

SPEKTROSKOPIA IMPEDANCYJNA W BADANIACH WŁAŚCIWOŚCI OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ NISKIEGO NAPIĘCIA PODDANYCH DZIAŁANIU IMPULSOWYCH NARAŻEŃ ENERGETYCZNYCH

Paweł ZYDRON, Michał BONK, Łukasz FUŚNIK

AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
tel.: 12 6172835 e-mail: pawel.zydron@agh.edu.pl, bonkm@agh.edu.pl

Streszczenie: Ograniczniki przepięć stosowane do ochrony instalacji i urządzeń elektrycznych są obecnie wytwarzane głównie na bazie warystorów tlenkowych ZnO. Każde przepięcie powoduje powstanie narażenia energetycznego, które w pewnym stopniu degraduje wewnętrzną strukturę warystora. W efekcie zmienia to jego właściwości oraz wskutek kumulowania się efektów starzeniowych prowadzi do skrócenia czasu życia.

Artykuł przedstawia metodę i wyniki badań niskonapięciowych ograniczników przepięć z warystorami tlenkowymi, poddawanych działaniu standaryzowanych impulsowych narażeń energetycznych. W badaniach zastosowano układ pomiarowy umożliwiający rejestrację szerokopasmowych charakterystyk niskosygnałowej impedancji warystorów. W oparciu o te dane analizowano zmiany wybranych parametrów elektrycznych, wywołane efektami starzeniowymi.

Słowa kluczowe: ograniczniki przepięć, warystory tlenkowe, spektroskopia impedancyjna, diagnostyka.

1. WPROWADZENIE

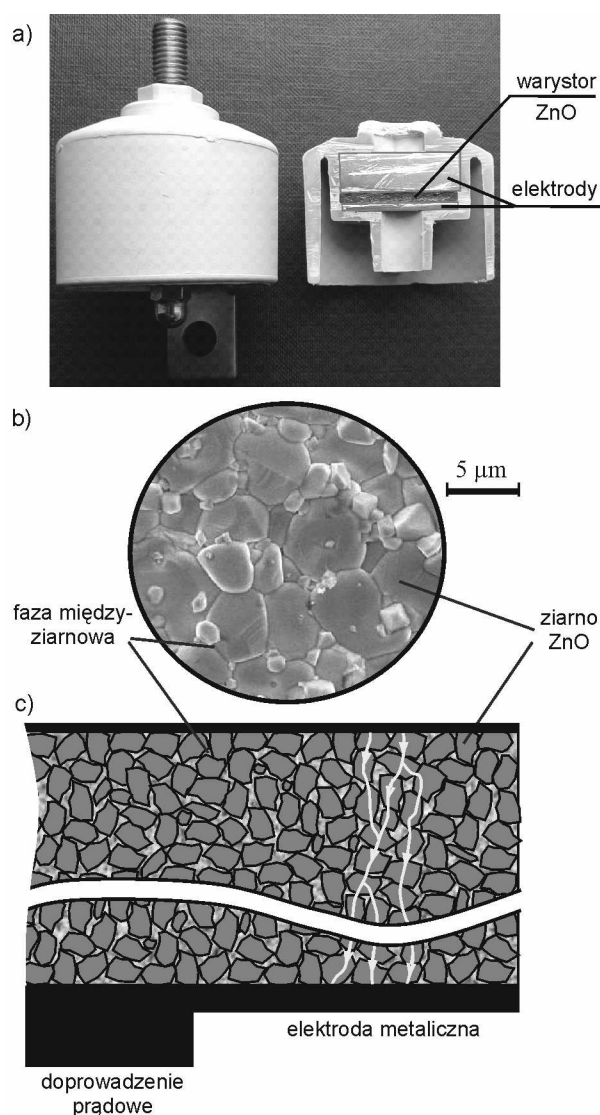
Powszechnie stosowaną metodą ograniczania przepięć w sieciach i instalacjach elektrycznych jest instalowanie beziskiernikowych ograniczników przepięć, o parametrach technicznych dobranych do miejsca i warunków ich pracy. Warystory, stanowiące podstawowy element roboczy tych urządzeń są obecnie wytwarzane głównie na bazie polikrystalicznej ceramiki tlenkowej ZnO wraz z odpowiednimi dodatkami (tlenki np. bizmutu, magnezu, kobaltu, chromu), umożliwiającymi przy właściwie dobranych parametrach procesu produkcyjnego, optymalizację właściwości eksploatacyjnych, w szczególności kształtowanie charakterystyki napięciowo-prądowej [1-3].

