

## DIAGNOSTYKA NISKONAPIĘCIOWYCH WARYSTOROWYCH OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ

Marek OLESZ<sup>1</sup>

1. Politechnika Gdańska

tel: 583471820

fax: 583472136

e-mail: m.olesz@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono stosowane w praktyce metody oceny stanu ograniczników przepięć niskiego napięcia (nn). Zestawiono wyniki pomiarów, które umożliwiły określenie stanu technicznego nowych i eksploatowanych ograniczników niskiego napięcia w zakresie charakterystyki przedprzebiecowej.

**Słowa kluczowe:** ograniczniki przepięć niskiego napięcia, warystory ZnO, diagnostyka.

### 1. WSTĘP

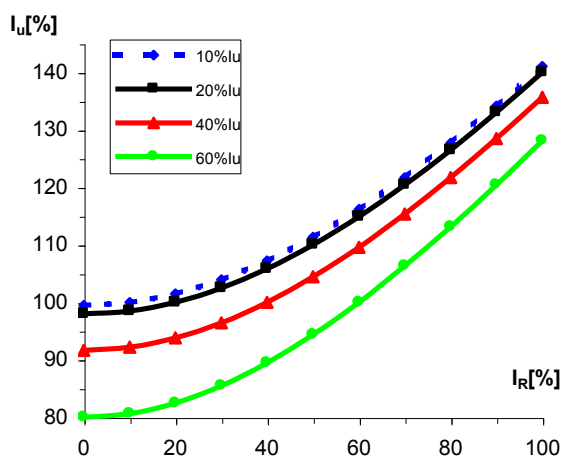
Ograniczniki niskiego napięcia oparte na warystorach ZnO są powszechnie stosowane w instalacjach elektroenergetycznych do zmniejszenia narażeń napięciowych w przypadku oddziaływania przepięć atmosferycznych i łączeniowych. Elementy te na skutek oddziaływania napięcia zasilającego, a szczególnie przepływu prądów wyładowczych ulegają starzeniu, którego jednym z symptomów jest zmiana charakterystyki prądowo – napięciowej w obszarze przedprzebiecowym.

Diagnostyka ograniczników przepięć niskiego napięcia zazwyczaj odbywa się poprzez stosowanie specjalnych przyrządów działających na zasadzie sprawdzenia jednego lub kilku punktów charakterystyki napięciowo – prądowej warystora, które nie powinny przekroczyć wartości granicznych podanych przez producenta. W urządzeniach tych zazwyczaj spotyka się generator napięcia stopniowanego o szybkości narastania rzędu 1000 V/s. Napięcie to jest przykładane do warystora, mierzone w czasie testu i wyłączane przy przekroczeniu prądu upływowego o wartości 1 mA - np. przyrząd Instaltest firmy Metrel, tester ograniczników PM20 firmy DEHN mający również zastosowanie do iskierników [1]. Podane urządzenia wymagają wyłączenia ogranicznika z sieci w celu przeprowadzenia oceny jego jakości. Producenci dla wytworzonych ograniczników przepięć podają wartości krytyczne napięcia zazwyczaj dla prądu upływowego 1 mA, co pozwala łatwo ocenić stan ogranicznika.

Inne sposoby diagnostyczne, które nie wymagają wyłączenia ogranicznika z sieci mogą być oparte na pomiarach prądu upływowego. W handlu dostępne są wysokoczułe cęgi prądowe umożliwiające bezpośredni odczyt prądu upływu już od 1  $\mu$ A (np. cęgi Kyoritsu KEW 2432) oraz układy monitorujące prądy upływowe od wartości granicznej 100  $\mu$ A (np. system KEW 5000-1).

Niektóre z cęgów prądowych jak KEW 2432 przy dużej czułości dodatkowo posiadają funkcję wyboru zakresu analizowanych częstotliwości prądu – selektywnie 50/60 Hz lub z filtrem dolnoprzepustowym do 1 kHz, co umożliwia określenie źródła pochodzenia prądu – składowej podstawowej częstotliwości sieci lub wyższych harmonicznych połączonych z zakłóceniami o charakterze wysokoczęstotliwościowym. Urządzenia te w połączeniu z rejestracją poziomu napięcia zasilającego pozwalają na bieżąco monitorować stan szczególnie ważnych dla użytkownika ograniczników przepięć w instalacji zasilającej.

