projektowaniu rdzeni izolacyjnych przepustów.

Dla bliższego zbadania charakteru wnz krawędziowych przyjęto na podstawie pomiarów miernikiem ERA początkową liczbę 200 wyładowań krawędziowych w okresie napięcia probierczego. Stąd można ocenić liczbę punktów, z których rozpoczynają się te wnz na nie więcej niż 50. Przyjmując, iż w izolatorze przepustowym po przekroczeniu  $U_0$  wystąpią wyładowania na 6 skrajnych /wewnętrznych i zewnętrznych/ ekranach, o sumarycznej długości krawędzi 200 cm, to średnią odległość pomiędzy miejscami, w których występują wyładowania, można szacować na ok. 4 cm. Można więc mówić nie o ciągłych, a o punktowych wyładowaniach z krawędzi elektrod powstających w miejscach występowania mikrodefektów.

Potwierdzeniem tych rozważań są wyniki pomiarów wnz serii przepu-

stów transformatorowych  $U_N = 123$  kV, w których zmierzone napięcia zapłonów wnz krawędziowych wynosiły od  $U_0$  do  $1,8 U_0$ , gdzie  $U_0$  jest obliczonym wg wzoru Kappellera /  $U_0 = k \cdot d^{0,45}$  / napięciem zapłonu wnz krawędziowych. Świadczy to o decydującym wpływie defektów na  $U_0$ , którego wartość obliczona wg wzoru Kappellera jest dolną granicą w przypadku licznych wad w obrębie krawędzi ekranów. Znaczenie takich wad jest znane dobrze wytwórcom kondensatorów, w których dla uniknięcia przebiegów krawędziowych stosuje się takie zabiegi technologiczne, jak np. kalandrowanie i laserowe cięcie folii Al.

##### 5. Znaczenie pomiarów wnz w przepustach

Zagadnienia związane z występowaniem i pomiarem wnz w przepustach kondensatorowych dotyczą dwóch różnych spraw, a mianowicie: zagrożenia izolacji przepustów oraz wpływu intensywności wnz w przepustach na możliwość pomiarów wnz w transformatorze, w którym przepusty są zainstalowane.

Oceniając szkodliwość wnz w przepustach należałoby rozważyć różne hipotezy ich oddziaływania. Rozpatrując działanie wnz krawędziowych można spodziewać się, że destrukcja izolacji mogłaby nastąpić w wyniku przypadkowych dużych lokalnych gęstości tych wnz, które, powodując duże gradienty temperatur, spowodować mogą miejscowe zwęglenie izolacji lub ciepłe przebicie warstwy izolacyjnej. Przypuszczenia tego nie potwierdzają jednak wyniki długotrwałych prób stabilizacji cieplnej przepustów. Przypadki nie stabilizujących się cieplnie przepustów należy raczej wiązać z podwyższonymi stratami dielektrycznymi niż ze stratą mocy w wyniku wystąpienia wnz.

W przypadku wnz w większych pojedynczych defektach układu izolacyjnego, niosących znacznie większy ładunek  $q$ , można oczekiwać szybszej i głębszej erozji dielektryku i jego przebicia w wyniku wzrostu natężenia pola na czole kanaliku i przekroczenia wytrzymałości istotnej lub dojścia postępującej erozji do aktywnego punktu izolacji i przebicia

izolacji wg mechanizmu zaproponowanego przez J.Golińskiego [4]. Jednakże w szeregu badaniach przepustów z defektami izolacji, powodującymi wnz o średniej intensywności, nie stwierdzono powiększania się tych defektów i wzrostu  $q$  w czasie trwania prób.

W czasie około 20-letnich doświadczeń z eksploatacją krajowych przepustów transformatorowych nie stwierdzono ani jednego przypadku przebicia przepustu. Dowodzi to, iż intensywność wnz jest zbyt małą do wywołania znaczniejszej degradacji izolacji, prowadzącej do przebicia. Wynika to prawdopodobnie z dość niskich - rzędu 1,7 kV/mm, naprężeń promieniowych w przepustach. Wydaje się więc w świetle zgromadzonych doświadczeń, iż w przypadku izolacji twardej i przy stosowanych obecnie naprężeniach dominujące jest zakłócanie pomiarów wnz w transformatorach, a nie zagrożenie od wnz izolacji przepustów, które przeszły w laboratorium próby wyrobu. Jest jednak sprawą otwartą, czy w przepustach dla wyższych napięć znamionowych, w których wystąpią większe naprężenia, intensywność wnz nie będzie stwarzać poważniejszego zagrożenia izolacji.

Obniżenie intensywności wnz i podwyższenie  $U_0$  w przepustach możliwe jest przez stosowanie odpowiednich materiałów i starannej technologii. Istnieje jednak granica, przy której defekty stają się właściwością stosowanych materiałów i technologii, a dalsze obniżenie wnz zarówno krawędziowych, jak i we wtrącinach, możliwe jest już tylko przez zastosowanie nowych metod i surowców. Przykładem takich rozwiązań jest izolacja papier-olej /choć stosowanie jej w przepustach pociąga za sobą nowe niedogodności, tak że korzyści wynikające z niskiego poziomu wnz zwłaszcza w zakresie niższych i średnich napięć - do 300 kV są dość problematyczne/ oraz izolacje twarde z zastosowaniem nowych żywic i technik nasycania jak Drysonic /Micafil/ i Pertinax /Dielektra/.

Zastosowanie ekranów półprzewodzących może być dość skutecznym sposobem zmniejszenia intensywności wnz, głównie krawędziowych. Jest to przydatne szczególnie dla napięć znamionowych 123 kV i wyższych, gdzie



ze względu na dążenie do zmniejszenia gabarytów przepustu, naprężenia robocze osiągają wyższe wartości. Celowe może być również jednoczesne zastosowanie ekranów półprzewodzących w miejscach o najwyższych naprężeniach i przewodzących w pozostałej części rdzenia izolacyjnego.

#### LITERATURA

1. IEC - Projekt nowelizacji Publ.137 /1973/: Bushings for Alternating Voltages Above 1000 V. 36 A, Sec.15, Now.1977.
2. Gzylewski J., Łaś T., Wiśniewski A.: Dokumentacja Nr 2/74 NWN-IEI-Publ. wewnętrzna.
3. Łokazin M.W., Świ P.M.: Izmerenije dielektricheskikh potier vysokovoltnoj izolacji. Izd.Energija, Moskwa-Leningrad 1966.
4. Goliński J.: Wieloetapowy mechanizm przebiecia jonizacyjnego polimerów stałych. Przegląd Elektrotechniczny nr 7, 1968.

#### Summary

#### PARTIAL DISCHARGE TEST AS CRITERION OF ASSESSMENT OF CONDENSER BUSCHINGS

The authors present their many years experiences with partial discharge testing of condenser bushings of Polish make. Results obtained from different test methods are compared. The sources of partial discharges as well as the hazard due to the latter are discussed. The importance of partial discharge tests on bushings is taken under consideration.