

## DIAGNOSTYKA ŚREDNIONAPIĘCIOWYCH WARYSTOROWYCH OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ

Marek OLESZ<sup>1</sup>, LECH HASSE<sup>2</sup>

1. Politechnika Gdańska

tel: 583471820

fax: 583472136

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

2. Politechnika Gdańska

tel: 583471884

fax: 583416132

e-mail: lhasse@eti.pg.gda.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono metody oceny stanu technicznego warystorowych ograniczników przepięć średniego napięcia stosowane w badaniach laboratoryjnych oraz w eksploatacji - wykonywane bez wyłączania ograniczników z sieci. Analiza metod diagnostycznych została uzupełniona wynikami pomiarów prądu upływu ograniczników średniego napięcia (SN) bezpośrednio z produkcji oraz eksploatowanych w energetyce zawodowej.

**Słowa kluczowe:** ograniczniki przepięć średniego napięcia, warystori, diagnostyka.

### 1. WSTĘP

Ograniczniki przepięć średniego napięcia spełniają istotną rolę w systemie elektroenergetycznym. Przede wszystkim, pod warunkiem prawidłowego doboru, zapewniają skuteczną ochronę elementów systemu – głównie transformatorów energetycznych, przed przepięciami pochodzenia piorunowego i łączeniowego. Ten ostatni rodzaj ochrony jest szczególnie ważny w związku z upowszechnianiem się łączników próżniowych w sieciach SN, które szczególnie w starszych rozwiązaniach mają właściwości „zrywania” prądu przed jego przejściem przez zero, co powoduje generowanie przepięć o znacznej wartości i długim czasie trwania w porównaniu do przepięć atmosferycznych.

Analiza rozkładów przepięć w sieci SN rejestrowanych w okresie 320 dni analizatorami jakości energii elektrycznej [6] wskazuje, że przepięcia łączeniowe osiągają sporadycznie poziom dwukrotnej wartości napięcia znamionowego sieci (około 10 przepięć na 823 zarejestrowanych) przy czasie trwania do 20 ms. Inaczej wygląda statystyka przepięć impulsowych o częstotliwości powyżej 5 MHz, których stromości osiągają nawet 4 kV/s. W tym przypadku mamy do czynienia z amplitudami nawet do 8 - krotnego poziomu napięcia znamionowego.

Podstawowym elementem ogranicznika są warystori wykonane na bazie tlenku cynku ZnO (półprzewodnik) z wieloma odpowiednimi domieszkami (głównie bizmutu - (przewodnika o charakterze jonowym), które dzięki wielofazowej strukturze charakteryzują się nieliniową charakterystyką napięciowo-prądową.

Charakterystyka napięciowo – prądowa warystora ma charakter w przybliżeniu odcinkowo liniowy. W początkowym

zakresie przy napięciach wymuszających przepływ niewielkich prądów (do 1 mA) obserwuje się stałą wartość rezystancji warystora rzędu gigaomów. Natomiast dla niewielkiej zmiany napięcia  $U$  w obszarze tzw. przebicia, prąd  $I$  osiąga wartości rzędu kiloamperów, co opisuje się zazwyczaj zależnością potęgową (1):

$$U = kI^\alpha \quad (1)$$

gdzie:  $k$  – stała zależna od rodzaju materiału,  
 $\alpha$  – współczynnik nieliniowości charakterystyki.

Przy wyższych napięciach, wskutek redukcji barier między ziarnami, charakter przewodzenia prądu w warystorze jest typowo rezystancyjny przy rezystancji rzędu pojedynczych omów [3].

Z badań laboratoryjnych wynika, że w ceramice ZnO, w przypadku przebiegów o dużych częstotliwościach, rzędu 1 MHz, typowych dla przepięć piorunowych, występuje maksimum współczynnika stratności dielektrycznej. Wzrost temperatury ogranicznika silnie sprzyja wzrostowi właściwości przewodzących. Obserwuje się wówczas zwiększenie prądów upływu i polaryzacyjnych. Dodatkowo starzenie udarami prądowymi powoduje przesunięcie w prawo charakterystyki napięciowo – prądowej, co fizycznie wiąże się ze zmianą rozkładu wielkości ziaren w objętości warystora – szczególnie w następstwie działania udarów o biegunowości ujemnej. Zjawisko to ma związek z wpływem temperatury na mechanizmy przewodzenia, szczególnie w warystorach mniejszych gabarytowo (np. niskiego napięcia), gdzie stosunkowo małe narażenia mogą wskutek słabszej absorpcji udarów prądowych powodować silne nagrzanie warystora i zmianę jego charakterystyki  $U(I)$ , która przesunęta jest w prawo w kierunku większych prądów.