Z praktyki eksploatacyjnej wiadomo, że w prądzie upływowym mierzonym przy napięciu przemiennym poniżej napięcia trwałej pracy  $U_c$  dominuje składowa pojemnościowa. Jeśli przy napięciu sieci  $U > U_c$  wystąpi nawet i kilkukrotny wzrost składowej rezystancyjnej  $I_R$  monitorującej zmiany starzeniowe w ograniczniku (np. z 10% do 40% prądu upływowego  $I_u$ ) to wypadkowa wartość  $I_u$  zwiększy się nieznacznie o około 10% (rys. 1).



Rys. 1. Zależność wpływu zawartości składowej czynnej na wypadkowy prąd upływowy

Wykres pokazany na rysunku 1 zakłada określony stały poziom składowej pojemnościowej wynikający z założonego początkowego prądu upływowego. Wzrost składowej rezystancyjnej w stosunku do przyjętej wartości początkowej określonej jako 10%, 20%, 40% i 60% prądu upływowego powoduje tym większą zmianę prądu wypadkowego im wyższy założony początkowy prąd rezystancyjny.

W instalacjach nn podczas pomiaru składowej rezystancyjnej można bezpiecznie oscylografować przebieg napięcia i prądu co pozwala na dokładne obliczenie składowej czynnej prądu upływowego [2]. W analizie składowej rezystancyjnej dodatkowo należy znać trzy współczynniki poprawkowe – temperaturowy, napięciowy i harmoniczny w celu przeliczenia na poziom odniesienia określony np. temperaturą 20°C, napięciem w sieci 230 V i brakiem wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym.

Innym rozwiązaniem komercyjnym mającym zastosowanie w diagnostyce ograniczników niskiego napięcia jest system Life Check firmy Dehn umożliwiający szybkie i bezprzewodowe testowanie ograniczników przepięć mających zastosowanie między innymi w obwodach automatyki oraz w obszarach zagrożonych wybuchem. System składa się z czytnika zawierającego nadajnik i odbiornik sygnałów odbieranych z badanego ogranicznika w którym zamontowano elementy aktywne (zawierające własne źródło zasilania) lub pasywne (aktywowane energią pola elektromagnetycznego nadajnika). Poprawne nawiązanie łączności przez element pasywny lub aktywny świadczy o braku przeciążenia termicznego lub elektrycznego ogranicznika i wystarcza do zdiagnozowania jego prawidłowego stanu.

