

WPLYW TEMPERATURY WARYSTOROWYCH OGRANICZNIKÓW  
PRZEPIĘĆ ZnO NA PRĄDY UPŁYWOWE

Marek OLESZ

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć  
tel: 583471820 fax: 583472136 e-mail: m.olesz@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** W artykule omówiono wyniki pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych w zakresie prądu upływowego warystorowych ograniczników przepięć z tlenku cynku ZnO dla temperatur w zakresie 263 K ÷ 373 K. Badania wykonano w celu stwierdzenia powtarzalności charakterystyk ograniczników przepięć oraz obliczenia współczynników poprawkowych koniecznych dla przeliczania wyników pomiarów prądu upływowego na temperaturę odniesienia. Procedura taka jest konieczna podczas porównywania wyników badań wykonywanych w różnych warunkach zewnętrznych. Dla temperatur od 263 K do 323 K należy liczyć się nawet z dwukrotną zmianą prądu upływowego w stosunku do przyjętej temperatury odniesienia wynoszącej 293 K.

**Słowa kluczowe:** ograniczniki przepięć ZnO, prąd upływowy, wpływ temperatury

## 1. WSTĘP

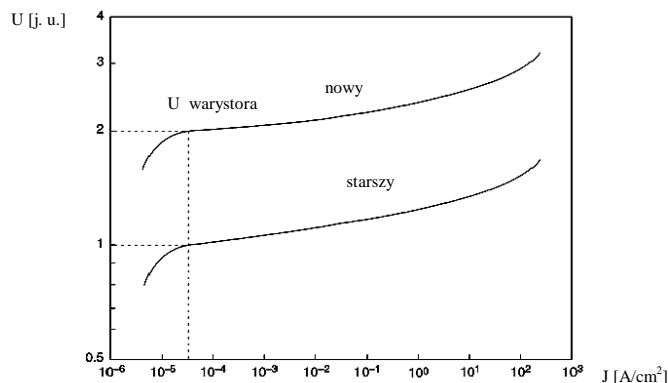
Ograniczniki przepięć spełniają ważną rolę w instalacjach elektroenergetycznych zarówno niskich (nn) jak i wysokich napięć. Przede wszystkim, pod warunkiem prawidłowego doboru, zapewniają skuteczną ochronę elementów systemu – głównie transformatorów energetycznych – przed przepięciami pochodzenia piorunowego i łączeniowego. Ochrona przed przepięciami łączeniowymi jest szczególnie ważna w związku z upowszechnianiem się w sieciach średnich napięć (SN) łączników próżniowych, które szczególnie w starszych rozwiązaniach konstrukcyjnych 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. Z kolei w instalacjach zawierających elementy energoelektroniczne ze względu na przyjęte rozwiązania techniczne układów sterowania, ograniczniki przepięć stanowią obok układów filtrujących ważny element ograniczania poziomu przepięć w układach izolacyjnych maszyn elektrycznych zasilanych z przemienników częstotliwości. W przypadku instalacji niskiego napięcia zasilających układy automatyki lub sieci teleinformatyczne ograniczniki zapewniają ochronę układów elektronicznych przed uszkodzeniem, a przede wszystkim przed nieprawidłowym działaniem rozpatrywanym w kategoriach kompatybilności elektromagnetycznej jak np. nieoczekiwana

zmiana stanu logicznego w urządzeniu, zerowanie układu procesorowego, zaburzenie sygnału sterującego uniemożliwiające odbiór przesyłanej informacji.

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

Warystor ZnO jest elementem, którego charakterystyka napięciowo-prądowa  $U(I)$  zawiera trzy charakterystyczne obszary – przedprzebieciowy, przebieciowy i nasycenia (rys. 1). Charakterystyka  $U(I)$  zależy od temperatury ogranicznika  $T$ , która w części przedprzebieciowej powoduje wzrost wartości prądu (wysokostratna pojemność), a w fazie przewodzenia jego zmniejszenie (rezystancja o małej oporności).