Na poziomie sieci SN energetyka zawodowa eksploatuje zazwyczaj ograniczniki aż do stanu uszkodzenia. Z punktu widzenia ochrony odgromowej i przeciwprzepięciowej sprawdza się okresowo (według wewnętrznej instrukcji eksploatacji [7]) ciągłość połączeń oraz rezystancje uziemień stacji transformatorowo-rozdzielczych

i słupów, na których montuje się ograniczniki. Natomiast praktycznie nie wykonuje się badań stanu ograniczników przepięć, które jak wiadomo [3, 4] ulegają degradacji pod wpływem czasu, temperatury i uderów prądowych. Zmienia się wówczas ich charakterystyka, która może nie zapewniać prawidłowej ochrony w stanach krytycznej pracy systemu elektroenergetycznego.

Niektóre z ograniczników SN wyposaża się dodatkowo w proste urządzenia, które w przypadku nadmiernego nagrzania warystora i prawdopodobnej utraty właściwości ograniczających, odłączają warystor od uziemienia zapobiegając przepływowi nadmiernych prądów upływu i tym samym eksplozji ogranicznika [3].

Na podstawie statystyki za lata 1999 – 2004 z obszaru dystrybucji Energa S.A. Gdańsk stwierdza się niestety, że dość dużą niedokładnością ze względu na brak weryfikacji wniosków osób orzekających, występowanie w roku około 30 uszkodzeń w następstwie wyładowań burzowych i 2 uszkodzeń w następstwie przepięć łączeniowych [8]. Statystyka ta dotyczy głównie grupy ograniczników dawnego typu – wydmuchowych, gdzie występuje  $60 \div 70$  wszystkich uszkodzeń w roku. Stąd powszechnie wymienia się dawne ograniczniki wydmuchowe na tlenkowe, których średnia roczna awaryjność wynosi już tylko 9 uszkodzeń. Porównując powyższe obserwacje z zarejestrowanymi parametrami przepięć łączeniowych i piorunowych [6] można zaryzykować twierdzenie, że przyczyną niszczenia ograniczników są zazwyczaj duże poziomy przepięć o znacznych stromościach działające krócej niż przepięcia łączeniowe.

## 2. DIAGNOSTYKA OGRANICZNIKÓW TLENKOWYCH

Zalecenia dotyczące diagnostyki ograniczników przepięć SN podała zmiana [2] do normy [1] zawierającej wytyczne ich stosowania i wyboru. Dokument [2] zasadniczo zmienia treść działu 6 normy [1] dotyczącego monitoringu ograniczników przepięć z tlenków metali, gdzie skupiono się na wykorzystaniu liczników zadziałań, iskierników wskaźnikowych oraz urządzeń do odczytu prądu ciągłego najlepiej z wydzieleniem składowej czynnej. Zmiana –[2] rozszerza te możliwości o zastosowanie prostych urządzeń sygnalizujących stan częściowego lub całkowitego zniszczenia elementu warystorowego (np. odłączniki) lub specjalnych przyrządów analizujących temperaturę, harmoniczne prądu upływu czy też straty mocy czynnej. Opisano w niej szczegółowo sposoby techniczne pomiaru składowej czynnej prądu upływu (metodę wykorzystania sygnału napięcia jako odniesienia, metodę kompensacji składowej pojemnościowej przy wykorzystaniu sygnału napięcia, metodę kompensacji bez wykorzystania sygnału napięcia, metodę kompensacji za pomocą analizy prądów w trzech fazach oraz analizy harmonicznymi metodami: trzeciej harmonicznnej, trzeciej harmonicznnej z kompensacją harmonicznnych w napięciu sieci, analizy harmonicznnej pierwszego rzędu). Tabela 5 w [2] wskazuje, że w praktyce zawodowej zasadniczo stosuje się metody analizy harmonicznnych prądu upływu, których początki sięgają lat 80. ubiegłego wieku.