Mechanizm przewodzenia prądu w warystorze jest złożony, ze względu na wpływ właściwości materiału oraz zjawisk nieliniowych zachodzących na granicy ziaren polikryształu [4, 5]. Efektem tego jest silnie nieliniowa zależność prądu płynącego przez warystor od wartości napięcia przyłożonego do jego elektrod, co sprawia, że jest on stosowany jako element stabilizujący napięcie. Najczęściej, kształt statycznej charakterystyki $I-U$ jest przybliżany wzorem potęgowym:

$$I = k \cdot U^\alpha \quad (1)$$

gdzie: I – prąd płynący przez warystor, U – napięcie na warystorze, k , α – stałe, zależne od materiałów oraz parametrów procesu technologicznego produkcji warystora.

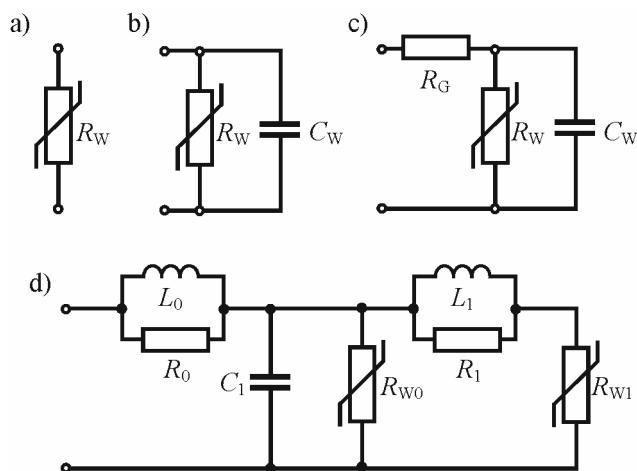
Struktura polikrystaliczna warystora charakteryzuje się specyficzną ziarnistością i przestrzennym nieuporządkowaniem (rys. 1), co jest brane pod uwagę w rozszerzonych, wieloelementowych modelach 2D i 3D warystorów [6, 7].



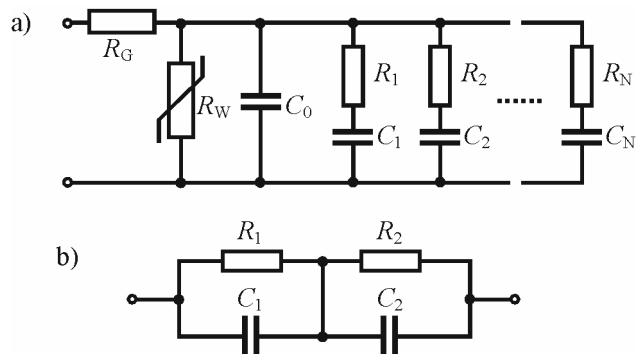
Rys. 1. Budowa wewnętrzna niskonapięciowego, beziskiernikowego ogranicznika przepięć z warystorami tlenkowymi: a) przekrój ogranicznika 280V/5kA, b) zdjęcie mikroskopowe struktury polikrystalicznej warystora, c) model struktury polikrystalicznej z zaznaczonymi przykładowymi ścieżkami przepływu prądu

Każde przepięcie pojawiające się na ograniczniku powoduje powstanie narażenia energetycznego, które w mniejszym lub większym stopniu degraduje wewnętrzną strukturę warystora. W efekcie zmienia to jego właściwości oraz wskutek kumulowania się efektów starzeniowych prowadzi do skrócenia czasu eksploatacji lub w sposób bezpośredni powoduje uszkodzenie ogranicznika.

