

## KONTROLA JAKOŚCI OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ W ZAKŁADACH APATOR S.A.

Marek OLESZ<sup>1</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

tel: 583471820

fax: 583472136

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

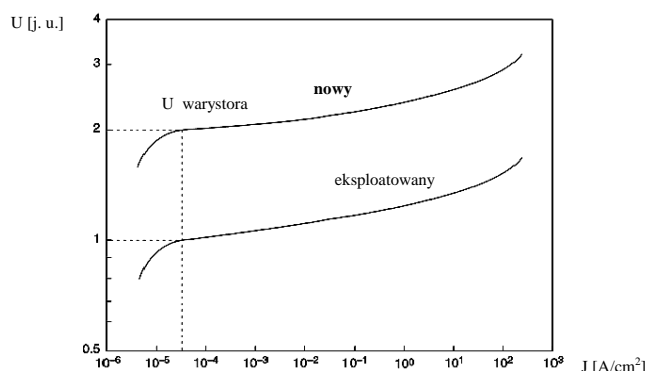
**Streszczenie:** W artykule omówiono etapy produkcji warystorów tlenkowo – cynkowych oraz procedury kontroli jakości ograniczników przepięć niskiego napięcia w zakładach APATOR S.A. w Toruniu. Przedstawiono przykładowe wyniki próby udarem prądowym przeprowadzanej na każdej sztuce wytwarzanego wyrobu.

**Słowa kluczowe:** warystory ZnO, kontrola jakości produkcji

### 1. WSTĘP

Ograniczniki przepięć spełniają ważną rolę w systemie elektroenergetycznym zabezpieczając urządzenia i aparaty elektryczne przed skutkami przepięć atmosferycznych i łączeniowych.

Podstawowym elementem ogranicznika są warystory wytworzone na bazie tlenku cynku ZnO z odpowiednimi domieszkami charakteryzujące się nieliniową charakterystyką napięciowo-prądową, którą analizuje się w celu kontroli stanu technicznego wyrobu. W początkowym zakresie charakterystyki, do napięcia trwałej pracy  $U_c$  ogranicznika włącznie występuje przepływ niewielkich prądów (do kilku mA) o charakterze typowo pojemnościowym z niewielką składową rezystancyjną (rys. 1).



Rys. 1. Charakterystyka warystora ZnO

W ograniczniku dobrej jakości składowa rezystancyjna jest niewielka i przy napięciu trwałej pracy nie powinna przekraczać 100 - 150  $\mu$ A. W przypadku uszkodzeń struktury warystora wskutek oddziaływania przepięć, temperatury, zawilgocenia ma miejsce wzrost wartości

prądu. Obserwuje się wówczas wzrost składowej rezystancyjnej, co wykorzystuje się w diagnostyce stanu ograniczników [1].

Prąd rezystancyjny powoduje straty mocy czynnej powodujące przyrost temperatury warystora w normalnym stanie pracy przy napięciu niższym od  $U_c$ . Zjawisko to wykorzystuje się w diagnostyce stanu ograniczników za pomocą kamer termowizyjnych lub czujników temperatury bezpośrednio umieszczonych w obudowie ogranicznika [1, 2].

Zmiana napięcia pracy warystora powoduje znaczny wzrost mocy wydzielonej w jego strukturze. W ogranicznikach najniższych napięć przy napięciu  $U_c$  jest to rząd zaledwie kilkudziesięciu mW. W przypadku pogorszenia struktury warystora wydziela się moc nawet kilkuset mW co powoduje pogorszenie stabilności cieplnej warystora i wzrost jego temperatury, który powinien zostać ograniczony przez trwale odłączenie ogranicznika poprzez cieplne zabezpieczenie przeciążeniowe umieszczone w jego obudowie.

Z punktu widzenia efektywności energetycznej ograniczniki należy dobierać tak, aby przy napięciu występującym w instalacji elektroenergetycznej występowało jak najmniejsze wydzielanie się mocy czynnej.

Poziom prądu upływowego i mocy wydzielanej w ograniczniku niskiego napięcia jest unormowany dokumentem [3], gdzie w próbie wyrobu wymaga się zmierzenia prądu upływowego przy napięciu trwałej pracy  $U_c$  poniżej poziomu krytycznego podanego przez producenta. Z treści normy [3] wynika, że składowa czynna prądu upływowego przekraczająca 1 mA w próbach kondycjonowania ogranicznika i jego działania (p. 7.6.5) świadczy o braku stabilności cieplnej. W zakładach Apator S.A. prąd ten, w próbach wyrobu po oddziaływaniu pojedynczego znamionowego udaru prądowego o kształcie 8/20  $\mu$ s/ $\mu$ s przyjęto przy  $U_c = 500$  V na poziomie 120  $\mu$ A.