Niewątpliwą zaletą metody analizy harmonicznnych jest możliwość pomiaru stanu ogranicznika bez odłączania go z sieci. Ze względu na znaczny błąd wynikający z zawartości trzeciej harmonicznnej w napięciu zasilającym, nawet w granicach  $100\% \div 350\%$ , w praktyce najbardziej upowszechniła się metoda analizy trzeciej harmonicznnej z kompensacją sygnałem związanym z trzecią harmoniczną prądu pojemnościowego ogranicznika.

Urządzenia wskaźnikowe stanowią część składową kompletnego ogranicznika lub jego dodatkowy element włączony szeregowo i dzielą się na wskaźniki uszkodzeń, odłączniki oraz liczniki zadziałań. Wskaźnik uszkodzenia, w przypadku przekroczenia amplitudy prądu lub czasu trwania określonej krytycznej wartości prądu, wskazuje tylko ten fakt ale bez automatycznego odłączenia warystora od sieci. Odłącznik z kolei ma za zadanie izolowanie ogranicznika od układu sieci w chwili jego uszkodzenia. Zazwyczaj stosuje się do tego celu element wybuchowy wyzwalany przepływem prądu zwarciovego o określonej amplitudzie i czasie trwania. Odłącznik z zasady nie jest przeznaczony do gaszenia prądu zwarciovego. Wadą zastosowanego rozwiązania jest fakt, że po odłączeniu ogranicznika do chwili jego wymiany nie ma ochrony przeciwprzepięciowej w odcinku sieci elektroenergetycznej.

Innym sposobem określenia stopnia degradacji ogranicznika jest wykorzystanie licznika zadziałań wyzwalanego prądem wyładowczym przekraczającym określoną amplitudę. W przypadku wielokrotnych wyładowań o czasach między wyładowaniami krótszych niż 50 ms, ze względu na konstrukcję układu zliczającego może nie nastąpić zliczenie wszystkich wyładowań. W niektórych konstrukcjach do zadziałania licznika potrzebny jest odpowiednio długi przepływ prądu następczego, co może powodować utrudnienia przy zliczaniu krótkich prądów wyładowczych.

Ciekawą metodą analizy stanu ogranicznika polega na wykorzystaniu kamery termowizyjnej. Intensywne nagrzewanie struktury warystora powoduje lokalne zwiększenie temperatury obudowy izolacyjnej wskazując na problemy z warystorem lub penetrację wody do wnętrza osłony i lokalny wzrost prądów powierzchniowych w stosie warystorowym.

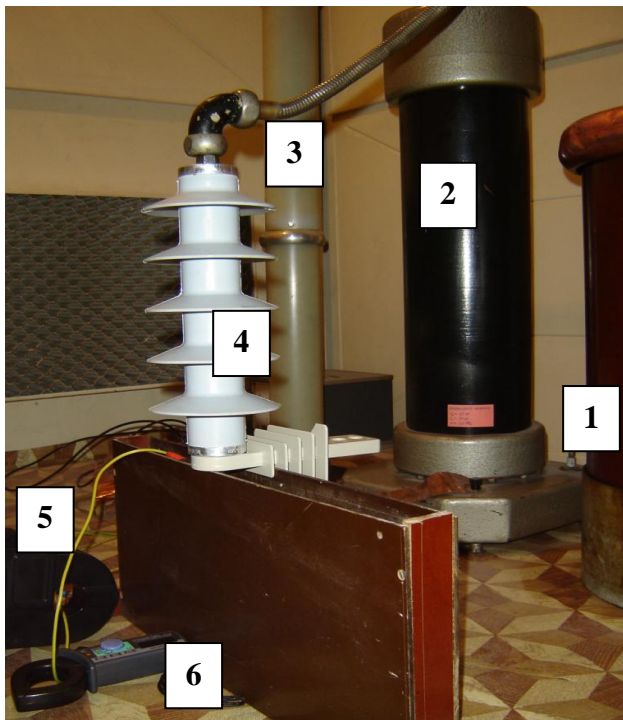
W praktyce najczęściej wykorzystuje się metodę pomiaru prądu upływu bazującą na określeniu składowej czynnej lub mocy strat wydzielonych na ograniczniku. Stosuje się zarówno pomiary na ograniczniku włączonym w sieci (eksploatacyjne) lub na odłączonym z sieci (laboratoryjne przy napięciu stałym lub przemiennym). W celu umożliwienia pomiaru prądu upływu montuje się specjalny izolowany zacisk uziemiający między ogranicznikiem a uziemieniem, do którego dołącza się okresowo (diagnostyka okresowa) lub na stałe przyrząd pomiarowy (monitoring z zapisem wartości prądu upływu na karcie pamięci lub w systemie nadzoru).