Dla potrzeb modelowania i analizy pracy ograniczników przepięć stosowane są różne ich modele, dostosowane do konkretnych potrzeb. Dla analizy wielkosygnałowej tworzone są modele pozwalające na odwzorowanie pełnych charakterystyk $I-U$ warystorów wraz z zachodzącymi w nich zjawiskami dynamicznymi (Rys. 2). W najprostszym modelu warystor jest reprezentowany przez rezystor nieliniowy R_W (rys. 2a). Dla odwzorowania jego właściwości przy napięciach niższych od napięcia trwałej pracy (dla bardzo dużych wartości R_W) równolegle dołącza się pojemność C_W (rys. 2b). Dodatkowo, bierze się również pod uwagę obecność stałej rezystancji szeregowej R_G (rys. 2c). Aby uwzględnić zjawiska występujące w stanach dynamicznych model taki może być rozszerzony o kolejne gałęzie i elementy, jak np. w modelu Grupy Roboczej 3.4.11 IEEE (rys. 2d) [8]. W badaniach dotyczących analizy zmian strukturalnych warystorów oraz w badaniach diagnostycznych stosowane są też napięcia o wartościach wielokrotnie niższych od napięcia trwałej pracy. Wówczas stosowane są modele małosygnałowe, które mają na celu odwzorowanie procesów odpowiadających za zjawiska relaksacji dielektrycznej (rys. 3).



Rys. 2. Wybrane modele ograniczników z warystorami tlenkowymi: a) rezystor nieliniowy, b) rezystor nieliniowy z równoległą pojemnością, c) model 2b uzupełniony o szeregowy rezystor, d) model Grupy Roboczej 3.4.11 IEEE [8]



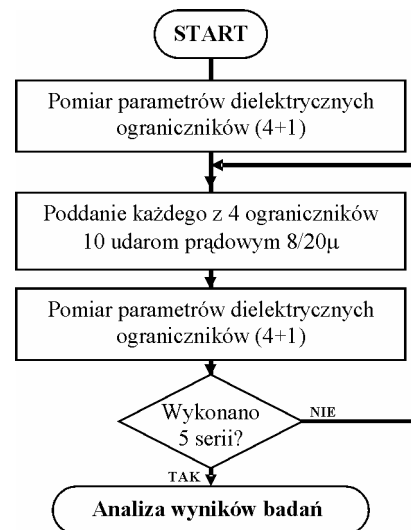
Rys. 3. Małosygnałowe modele ograniczników uwzględniające występowanie dielektrycznych zjawisk relaksacyjnych: a) model z N gałęziami relaksacyjnymi $R-C$ [9], b) model układu 2-warstwowego z relaksacją Maxwella-Wagnera [10, 11]

2. METODA I PROGRAM BADAŃ

W opisywanych badaniach 3 grupy niskonapięciowych ograniczników przepięć (Tabela 1) poddano działaniu narażeń impulsowych o znanej energii. W tym celu zastosowano generator udarów prądowych $8/20\mu s$, wytwarzający udary o wartości szczytowej zbliżonej do wartości znamionowego prądu wyładowczego każdego z ograniczników. Program badań przedstawia diagram z rysunku 4.

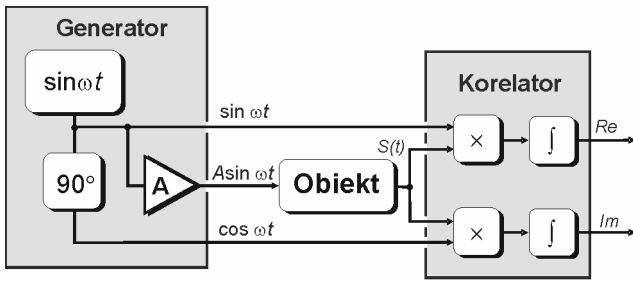
Tabela 1. Wybrane parametry badanych ograniczników