### 2. CHARAKTERYSTYKA WARYSTORA

Warystor ZnO jest elementem, którego charakterystyka napięciowo – prądowa zawiera trzy charakterystyczne obszary – przedprzebieciowy, przebieciowy i nasycenia (rys. 1). W części przedprzebieciowej temperatura powoduje wzrost wartości prądu (wysokostratna pojemność), natomiast

w fazie przewodzenia jego spadek (rezystancja o małej oporności).

Powyższe zachowanie warystora wynika ze zjawisk fizycznych występujących na granicach ziaren otrzymanego spieku. W stanie przedprzebieciowym między ziarnami występuje około 3,5 V spadek napięcia [4]. Poniżej napięcia przebicia przewodnictwo ma charakter omowy wynikający z emisji termoelektronowej Schotky'ego przez barierę potencjału [5]. Dla obszaru przedprzebieciowego istnieje szereg innych modeli dla których uwzględnia się podwójną barierę Schotky'ego, nieomowe przewodzenie i inne zjawiska fizyczne [6].

Po osiągnięciu napięcia przebicia, które zgodnie z zasadami ochrony przeciwprzepięciowej powinno być wyższe od napięcia pracy chronionego urządzenia, a mniejsze od wytrzymałości napięciowej izolacji rozpoczyna się wg rysunku 1 wzrost prądu wskutek tunelowania elektronów przez barierę potencjału. Proces ten jest wspomagany przez generowanie dodatkowych dziur. Poziom prądu nie zależy już od temperatury, ale głównie od napięcia  $U$  i współczynnika nieliniowości  $\alpha$  zgodnie z zależnością (1), gdzie współczynnik nieliniowości  $\alpha$  obliczony na podstawie dwóch punktów charakterystyki ( $u_1, i_1$ ) oraz ( $u_2, i_2$ ) określa wzór (2)

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

$$\alpha = \frac{\ln \frac{i_2}{i_1}}{\ln \frac{u_2}{u_1}} \quad (2)$$

Przy dalszym wzroście napięcia ma miejsce obszar nasycenia – następuje wzrost napięcia przy niewielkiej zmianie prądu wskutek wzrostu rezystancji ziaren ZnO wynikających z braku nośników prądu.

### 3. ETAPY PRODUKCJI

Ograniczniki przepięć składają się z szeregu warystorów wykonanych z domieszkowanego tlenku cynku ZnO. W celu uzyskania odpowiednich właściwości mechanicznych, cieplnych, a przede wszystkim elektrycznych stosuje się odpowiedni skład chemiczny i ilościowy – np. wg Matsuoki jest on następujący w [%mol] [7]:

$\text{Bi}_2\text{O}_3 - 1, \text{Sb}_2\text{O}_3 - 1, \text{Co}_2\text{O}_3 - 0,5, \text{MnO} - 0,5, \text{Cr}_2\text{O}_3 - 0,4, \text{NiO} - 0,8, \text{ZnO} - 95,8.$

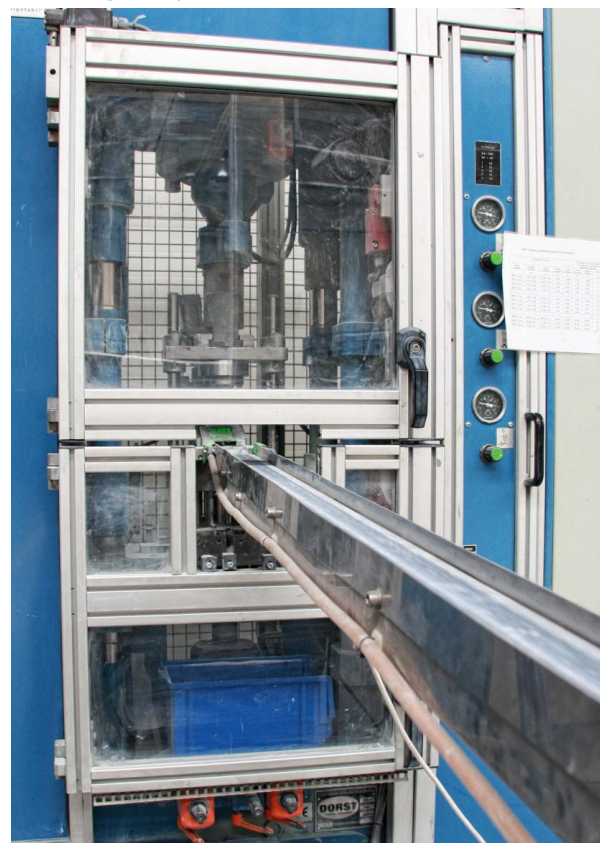
Od zawartości poszczególnych składników zależą istotnie parametry warystora i ich stabilność czasowo – cieplna. Ostateczny skład mieszanki i źródło pochodzenia jej poszczególnych składników są tajemnicą producenta wypracowaną na podstawie prób i analiz fizyko – chemicznych.