Powyższe zachowanie warystora wynika z zjawisk fizycznych występujących na granicach ziaren otrzymanego spieku. W stanie przed przedprzebieciowym między ziarnami występuje około 3,5 V spadek napięcia [1]. Poniżej napięcia przebiecia przewodnictwo ma charakter omowy wynikający z emisji termoelektronowej Schottky'ego przez barierę potencjału [2]. Dla obszaru przedprzebieciowego istnieje szereg innych modeli dla których uwzględnia się podwójną barierę Schotky'ego, nieomowe przewodzenie i inne zjawiska fizyczne [3].



Rys. 1. Charakterystyka warystora ZnO

Po osiągnięciu napięcia przebiecia, które zgodnie z zasadami ochrony przeciwprzebieciowej powinno być

wyższe od napięcia pracy chronionego urządzenia, a niższe od wytrzymałości napięciowej izolacji rozpoczyna się według rysunku 1 wzrost prądu wskutek tunelowania elektronów przez barierę potencjału. Proces ten jest wspomagany przez generowanie dodatkowych dziur. W obszarze tzw. przebiecia, prąd  $I$  osiąga wartości rzędu kiloamperów, a jego wartość nie zależy już od temperatury, ale głównie od napięcia  $U$  i współczynnika nieliniowości  $\alpha$  zgodnie z zależnością (1):

$$I = k_a U^\alpha \quad (1)$$

gdzie:  $\alpha$  – współczynnik nieliniowości określa zależność  $\log I_1/I_2/\log(U_1/U_2)$  [3, 4]

Przy wyższych napięciach, wskutek redukcji barier między ziarnami, charakter przewodzenia prądu w warystorze jest typowo rezystancyjny przy wartościach rzędu pojedynczych omów. Obserwuje się dalszy wzrost napięcia przy niewielkiej zmianie prądu wskutek zwiększenia się rezystancji ziaren ZnO wynikających z braku nośników prądu.

Szczególnie interesujący dla celów diagnostycznych warystorów jest pierwszy zakres – przedprzebiciowy, gdyż występuje wówczas normalny stan pracy ogranicznika. Dzięki temu możliwe jest określenie jego stanu technicznego poprzez pomiar prądu upływowego lub co jest bardziej miarodajne jego składowej czynnej przy napięciu roboczym sieci.

Na poziomie sieci SN energetyka zawodowa eksploatuje zazwyczaj ograniczniki aż do stanu uszkodzenia. Z punktu widzenia ochrony odgromowej i przeciwprzebieciowej w przedsiębiorstwach energetycznych sprawdza się okresowo według wewnętrznej instrukcji eksploatacji: ciągłość połączeń oraz rezystancje uziemień stacji transformatorowo-rozdzielczych i słupów, na których montuje się ograniczniki. Zazwyczaj, poza ogranicznikami chroniącymi transformatory w głównych punktach zasilających – nie wykonuje się badań stanu wewnętrznego ograniczników, które jak wiadomo ulegają degradacji pod wpływem czasu, temperatury i udarów prądowych [4, 5, 8]. Zmienia się wówczas ich charakterystyka, która może nie zapewniać prawidłowej ochrony w stanach krytycznej pracy systemu elektroenergetycznego.

W przypadku ograniczników w sieciach nn diagnostyka poza specjalnymi zastosowaniami w obszarach techniki wojskowej, medycyny, obszarów zagrożonych wybuchem nie jest wykonywana. W większości przypadków stosuje się zdalny lub na podstawie oględzin monitoring warystorów polegający na wymianie wadliwych wkładek ceramiki ZnO, które podczas przepływu zbyt dużego prądu wyładowczego na skutek zadziałania układu detekcji wysokiej temperatury powinny automatycznie odłączyć się od napięcia.

## 2. METODY I PROBLEMY POMIARU PRĄDU UPŁYWOWEGO

Dla ograniczników stosowanych w sieciach nn nie ma w normie [6] wymagań co do kontroli prądu upływowego – jednakże wytwórcy w procesie produkcji takie wprowadzają nawet na każdej sztuce wyrobu. Analiza wartości prądu upływowego w badaniach typu jest podstawowym kryterium osiągnięcia przez ogranicznik stabilności cieplnej po przyłożeniu zdefiniowanych w normie udarów prądowych przykładowych w odpowiedniej liczbie i odstępach