Parametr	Grupa ograniczników		
	A	B	C
Napięcie trwałej pracy U_c [V]	280	440	660
Znamionowy prąd wyładowczy (dla udaru $8\mu s / 20\mu s$) I_n [kA]	5		
Napięciowy poziom ochrony U_{pn} przy I_n [V]	1100	1800	2500
Maksymalny prąd impulsowy (dla udaru $8\mu s / 20\mu s$) I_{max} [kA]	25		
Napięciowy poziom ochrony U_{pmax} przy I_{max} [V]	1500	2500	3200
Zdolność pochłaniania energii ($1 \cdot \text{udar } 8\mu s / 20\mu s; I_{max}$) W_{max} [J]	1800	3000	4000
Liczba badanych ograniczników	4 + 1 referencyjny		



Rys. 4. Diagram harmonogramu programu badań

Podczas badań laboratoryjnych, w każdej ich serii, stosowano metodę spektroskopii impedancyjnej, pozwalającą na wykonanie poszerzonych analiz wieloparametrycznych, dla obserwacji zmian właściwości dielektrycznych badanych warystorów [10]. W metodzie tej zakłada się, że badany warystor stanowi obiekt typu LTI , co znaczy, że jest elementem liniowym, niezmiennym w czasie (*Linear Time Invariant*). W przypadku pobudzeń niskonapięciowych jest to założenie w pełni uzasadnione. Celem pomiaru jest określenie szerokopasmowej funkcji przejścia utożsamianej z zależną od częstotliwości impedancją $Z(\omega)$. Przyrządem pomiarowym jest szerokopasmowy analizator odpowiedzi częstotliwościowej FRA (*Frequency Response Analyser*). Rozwiązania konstrukcyjne tego typu przyrządów są oparte na układzie korelatora, w którym prąd płynący przez badany element jest korelowany z dwoma synchronicznymi, ortogonalnymi sygnałami odniesienia ($\sin\omega t / \cos\omega t$), z których jeden odpowiada sygnałowi pobudzenia (rys. 5).



Rys. 5. Schemat blokowy analizatora FRA

Układ taki działa jak filtr składowej podstawowej, w którym selektywność jest zależna od całkowitego czasu korelowania sygnałów, stanowiącego wielokrotność okresu częstotliwości podstawowej:

$$Q = \frac{f}{\Delta f} = N \quad (1)$$

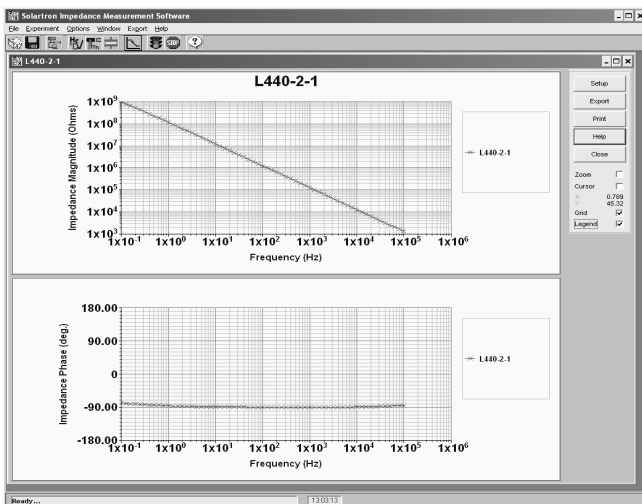
gdzie: Q – dobroć filtru, f – częstotliwość, N – liczba okresów, Δf – równoważna szerokość pasma filtru.