## 3. METODYKA BADAŃ

W pracy badano kompletny, nowy ogranicznik SN w wykonaniu napowietrznym o napięciu trwałej pracy  $U_c = 24$  kV i znamionowym prądzie wyładowczym 10 kA. W badaniu realizowano pomiary upływności ogranicznika przy zastosowaniu dwóch źródeł napięcia o różnej zawartości wyższych harmonicznnych (rys. 1). Do pomiaru prądu upływu zastosowano czułe cęgi prądowe typu ALCL-40D o czułości  $1 \mu A$  z dodatkowym wyjściem na oscyloskop cyfrowy TDS 5034B. Kanały wejściowe oscyloskopu przyłączone do dzielnika pojemnościowego oraz do sondy prądowej rejestrowały 10000 próbek w czasach 40 ms i 1 s, na podstawie których następnie obliczano wyższe harmoniczne prądu i napięcia. Dodatkowo stosowano czułe cęgi prądowe do pomiaru prądów upływu firmy Kyoritsu typu KEW SNAP 2432 z wyświetla-

czem tylko mierzonej wartości, ustawione na szerokopasmowy tryb pomiaru do 1 kHz.

W celu odniesienia uzyskanych wyników badań do starzenia eksploatacyjnego wykonano również pomiary na ogranicznikach eksploatowanych w energetyce zawodowej przez okres około 5 lat.



Rys. 1 Stanowisko pomiarowe z badanym ogranicznikiem: 1 – transformator wysokiego napięcia, 2 – kondensator dzielnika napięciowego, 3 – kondensator sprzęgający, 4 – ogranicznik przepięć, 5 – cęgi prądowe ALCL – 40 D, 6 – cęgi prądowe KEW SNAP 2432

Pomiary miały na celu sprawdzenie poprawności mierzenia prądu upływu przy różnej zawartości wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym oraz określenie wpływu wyższych harmonicznych napięcia na uzyskane wyniki badań. W praktyce eksploatacyjnej, w przypadku ewentualnej oceny ogranicznika na stacji SN mierzy się prąd upływu lub wykonuje analizę termowizyjną.

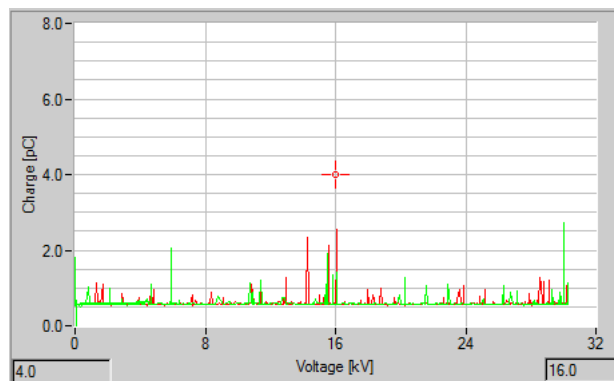
Analizę stanu ogranicznika rozszerzono o pomiar wyładowań niepełnych (wnz) za pomocą systemu LDS – 6 firmy Doble oraz pomiar rezystancji ogranicznika miernikiem Megger BM25 w celu określenia dla aparatu parametrów charakterystycznych:  $R_{15}$ ,  $R_{60}$  i współczynnika absorpcji  $R_{60}/R_{15}$  przy napięciu stałym w zakresie 1 – 5 kV i różnych temperaturach aparatu.

#### 4. OMÓWIENIE WYNIKÓW POMIARÓW

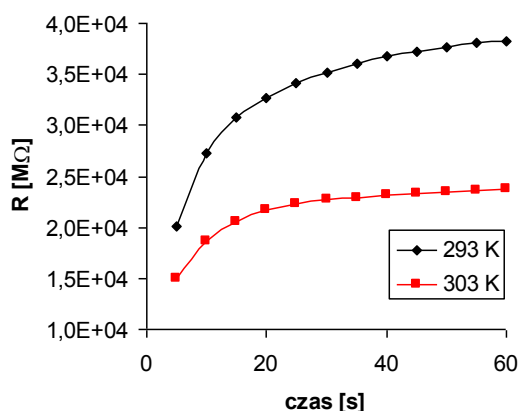
Pomiary wnz (rys. 2) wykazały, że poziom średniego i maksymalnego ładunku pozornego nie przekracza wartości 5 pC przy 1,05 napięcia trwałej pracy  $U_c$ , po krótkotrwałym ekspozowaniu ogranicznika napięciem znamionowym  $U_r$ . Wynik spełnia zalecenia normy [5], która dopuszcza dla nowych ograniczników poziom 10 pC. Inne, eksploatowane ograniczniki przepięć, po wieloletniej pracy w sieciach SN charakteryzowały się podobnym poziomem wnz.