Po zmieleniu wymienionych składników i ich homogenizacji (rys. 2) następuje suszenie, granulowanie, a następnie prasowanie (rys. 3), spiekanie z stabilizowaniem w temperaturze około 1200°C, naniesienie elektrod (rys. 4) i zabezpieczenie przed wilgocią.

Powyższe czynności zazwyczaj odbywają się w sposób całkowicie zautomatyzowany, z kontrolą jakości półproduktów pomiędzy poszczególnymi etapami (rys. 5), co ma podstawowe znaczenie dla otrzymania warystorów o powtarzalnych charakterystykach napięciowo- prądowych.



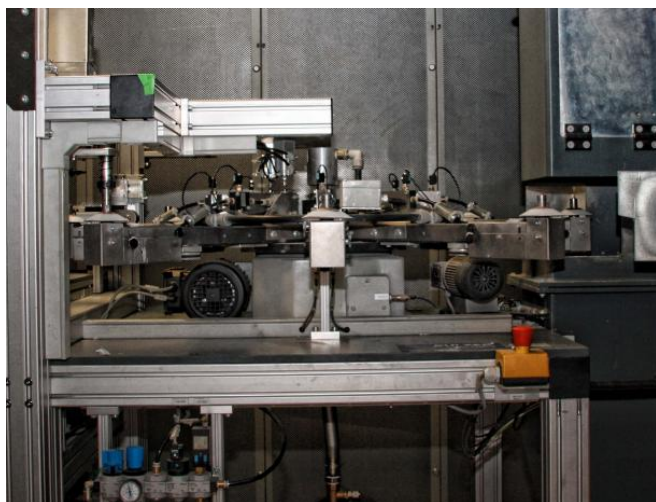
Rys. 2. Transport składnika masy warystorowej, w tle układ homogenizacji



Rys. 3. Prasowanie granulatu na prasie hydraulicznej

W tym celu po zakończeniu cyklu produkcji jednej partii (tzn. wypaleniu ceramiki i jej metalizacji) wykonuje się procedurę kwalifikacji partii, która polega na analizie 200 losowo pobranych krążków ceramiki warystorowej [8]. W trakcie pomiarów kwalifikacyjnych (rys. 5) wyznacza się napięcie referencyjne przy prądzie odniesienia  $I_{ref}=1 \text{ mA}$ ,

napięcie obniżone przy znamionowym prądzie wyładowczym oraz wykonuje się próbę przyspieszonego starzenia napięciem  $1,1 U_c$  poprzez umieszczenie na 1000 h próbek w temperaturze  $115^\circ\text{C}$  (maksymalna dopuszczalna zmiana prądu upływu  $< 120\%$ ).



Rys. 4. Stanowisko do metalizacji warystorów



Rys. 5. Stanowisko do selekcjonowania warystorów wraz z generatorem uderzeń prostokątnych

Po akceptacji partii produkcji każdy z krążków jest badany wg wymagań normy [8] poprzez wyznaczenie napięcia odniesienia podczas wymuszenia prądu stałego  $1\text{ mA}$ , prądu upływowego przy napięciu trwałej pracy oraz napięcia obniżonego przy przepływie prądu wyładowczego o kształcie  $8/20\ \mu\text{s}/\mu\text{s}$ . Procedura ta ma na celu odrzucenie próbek nie spełniających założonych przez wytwórcę granicznych kryteriów oraz podział krążków z partii produkcji na grupy o podobnych charakterystykach napięciowo – prądowych.

Powtarzalne charakterystyki są szczególnie ważne dla ograniczników średniego napięcia, kiedy duża liczba zastosowanych szeregowo pojedynczych warystorów w przypadku znacznych rozbieżności charakterystyk obciąża się nierównomiernie i poprzez niejednorodny w objętości rozkład temperatury prowadzi do miejscowego uszkodzenia ogranicznika.