czasowych. Stan stabilności cieplnej zostaje osiągnięty, jeśli prąd upływowy ogranicznika w warunkach zdefiniowanych przez normę nie przekracza wartości 1 mA. W praktyce w obszarach specjalnych zastosowań producenci na podstawie wymagań badań typu zaproponowali różne przyrządy umożliwiające szybkie zdiagnozowanie stanu warystora ZnO. Zazwyczaj zasada ich działania polega na sprawdzeniu jednego lub kilku punktów charakterystyki napięciowo-prądowej warystora, które nie powinny przekroczyć wartości granicznych podanych przez producenta. Podane urządzenia wymagają zazwyczaj wyłączenia ogranicznika z sieci w celu przeprowadzenia pomiaru prądu upływowego lub napięcia przy prądzie 1 mA, które następnie są porównywane z wartościami dopuszczalnymi.

Inne sposoby diagnostyczne, które nie wymagają wyłączenia ogranicznika z sieci mogą być oparte na nawiązaniu komunikacji z specjalnym modułem umieszczonym w strukturze ogranicznika lub pośrednich pomiarów prądu upływowego metodą cęgową.

W przypadku diagnostyki ograniczników przepięć SN podano w normie [9] następujące sposoby: licznik zadziałań, odczyt prądu ciągłego najlepiej z wydzieleniem składowej czynnej, sygnalizacja stanu częściowego lub całkowitego zniszczenia elementu warystorowego (np. odłączniki), przyrządy analizujące temperaturę, harmoniczne prądu upływowego, straty mocy czynnej.

W praktyce najczęściej wykorzystuje się metodę pomiaru prądu upływowego wykonując pomiary eksploatacyjne na ogranicznikach pracujących w sieci okresowo (diagnostyka okresowa) lub w sposób ciągły (monitoring z zapisem wartości prądu upływowego na karcie pamięci lub w systemie nadzoru). Ze względu na pojemnościowy charakter prądu upływowego pogorszenie stanu ogranicznika powoduje jego niewielką zmianę. W związku z powyższym w praktyce powstała grupa metod wykorzystująca w analizie diagnostycznej pomiar prądu upływowego, ale z wydzieloną składową rezystancyjną na podstawie poniższych sposobów:

- metoda kompensacyjna polegająca na wygenerowaniu składowej pojemnościowej i odjęciu jej od sygnału prądu upływowego [3],
- określenie wartości chwilowej prądu przy szczytowej wartości napięcia [3],
- metoda zmodyfikowanego przesunięcia prądu [3, 5] – polega na generowaniu za pomocą odpowiednich algorytmów odpowiednio przesuniętego fazowo prądu pojemnościowego.

W przypadkach pomiarów cęgami należy dokonać ich kalibracji w układzie odpowiednich wzorców pomiarowych oraz uwzględnić wpływ poziomu napięcia, temperatury oraz szczególnie odkształcenia napięcia na wynik końcowy pomiaru.

Niniejsza publikacja przedstawia wyniki pomiarów prądów upływowych warystorów ZnO prowadzące do określenia współczynników umożliwiających przeliczenie wyników pomiarów na poziom odniesienia określony temperaturą 293 K. W normie [9] podano przykładowe charakterystyki współczynników poprawkowych w funkcji temperatury bez podania odchyłań od wartości średniej oraz analizy wpływu zmiany struktury ogranicznika na poziom prądu upływowego. W związku z tym przeprowadzono badania dla warystorów o różnych wymiarach i pochodzących od kilku producentów.

### 3. WPŁYW TEMPERATURY

Wzrost temperatury powoduje obniżenie napięcia trwałej pracy w sposób zależny od składu chemicznego ceramiki warystora [7, 8]. Przy znacznej zawartości tlenków żelaza i aluminium zmiany te mogą być nawet kilkukrotne dla wybranej temperatury. Spotykane współczynniki temperaturowe  $K$  określone wzorem (2) wg [11] są podawane na poziomie  $(0,5 \div 1) \cdot 10^{-3}/K$ .

$$K = \frac{\frac{\Delta U}{U}}{\Delta T} = \frac{U_T(1mA) - U_{T_0}(1mA)}{U_{T_0}(1mA) \cdot (T - T_0)} \quad (2)$$

gdzie:

$U_T(1 mA)$  – napięcie w temperaturze  $\vartheta$  przy prądzie 1 mA  
 $U_{T_0}(1 mA)$  – napięcie w temperaturze  $\vartheta_0$  przy prądzie 1 mA  
 $T$  – temperatura ogranicznika ZnO  
 $T_0$  – temperatura odniesienia przyjęta na poziomie 293 K

Dla większości ograniczników przepięć w prawidłowym stanie technicznym napięcie przy wymuszonym prądzie upływowym ze wzrostem temperatury o 20 K, zmniejsza się o około 1% [11]. Zwiększone wydzielanie ciepła w strukturze warystora wpływa na wartość napięcia na jego zaciskach i obniża dopuszczalne poziomy udarów prądu i energii w funkcji temperatury.

Innym częściej stosowanym w praktyce sposobem jest określenie wartości prądu upływowego  $I(U_c)$  przy napięciu trwałej pracy ogranicznika  $U_c$ , a następnie wyliczenie współczynników temperaturowych  $k_T$  będących wprost przeliczeniem na temperaturę odniesienia np. 293 K według zależności (3).

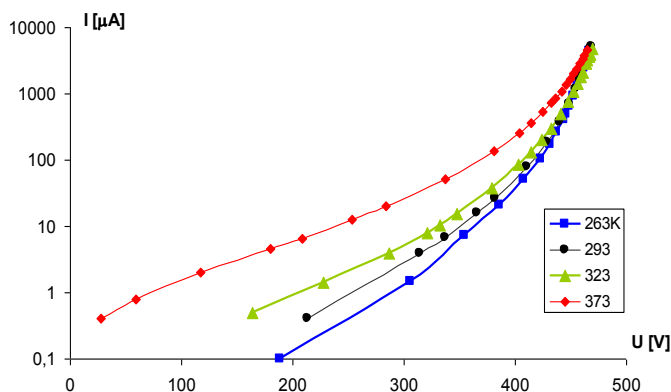
$$I_{T_0}(U_c) = k_T \cdot I_T(U_c) \quad (3)$$

W celu wyznaczenia współczynników korekcyjnych stosowano warystory ZnO dwóch producentów A i B. W jednym przypadku badania dotyczyły 8 ograniczników przepięć o napięciu trwałej pracy 275 V pochodzących od wytwórcy A. Natomiast w drugim badano warystory (z każdego rodzaju po 10 sztuk) pochodzące od producenta B o napięciu 0,28 kV, 0,5 kV, 1 kV i 3 kV. Ograniczniki przechowywano w komorze cieplnej przez okres 5 godzin aż do unormowania rozkładu temperatury w strukturze warystora, a następnie wykonywano pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych w układzie z poprawnie mierzonym prądem wymuszając napięcie stałe lub przemiennie pochodzące w drugim przypadku z generatora napięcia sinusoidalnego o niskiej zawartości wyższych harmonicznych.

Współczynniki korekcyjne wyznaczono w dwóch stanach pracy – przy napięciu stałym (producent A i B) na podstawie standardowo wyznaczonych charakterystyk prądowo-napięciowych oraz przy napięciu przemiennym (tylko producent A) wyznaczając składową rezystancyjną prądu upływowego według metodyki opisanej w [5].

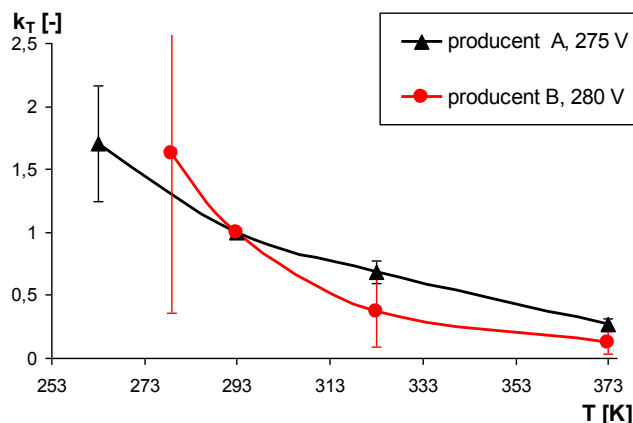
Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe badanych ograniczników przy napięciu trwałej pracy  $U_c = 275 V$  i znamionowym prądzie wyładowczym 20 kA, 8/20  $\mu s$ . Powyżej napięcia stałego odpowiadającego amplitudzie

napięcia trwałej pracy obserwuje się niewielki wpływ temperatury na poziom prądu upływowego.