Wykonane pomiary rezystancji izolacji i współczynnika absorpcji w obszarze przedprzebieciowym ogranicznika, przy napięciu 5 kV, wykazały typowe dla materiałów dielektrycznych zmiany w funkcji przyłożonego napięcia i temperatury

(rys. 3). Wzrost temperatury o 10 K daje zmianę wartości rezystancji  $R_{60}$  z około 40 G $\Omega$  do 23 G $\Omega$  oraz współczynnika absorpcji od wartości 1,25 do 1,15.



Rys. 2. Poziom wnz badanego ogranicznika w funkcji napięcia zasilającego



Rys. 3. Przebieg rezystancji izolacji ogranicznika w czasie przy napięciu 5 kV

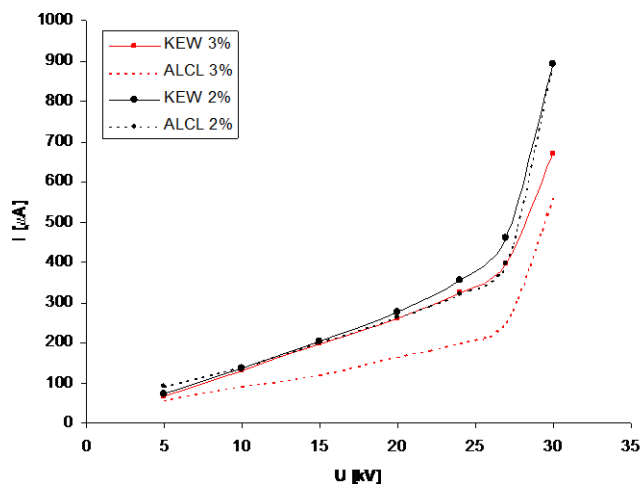
Testowane eksploatowane ograniczniki przepięć mają wartości rezystancji w szerokim zakresie 30 G $\Omega$  – 300 G $\Omega$ , co wynika ze stanu struktury warystora i sposobu jego eksploatacji. Jednoznaczne określenie wpływu warunków starzenia na zmiany wskaźników rezystancyjnych i pojemnościowych wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań statystycznych dla konkretnych rozwiązań technicznych ograniczników przepięć.

Ciekawe wyniki uzyskano przy pomiarach prądu upływu, możliwych do przeprowadzenia w warunkach eksploatacyjnych. Pewne wątpliwości powstają wskutek zastosowania dwóch różnych mierników cęgowych o podobnej dokładności i czułości. Szczególnie duże różnice pomiędzy wskazaniem przyrządów powstają przy analizie prądów znacznie odkształconych, mierzonych przy napięciu wymuszającym o THD rzędu 3% (rys. 4). Wzrost zawartości harmonicznych źródła napięcia powoduje wzrost harmonicznych prądowych i obniżenie mierzonego prądu upływu. Wynika stąd, że miarodajne porównanie wyników badań upływności jest zasadne przy zastosowaniu w pomiarach tego samego przyrządu lub różnych, ale stosowanych przy nieodkształconym nadmiernie napięciu pomiarowym.

Zmierzone prądy upływu innych ograniczników pochodzących z eksploatacji wykazują poziom upływu rzędu 300 – 440  $\mu$ A dla napięcia  $U_r$ . Zarówno dla nowych jak i eksploatowanych ograniczników obserwuje się zmianę charakterystyki  $I(U)$  po przekroczeniu napięcia