Metodę cechuje duża dokładność i możliwość uzyskania znacznych wartości współczynnika sygnał/szum (SNR) jednak efektem sekwencyjnego skanowania widma częstotliwości są bardzo długie czasy całego pomiaru. Dotyczy to w szczególności zakresu bardzo niskich częstotliwości ($f < 0,1$ Hz), bowiem minimalny czas pomiaru T_p dla pojedynczej częstotliwości wynosi:

$$T_p = \frac{N}{f} \quad (2)$$

Wyznaczone w pomiarach charakterystyki częstotliwościowe impedancji $Z(\omega)$ są podstawą dla obliczenia innych wielkości zespolonych: admitancji $Y(\omega)$ i pojemności $C(\omega)$ oraz parametrów materiałowych: przenikalności elektrycznej $\epsilon(\omega)$ oraz współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta(\omega)$. Stanowisko spektroskopii impedancyjnej/dielektrycznej Katedry Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH jest wyposażone w system pomiarowy złożony z:

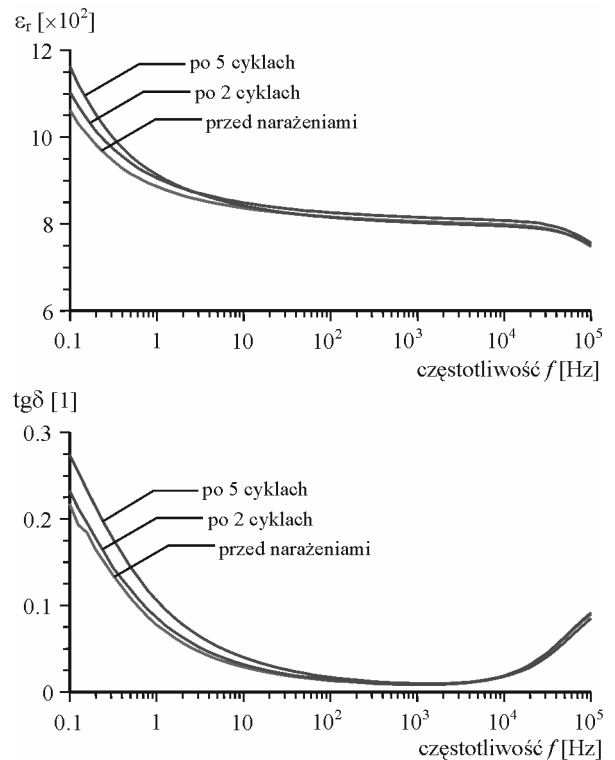
- analizatora FRA Solartron 1260A,
- interfejsu dielektrycznego Solartron 1296A,
- kondensatora pomiarowego i wzorcowego,
- komputera nadzorującego, wyposażonego w kartę interfejsu IEEE-488 oraz programy obsługi pomiarów: *Impednce* ver. 3.5 (rys. 6) i *SMaRT* ver. 3.2.1.



Rys. 6. Ekran programu do obsługi systemu spektroskopii impedancyjnej Solartron 1260A/1296A

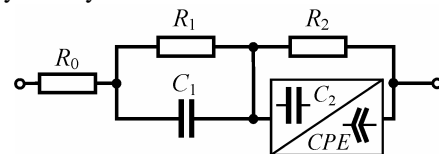
3. WYNIKI POMIARÓW ORAZ ICH ANALIZA

Dla każdej grupy badanych ograniczników napięcia wyznaczono charakterystyki szerokopasmowe przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_r(\omega)$ oraz współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta(\omega)$ w zakresie częstotliwości od 0,1 Hz do 100 kHz. Wybór dolnej częstotliwości był podyktowany zamiarem ograniczenia czasu trwania pomiaru, z zamysłem poszukiwania efektywnej i stosunkowo szybkiej metody diagnozowania ograniczników. Na rysunku 7 przedstawiono wykresy w/w charakterystyk dla jednego, wybranego ogranicznika z grupy B, poddawanego narażeniom udarowym. Analiza charakterystyk wskazuje na ich stopniowe podnoszenie się w kierunku większych wartości, w zakresie niskich częstotliwości. Efekt ten zaobserwowano dla wszystkich ograniczników a jego wartość była zależna od grupy i egzemplarza; dla ograniczników referencyjnych, nie poddawanych narażeniom, efekt ten nie wystąpił.