Rys. 2. Charakterystyki  $I(U)$  dla napięcia stałego przykładowego ogranicznika przepięć pochodzącego od producenta A

Na podstawie zmierzonych charakterystyk  $I(U)$  obliczono pokazane na rys. 3 współczynniki  $k_T$  dla napięcia stałego. Współczynniki te dla warystorów pochodzących od producentów A i B cechowanych na podobne napięcie trwałej pracy są istotnie zróżnicowane. Wyznaczone współczynniki poprawkowe szczególnie w niskich temperaturach otoczenia charakteryzują się znacznym rozrzutem wyników wartości prądu.

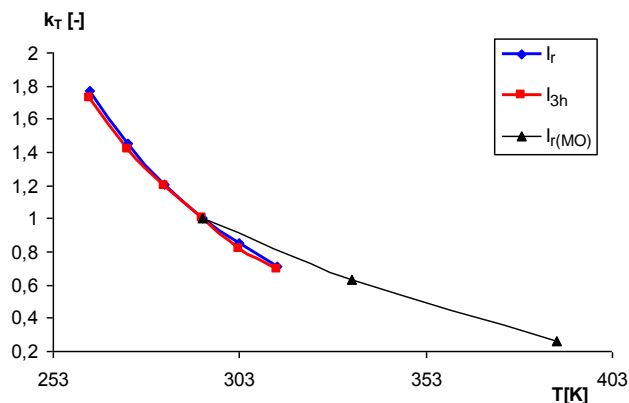


Rys. 3. Współczynniki poprawkowe temperatury obliczone na podstawie pomiarów przy napięciu stałym do przeliczania pomiarów prądu upływowego na warunki odniesienia dla  $T = 293 K$

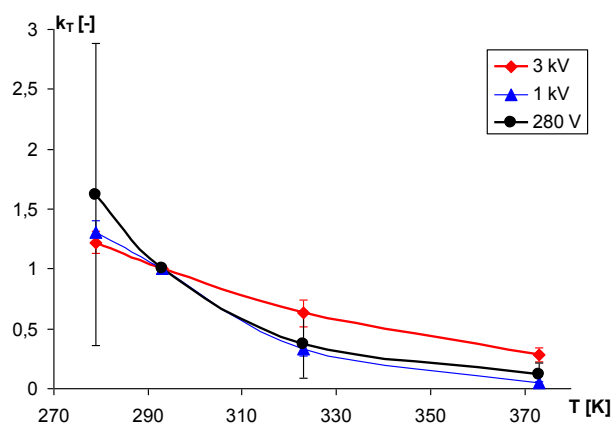
Dla ograniczników producenta A wyznaczono dodatkowo przebieg współczynnika  $k_T(T)$  z pomiarów składowej czynnej prądu upływowego przy napięciu przemiennym, który jest zbliżony do danych podanych w [9, 10] dla zakresu temperatur 263 K  $\div$  303 K. Dla wyższych temperatur obserwowano nieznacznie większe wartości współczynnika  $k_T$  co może wynikać z właściwości badanej ceramiki ZnO (rys. 4).

Publikacje dotyczące wpływu temperatury na prąd upływowo podają różne wartości współczynników poprawkowych, które raczej nie są podawane w kartach katalogowych producentów [7 – 9].

Należy nadmienić, że określenie charakterystyki napięciowo-prądowej może wskazywać także na uszkodzenie cieplne ogranicznika. Powstają wówczas anormalnie duże prądy upływowe, płynące także przy napięciu przemiennym wskazujące na nieprawidłowy stan ogranicznika.