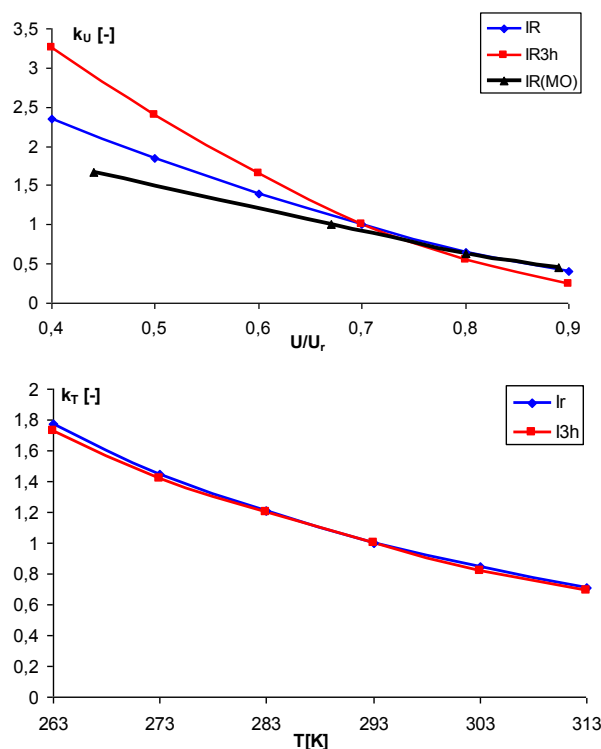
## 2. WSPÓŁCZYNNIKI POPRAWKOWE W POMIARACH PRĄDU UPŁYWOWEGO

Praca [3] podaje zależność strat ciepłych ogranicznika warystorowego ZnO przypadających na jednostkę objętości, które zostały zmierzone eksperymentalnie i zamodelowane zależnością wynikającą z zastosowania sieci neuronowych w modelu ANN. Funkcja aproksymująca, której 21 współczynników zostało wyznaczonych dla modelu sieci neuronowej z trzema warstwami pozwala obliczyć z dużą dokładnością straty mocy dla dowolnej temperatury  $T$  i stosunku  $q$  - napięcia odniesionego do tzw. napięcia referencyjnego  $U_r$  wymuszającego prąd 1 mA. Poziomy odniesienia określono dla stosunku  $q=U_c/U_r=0,7$  co jest typową wartością dla ograniczników SN. Zakładając w przypadku badanych ograniczników nn dane producenta dla dozwolonych wartości  $U_r=368\div 474$  V otrzymujemy dla  $U_c=275$  V zakres  $q=0,58\div 0,75$ .

Wpływ temperatury i napięcia na poziom prądu rezystancyjnego upływu omawia też Heinrich [4] wskazując na istotny wpływ stanu ogranicznika. Występowanie starzenia warystorów udarami prądowymi oraz oddziaływanie tlenu atomowego na strukturę ZnO powoduje występowanie znacznie większych prądów upływowych w porównaniu do niestarszonej ceramiki. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku analizy wpływu temperatury na prąd upływowy w nowych, starzonych elektrycznie i chemicznie strukturach ZnO. W związku z tym należy wyznaczyć powyższe współczynniki wpływu napięcia i temperatury na poziom składowej czynnej ogranicznika dla nowych niestarszonych elementów i stosować je jak dla elementów starzonych, które podczas degradacji udarami prądowymi ulegają zmianie szybciej niż elementy nowe.

Stabelaryzowane wskazówki dotyczące obliczenia wpływu temperatury i napięcia podaje dokumentacja przyrządu LCM500 wykorzystywanego w diagnostyce ograniczników średniego i wysokiego napięcia [5]. Zaproponowano tu poziomy odniesienia  $U/U_r=0,7$  i  $T=293$ K, które pokazano na rysunku 2 odpowiednio dla

składowej czynnej  $I_R$  oraz harmonicznej prądu upływu trzeciego rzędu  $I_{R3h}$ .



Rys. 2. Współczynniki poprawkowe – wpływu napięcia i temperatury do przeliczenia pomiarów prądu upływowych na warunki odniesienia – 293K i  $U/U_r=0,7$

W celu zastosowania przyrządu wytwórca powinien podać maksymalne dopuszczalne poziomy  $I_R$  i  $I_{R3h}$  przy napięciu  $U/U_r=0,7$  i dla  $T=293$ K – parametry te są traktowane jako parametry odniesienia.

Własne wyniki autora wskazują, że w przypadku ograniczników przepięć SN uzyskano podobne współczynniki dla  $U/U_r > 0,7$  natomiast wyraźnie mniejsze przy niewielkich napięciach zasilających co może mieć związek z bardzo małymi wartościami prądów upływowych i dodatkowymi błędami ich pomiaru.

## 3. SKUTECZNOŚĆ ZASTOSOWANYCH METOD DIAGNOSTYCZNYCH

W celu określenia skuteczności dostępnych powszechnie na rynku metod diagnostycznych wykonano serię pomiarów na 10 ogranicznikach nn tego samego producenta o następujących parametrach:

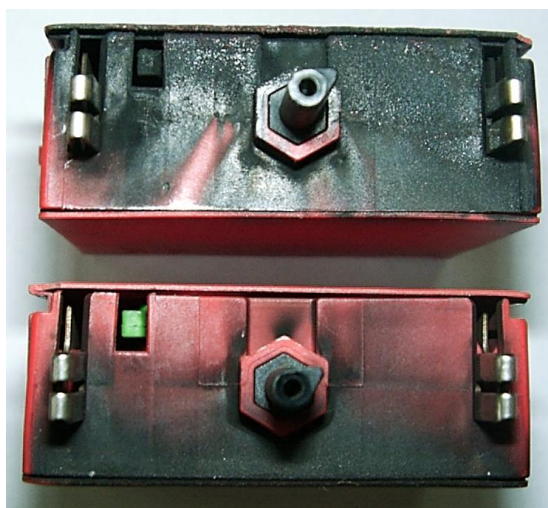
- napięcie trwałej pracy  $U_c=275$  V,
- znamionowy prąd wyładowczy 8/20  $\mu$ s – 20 kA.