#### 4. WYNIKI POMIARÓW

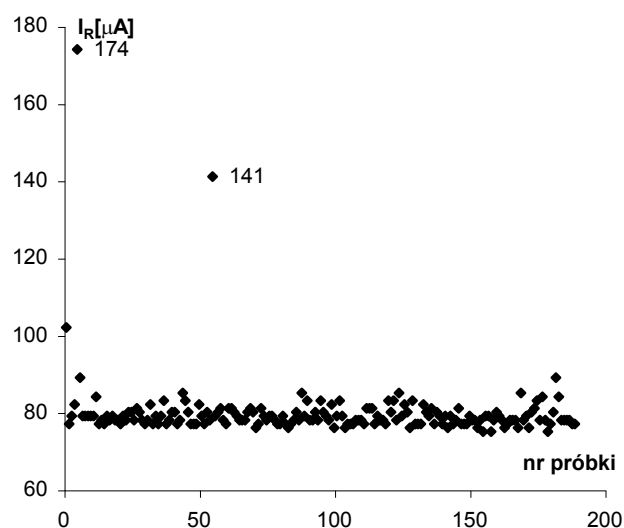
W czasie produkcji monitorowano dane techniczne ogranicznika niskiego napięcia typu ASA 500 - 5 bez odłącznika o konstrukcji przedstawionej na rysunku 6 i następujących parametrach technicznych: największe napięcie trwałej pracy –  $U_c = 500\text{ V}$ , znamionowy prąd wyładowczy –  $I_n = 5\text{ kA}$ , największy prąd wyładowczy  $I_{\text{max}} = 30\text{ kA}$ , napięcie obniżone –  $U_o = 1990\text{ V}$  [9].



Rys. 6. Przekrój ogranicznika niskiego napięcia typu ASA

System kontroli produkcji w zakładach APATOR S.A. opiera się na wytycznych przedstawionych w normie [3] dotyczącej ograniczników przepięć nn. Norma [3] w p. 8.2 zaleca przeprowadzenie badań dla pierwiastka trzeciego stopnia z liczebności partii produkcji. W zakładach APATOR wymaganie to zaostrzono, ponieważ badaniu podlega każda sztuka wyrobu, co zapewnia pełną kontrolę jakości i uzyskanie powtarzalnych charakterystyk ograniczników dopuszczonych do obrotu. Badanie polega na przyłożeniu napięcia trwałej pracy ogranicznika, a następnie wymuszeniu przy przejściu napięcia przez zero udaru prądowego o kształcie  $8/20\ \mu\text{s}/\mu\text{s}$  i wartości szczytowej zbliżonej do zadeklarowanego prądu  $I_n$ . W czasie przyłożenia udaru odbywa się pomiar napięcia obniżonego, a po próbie przy przyłożonym napięciu przemiennym następuje pomiar składowej czynnej prądu upływowego. Wystąpienie zbyt dużej wartości napięcia obniżonego ( $> U_o$ ) lub prądu upływowego ( $> 120\ \mu\text{A}$ ) powoduje odrzucenie badanego wyrobu.

Na rys. 7 pokazano mierzoną po przyłożonym udarze prądowym  $5\text{ kA}$  składową czynną prądu upływowego  $I_R$  dla kolejnych badanych gotowych wyrobów.



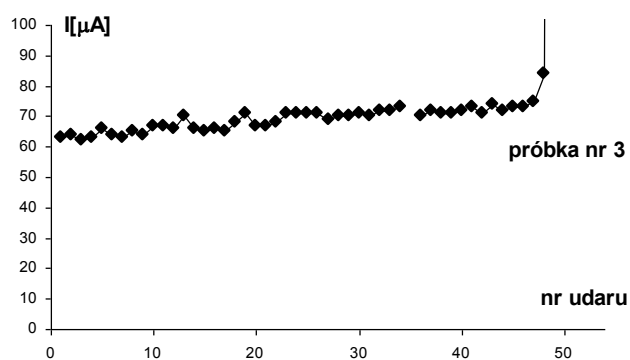
Rys. 7. Składowa czynna prądu upływowego mierzona po przepływie prądu wyładowczego

W czasie badania 189 ograniczników zarejestrowano tylko dwie próbki w których składowa czynna prądu upływowego przekraczała założoną granicę tolerancji. Wyniki prądu upływowego i napięcia obniżonego charakteryzujące się niewielkimi odchyleniami od wartości średniej świadczą o dużej powtarzalności krążków ceramiki warystorowej otrzymywanych w czasie jednego wypieku.