Rys. 4. Porównanie pomiarów prądu upływowego przy napięciu przemiennym,  $I_r$ ,  $I_{3h}$  – składowa rezystancyjna i 3 – harmoniczna prądu upływowego według [9, 10],  $I_{r(MO)}$  – składowa czynna prądu upływowego wyznaczona przez autora dla producenta A



Rys. 5. Wpływ gabarytów ogranicznika producenta B (wysokość warystora wynosi dla 280 V – 3,5 mm, 1 kV – 8 mm i dla 3 kV – 25 mm) na wartość współczynnika  $k_T$

Na rysunku 5 porównano wpływ gabarytów ogranicznika związanych z napięciem trwałej pracy  $U_c$  na przebieg współczynnika temperaturowego  $k_T$ . Wzrost napięcia  $U_c$  i tym samym objętości warystora powoduje wyraźne ograniczenie wpływu temperatury na prąd upływowy, na co wskazuje bardziej płaska charakterystyka  $k_T(T)$ .

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Charakterystyki korekcyjne wpływu temperatury dla ograniczników pochodzących od różnych producentów są

### EFFECT OF TEMPERATURE ON THE LEAKAGE CURRENT OF METAL OXIDE SURGE ARRESTERS

The article discusses the results of measurements of current - voltage characteristics in terms of leakage current metal oxide surge arresters (ZnO) for temperatures in the range 263 K - 373 K. The study was performed in order to determine the repeatability characteristics of surge arresters and calculate the correction factors necessary for translating the results of measurements of the leakage current at the reference temperature.

Such a procedure is necessary when comparing the results of tests performed in different external conditions. Effect of temperature on the leakage current is observed only for voltages not exceeding maximum continuous operating voltage. When performing measurements at temperatures ranging from 263 K to 323 K can be expected even with the double change of leakage current in relation to the reference temperature of 20°C. In addition, arresters with higher continuous operating voltage have a lower effect of temperature on the leakage current. There is a significant influence of the chemical composition of the varistor on the level of leakage current, and thus the value of the correction factor  $k_T$ .

**Key-words:** surge arresters, leakage current, influence of temperature

inne. Cechą serii ograniczników może być zarówno znaczny rozrzut wartości prądu upływowego, jak i inne uśrednione wartości współczynnika  $k_T$ .

Analiza ograniczników o różnych napięciach trwałej pracy tego samego producenta wskazuje na istotne różnice w przebiegu charakterystyk korekcyjnych. Przy niższych napięciach  $U_c$  współczynniki korekcyjne osiągają wyższe wartości, co może mieć związek z łatwiejszym nagrzewaniem mniejszej objętościowo struktury warystora w czasie przepływu prądów upływowych.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Tanaka S., Takahashi K., Direct measurements of voltage – current characteristic of single grain boundary of ZnO varistors. J. Eur. Ceram. Soc. 19, 6-7, 1999, p. 727 – 730.
2. Levinson L. M., Philip H. R., The physics of metal oxide varistors, Journal of Applied Physics, 1975, vol. 46, pp. 1332-1341.
3. Chrzan K., Wysokonapięciowe ograniczniki przepięć, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2003, ISBN: 83-7125-108-4 4.
4. Haddad M., Warne D., Advances in High Voltage Engineering, The Institution of Engineering and Technology, London, 2007.
5. Olesz M., Wyznaczanie składowej rezystancyjnej prądu upływu ogranicznika metodą wektorów ortogonalnych, Przegląd Elektrotechniczny nr 11b, 2012.
6. PN EN 61643 – 11:20, Niskonapięciowe urządzenia do ograniczania przepięć, Część 11 – Urządzenia do ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia. Wymagania i próby.
7. Sawalha A., Abu-Abdeen M., Sedky A., Electrical conductivity study in pure and doped ZnO ceramic system, Physica B 404, 2009, pp. 1316–1320.
8. Zhang Y., Han J., Microstructure and temperature coefficient of resistivity for ZnO ceramics doped with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Materials Letters 60, 2006, pp. 2522–2525.
9. PN-EN 60099-5:1999/A1:2004, Ograniczniki przepięć - Zalecenia wyboru i stosowania.
10. Larsen V., Lien K., In-service testing and diagnosis of gapless metal oxide surge arresters, IX International Symposium on Lightning Protection, 2007, Brazil
11. EPCOS, SIOV Metal Oxide Varistors, Epcos AG, Corporate Center, 2008.