Ograniczniki pochodziły z 2 różnych okresów produkcji (typ I i typ II), co można łatwo zidentyfikować za pomocą numerów katalogowych produktu. Wszystkie ograniczniki typu I nie miały widocznych uszkodzeń zewnętrznych, natomiast cztery obudowy warystorów typu II posiadały na powierzchni nalot węgla związany z wyładowaniami powierzchniowymi (rys. 3).

Każdy z ograniczników został poddany następującej procedurze diagnostycznej:

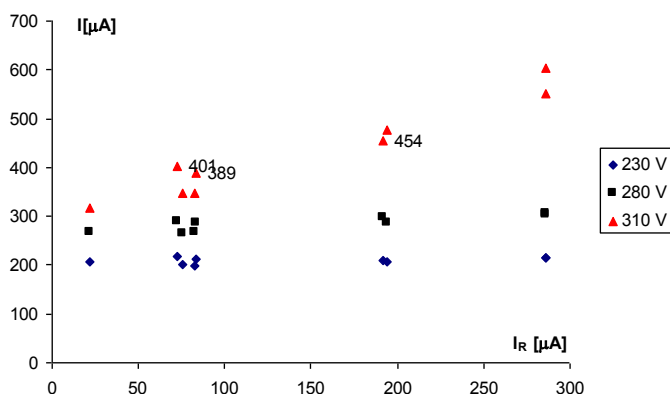
- pomiar rezystancji izolacji przez 1 minutę przy napięciu 200 V, 300 V i 400 V,
- pomiar spadku napięcia na warystorze przy wymuszeniu prądu stałego o wartości 1 mA,

- pomiar prądu upływowego przy napięciu przemiennym o wartości 230 V, 280 V i 310 V wraz z analizą składowych harmonicznyc.



Rys. 3. Powierzchniowe ścieżki węglowe od strony wyprowadzeń badanych ograniczników

Na rys. 4 pokazano zależność prądu upływowego mierzonego przy napięciu przemiennym od rezystancyjnego prądu upływowego ogranicznika z którego wzrostem pojawia się proporcjonalnie wyższy prąd wypadkowy.

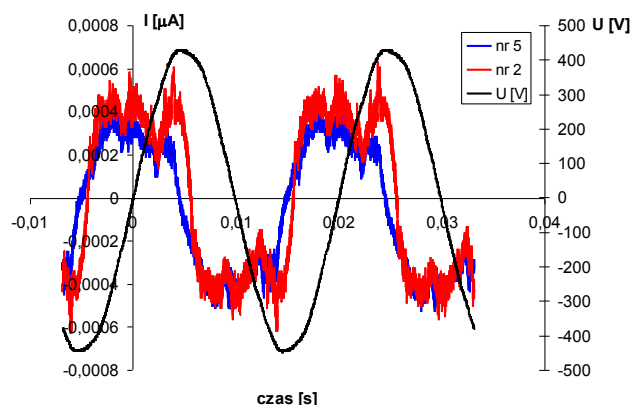


Rys. 4. Prąd upływowo dla 3 różnych wartości napięcia przemiennego w funkcji prądu upływowego  $I_R$  mierzonego przy napięciu stałym 400 V

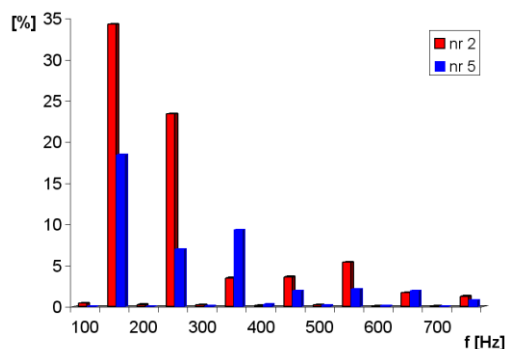
Wzrost prądu upływowego przy napięciu stałym 400 V jest wyraźnie proporcjonalny do wypadkowego prądu mierzonego przy napięciu przemiennym tylko przy napięciach przekraczających poziom napięcia trwałej pracy – czyli w analizowanym przypadku dla napięcia 310 V (rys. 4). Niektóre z badanych ograniczników z prawidłową charakterystyką w zakresie przedprzebieciowym charakteryzowały się nieprawidłowym stanem technicznym wynikającym z ogłędzin. Przykładowo ogranicznik o najmniejszej wartości prądu upływowego jest jedynym bez węglowych nalotów w grupie pięciu ograniczników typu II. Inne trzy ograniczniki z tej grupy z zewnętrznymi nadpaleniami (rys. 3), które wystąpiły po wylądowaniach burzowych i po skutecznym działaniu wymiennionych warystorów, zaznaczono etykietami (tylko pomiar prądu upływowego dla napięcia 310 V). Należy nadmienić, że na