Dodatkowo wykonano próby starzenia ograniczników udarami prądowymi przykładanymi co 1 minutę, tak aby ograniczyć nagrzewanie ogranicznika. Wybrano losowo 5 próbek z partii produkcyjnej, a następnie przyłożono do każdej z nich serie po 20 udarów każda. Przyjęto procedurę badania o charakterze kumulacyjnym – do 20 udaru stosowano serie 1 udarowe, od 21 do 40 – 10 serii 2 udarowych, od 41 – 60 – 5 serii 4 udarowych. Przyłożenie kilku udarów w krótkim odstępie czasu powoduje przyspieszone nagrzewanie ogranicznika, wzrost jego prądu upływowego, a następnie pogorszenie parametrów prowadzące w końcu do przebiccia jego struktury. Należy nadmienić, że przeprowadzona próba jest obostrzona w stosunku do wymagań kondycjonowania ograniczników klasy II podanych w p. 7.6.4 [3] gdzie przykłada się 3 serie po 5 udarach każda przy czym odstęp czasu pomiędzy seriami wynosi 25 – 30 minut, aby ogranicznik osiągnął temperaturę otoczenia (nie ma wymagania zasilania ogranicznika napięciem  $U_c$  pomiędzy seriami udarów prądowych).

Wykonane powyższe badania starzenia ogranicznika udarami prądowymi o charakterze kumulacyjnym według programu autora pracy świadczą o dużym zróżnicowaniu struktury warystora na powtarzane w odstępach 1 minuty udary prądowe.

Dla analizowanych 5 próbek uszkodzenie wystąpiło po przyłożeniu odpowiednio: 10, 22, 49, 47 i 15 udarów. Przykładanie kolejnych udarów powoduje powolny wzrost składowej czynnej prądu upływowego (rys. 8), która nagle wzrasta nawet kilkanaście razy przy uszkodzeniu warystora (np. do 1031  $\mu A$  dla próbki nr 3).



Rys. 8. Składowa czynna prądu upływowego ogranicznika starzonego udarami prądowymi 8/20  $\mu s/\mu s$

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Zastosowany w zakładach APATOR cykl produkcji ceramiki warystorowej i ograniczników przepięć zapewnia uzyskanie powtarzalnych wyrobów o jakości zgodnej z wymaganiami norm [3, 8].

Oddziaływanie kolejnych udarów prądowych powoduje nieznaczny wzrost prądu upływowego ogranicznika. Dopiero przekroczenie krytycznej liczby udarów pozwala obserwować zasadnicze pogorszenie przebiegu charakterystyki przedprzebiciowej warystora.

Ograniczniki wytrzymują nawet do kilkudziesięciu udarów prądowych  $I_n$  przykładanych co 1 minutę.

Podobieństwo charakterystyk napięciowo – prądowych nie wystarcza do jednoznacznego prognozowania czasu życia ogranicznika i jego zachowania przy powtarzalnych udarach prądowych. Starzenie ogranicznika wynika raczej z równomierności rozkładu temperatury związanej z ścieżkami przepływu prądu w stanie przewodzenia.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Smulko J., Olesz M., Hasse L., Kaczmarek L., Lentka G., Problems of varistor quality assessment during exploitation, Metrology and Measurement Systems. - Vol. XIX, No. 2 (2012), s. 395-404
- Hasse L., Smulko J., Olesz M., Sedlakova V., Sikula J., Sedlak P., Diagnostics of ZnO varistors by means of nondestructive testing, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 2011, Nr 30, s. 51-56
- PN – EN 61643-11: 2006, Niskonapięciowe urządzenia do ograniczania przepięć. Część 11: Urządzenia do ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia. Wymagania i próby.
- 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
- Levinson L. M., Philip H. R., The physics of metal oxide varistors, Journal of Applied Physics, 1975, vol. 46, pp. 1332-1341.
- Chrzan K., Wysokonapięciowe ograniczniki przepięć, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2003, ISBN: 83-7125-108-4 4.
- Mielcarek W., Uwarunkowania technologiczne warystorów tlenkowych, IEL, Warszawa 2002.
- PN – EN 61643-331: 2008, Elementy niskonapięciowych urządzeń do ograniczania przepięć. Część 331: Wymagania dla warystorów z tlenków metali (MOV)
- Ograniczniki niskich i średnich napięć. Katalog produktów. Apator S.A., 2010.

## QUALITY ASSESMENT OF ZnO VARISTORS IN APATOR S.A. COMPANY

**Key-words:** ZnO varistor, product quality,

### Abstract:

The paper presents the cycle of manufacturing of ZnO varistors in APATOR S.A. company. The results of checking the final products quality are also presented.