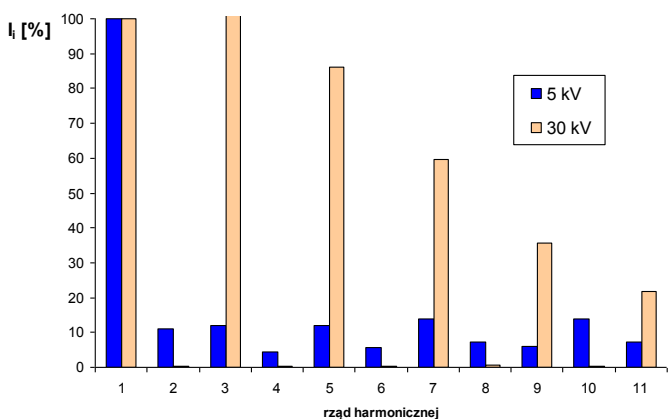


$U_c$ , co ma związek ze wzrostem składowej rezystancyjnej w prądzie upływu.



Rys. 4. Zależność prądów upływu od napięcia dla ogranicznika przepięć mierzonych cęgami KEW i ALCL przy 2% i 3% współczynnika zawartości harmonicznych

Z porównania wyników pomiarów ograniczników nowych i eksploatowanych wynika, że dla każdego ogranicznika poziom prądu upływu jest zróżnicowany i określenie stopnia starzenia wymaga systematycznych pomiarów najlepiej tym samym przyrządem, przy określonym poziomie THD w napięciu zasilającym.



Rys. 5. Składowe harmoniczne prądu upływu ogranicznika dla napięcia 5 kV i 30 kV o współczynniku THD rzędu 2%

Na rysunku 5 pokazano składowe harmoniczne prądu ogranicznika otrzymane przy napięciach probierczych 5 i 30 kV. O ile zmiana napięcia nieznacznie wpływa na poziom harmonicznych napięciowych, w którym dominuje 5., 7. i 11. składowa, to w przypadku harmonicznych prądu różnice są zasadnicze. Z analizy danych prądowych wynika, że 3. i 5. składowa harmoniczna są dobrym detektorem wzrostu prądu upływu przy napięciach przekraczających poziom  $U_c$ .

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Czułe cęgi prądowe pozwalają dostatecznie dokładnie zmierzyć poziom prądu upływu ograniczników przepięć średniego napięcia.

Obecność harmonicznych napięciowych wymusza konieczność wprowadzenia obliczeń harmonicznych prądowych dla napięcia nieodkształconego.

W warunkach eksploatacyjnych konieczne jest okresowe monitorowanie stanu ogranicznika kalibrowanym przyrządem.

## PODZIĘKOWANIE

Praca była częściowo finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (2010/2011), projekt nr N N511 304338

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 60099-5:1999. Ograniczniki przepięć - Zalecenia wyboru i stosowania
2. PN-EN 60099-5:1999/A1:2004, Ograniczniki przepięć - Zalecenia wyboru i stosowania
3. Chrzan K., Wysokonapięciowe ograniczniki przepięć, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2003, ISBN: 83-7125-108-4 4
4. Fernando S. N., Raghuvier M. R., Technique to examine the influence of voltage harmonics on Leakage Current Based MOSA Diagnostic Indicator, 2000 Annual Report Conference on [Electrical Insulation and Dielectric Phenomena](#), 2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 15-18 October 2000, vol. 2, s. 596 – 599, ISBN 0-7803-6413-9.
5. PN-EN 60099-4:2009, Ograniczniki przepięć - Część 4: Beziskiernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali do sieci prądu przemiennego.
6. Koseda H., Wrocławski M., Przepięcia w sieci 15 kV i 110 kV koncernu Energa, Materiały Międzynarodowej Konferencji Bezpieczeństwo i niezawodność nowoczesnych systemów rozliczeniowo – pomiarowych ze zdalnym odczytem i zdalnym monitoringiem parametrów sieci, Serock 2005.
7. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, Koncern Energetyczny Energa, Gdańsk 2007.
8. Rózga J., Tarakan K., Doświadczenia eksploatacyjne w zakresie zagrożeń przepięciowych na podstawie doświadczeń Oddziału Gdańsk Koncernu Energetycznego Energa, Materiały Międzynarodowej Konferencji Bezpieczeństwo i niezawodność nowoczesnych systemów rozliczeniowo – pomiarowych ze zdalnym odczytem i zdalnym monitoringiem parametrów sieci, Serock 2005.

## DIAGNOSTICS OF MIDDLE VOLTAGE SURGE ARRESTERS

**Key-words:** middle voltage arresters, diagnostics

The paper presents some practical methods of technical state of middle 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 middle voltage arresters.