rysunku 4 nie ma danych pomiarowych jednego uszkodzonego ogranicznika typu II dla którego zmierzono napięcie przebiecia o wartości 5 V, a w trakcie pomiaru rezystancji izolacji występowało zwarcie na zaciskach przyrządu. Z przedstawionych na rysunku 4 danych wynika, że pomiar napięcia przebiecia warystora lub jego prądu upływowego przy napięciu przemiennym nie pozwala jednoznacznie określić warunków eksploatacji i wynikającego z nich stanu ogranicznika, kiedy np. dla węglowych nalotów na powierzchni obudowy obserwuje się prawidłowe wyniki pomiarów.

W badanych ogranicznikach typu II symptomem gorszego stanu są wyniki analizy kształtu krzywej prądu w postaci składowych harmonicznyc. Na rysunku 5 zestawiono prąd upływowo ogranicznika bez (nr 5) i z zewnętrznymi ścieżkami węglowymi (nr 2), a na rysunku 6 jego składowe harmoniczne, z których 3, 5, 9 i 11 osiągają wyraźnie większe wartości.

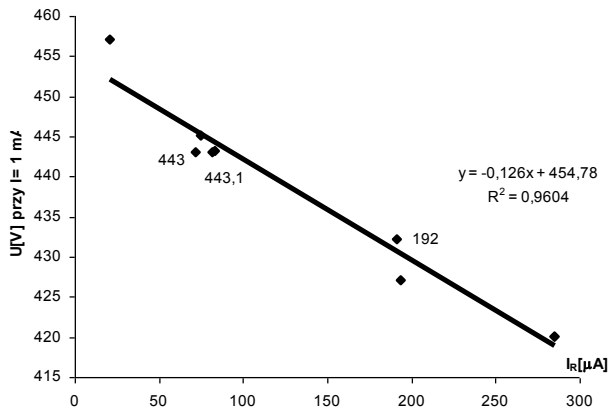


Rys. 5. Prąd upływowo ograniczników nr 2 (wypalenia) i 5 (bez wypaleń) zarejestrowany przy napięciu 310 V



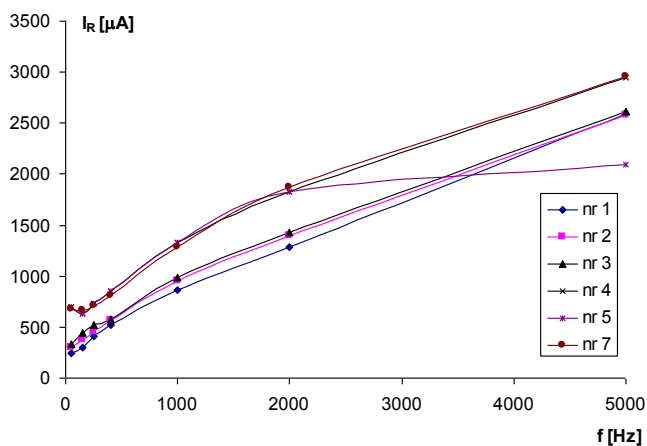
Rys. 6. Składowe harmoniczne prądu upływowego w warystorach nr 2 i 5

Pokazana na rysunku 7 charakterystyka napięcia przebiecia przy wymuszeniu prądu stałego o wartości 1 mA w funkcji prądu upływowego zmierzonego przy napięciu stałym w czasie pomiarów rezystancji izolacji wskazuje na wysoki współczynnik korelacji liniowej  $R^2=0,96$ . Pomimo obserwowanych składowych prądu upływowego – pojemnościowej, absorpcyjnej i rezystancyjnej w czasie analizy odpowiedzi na skok jednostkowy napięcia otrzymuje się podobne wyniki, jak przy wymuszeniu liniowym napięcia stałego. Świadczy to o komplementarności obu metod badawczych, które z powodzeniem są stosowane w ocenie ograniczników niskiego napięcia. Otrzymane wartości napięcia przebiecia zawierają się w zakresie 386 – 474 V, co według producenta świadczy o prawidłowym stanie warystora [1].



Rys. 7. Napięcie przebicia w funkcji prądu upływowego mierzonego przy napięciu stałym 400 V

W celu określenia ewentualnych możliwości detekcji powierzchniowych zmian rezystancji izolacji wykonano badania charakterystyk częstotliwościowych w zakresie 25 Hz – 5 kHz przy napięciach 230 V, 275 V i 325 V. Napięcie sinusoidalne wymuszano z generatora mocy umożliwiającego wytwarzanie napięcia o częstotliwości do 20 kHz i obciążeniu do 320 mA. Zestawione na rysunku 8 zbiorcze wyniki składowej rezystancyjnej prądu upływowego przy napięciu 325 V przekraczającym napięcie trwałej pracy nie wykrywają jednoznacznie ograniczników z nadpaleniami powierzchniowymi (nr 2 i 3).



Rys. 8. Wpływ częstotliwości napięcia przemiennego o wartości 325 V na poziom składowej czynnej prądu upływowego

Ograniczniki o numerach 2 i 3 posiadają podobne charakterystyki, ale w stosunku do nich inne warystory posiadają zarówno mniejszy jak i większy prąd upływowy. Wynik ten jest zgodny z wynikami badań starzeniowych ograniczników niskiego napięcia innego producenta [6, 7] w których stwierdzono wyraźny wzrost prądu upływowego dopiero po przyłożeniu krytycznej liczby udarów

charakterystycznej dla konkretnego egzemplarza ogranicznika (kilkanaście do kilkudziesięciu udarów). Ze wzrostem liczby przykładanych udarów obserwowano nieznaczną zmianę prądu upływowego, a dopiero po udarze krytycznym nagle pogorszenie stanu warystora.

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

W przypadku przepływu nadmiernego prądu wyładowczego, kiedy ma miejsce uszkodzenie warystora jest ono łatwo wykrywane zarówno metodą rezystancji izolacji jak i spadku napięcia przy wymuszeniu prądu upływowego o wartości 1 mA.

W pewnych sytuacjach przepływ prądu wyładowczego może nie uszkodzić struktury ogranicznika, a dodatkowe nadpalenia występujące na jego powierzchni nie są wykrywalne za pomocą znanych technik pomiarowych (prądu upływowego, składowej rezystancyjnej prądu upływowego).

Wydaje się, że skuteczniejszą ocenę stanu ogranicznika mogą zapewnić mikroprocesorowe rejestratory temperatury warystora zapewniające odczyt danych w warunkach eksploatacyjnych bez wyłączenia z sieci.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Instrukcja użytkownika testera ograniczników przepięć PM 20, DEHN, Publikacja nr 1608/ PL/ UPDATE 02.08 Id-No. 051432.
2. Olesz M., Algorytmy obliczania składowej czynnej prądu upływu ograniczników przepięć, Przegląd Elektrotechniczny nr 11a, 2012.
3. Jinliang He i inni, Thermal Characteristics of High Voltage Whole-Solid-Insulated Polymeric ZnO Surge Arresters, IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 18, no. 4, 2003, pp. 1221-1227.
4. Heinrich Ch. i Hinrichsen V., Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Networks-Comparison of Existing and Newly Developed Procedures, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 16, No. 1, 2001, pp 138 – 143.
5. Larsen V., Lien K., In-Service Testing and Diagnosis of Gapless Metal Oxide Surge Arresters, Materiały IX International Symposium on Lightning Protection, 26th-30th November 2007 – Foz do Iguaçu, Brazil.
6. Olesz M., Kontrola jakości ograniczników przepięć w zakładach Apator S.A., Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki nr 31, 2012.
7. PN – EN 61643-11: 2006, Niskonapięciowe urządzenia do ograniczania przepięć. Część 11: Urządzenia do ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia. Wymagania i próby.

## DIAGNOSTICS OF LOW VOLTAGE SURGE ARRESTERS

**Key-words:** low voltage ZnO arresters, diagnostics

The paper presents some practical methods of technical state of low voltage ZnO surge arresters evaluation. Several methods of laboratory diagnostics and on – site checks were described. The analysis of commonly applied diagnostic methods was supplied by the results of leakage current measurements for new and degraded in exploitation low voltage arresters.