Rys. 7. Widma przenikalności elektrycznej względnej ϵ_r oraz współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ warystora ogranicznika napięcia z grupy B przed, po 2 i po 5 cyklach narażeń udarowych

Wyniki pomiarów analizowano estymując uzyskane charakterystyki szerokopasmowe przy zastosowaniu modelowania badanych warystorów schematem zastępczym prezentowanym na rysunku 8.



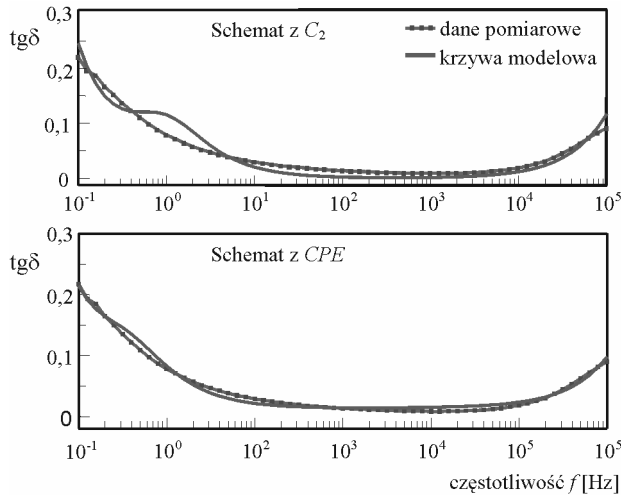
Rys. 8. Schemat zastępczy warystora dla modelowania charakterystyk szerokopasmowych w programie ZView (Scribner Inc.)

Podczas modelowania w gałęzi równoległej do rezystora R_2 umieszczano kondensator C_2 albo element CPE (Constant Phase Element) [10, 12]. Przykład dopasowania charakterystyk współczynnika $\text{tg}\delta$ dla obu modeli do wyników pomiarów jednego z warystorów (Tabela 1) przedstawia

rysunek 9. W każdym z analizowanych przypadków uzyskano lepsze dopasowanie dla modelu z elementem *CPE*.

Tabela 2. Wartości elementów schematu dla wykresów z rysunku 9.

Model	R_0	R_1	C_1	R_2	C_2 albo $CPE-T$	$CPE-P$
„C”	144,6 Ω	4,67 G Ω	1,53 nF	19,9 M Ω	7,45 nF	–
„CPE”	107,3 Ω	6,08 G Ω	1,64 nF	60,9 M Ω	7,69*10 ⁻⁹	0,9619



Rys. 9. Wpływ zastosowanych elementów schematu zastępczego na dopasowanie krzywej modelowej $tg\delta$ do wyników pomiarów

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono rezultaty badań warystorów niskonapięciowych ograniczników przepięć, wykonanych z zastosowaniem metody spektroskopii impedancyjnej. Jest to jedna z nieniszczących metod badawczych, która wraz innymi, tego typu, może być stosowana dla oceny diagnostycznej warystorów [13-15]. Bazując na wynikach pomiarów modelowano właściwości elektryczne struktur warystorowych za pomocą schematów zastępczych.

W modelu o topologii warstwowej, uwzględniającej zjawiska występujące w ziarnach ZnO oraz na ich granicach, w jednej z warstw, w miejsce kondensatora stosowano element *CPE* (*Constant Phase Element*), co zmniejszyło błąd średniokwadratowy dopasowania. Świadczy to o: lepszym odwzorowaniu przez ten model efektów zjawisk fizycznych zachodzących w badanych warystorach oraz występowaniu pewnego rozkładu stałych czasowych procesów relaksacyjnych zachodzących w ich polikrystalicznej strukturze.

Pomiary wykazały wpływ energetycznego oddziaływania udarów prądowych na stan struktury warystora i w efekcie jego parametry elektryczne.

IMPEDANCE SPECTROSCOPY IN INVESTIGATIONS OF LOW VOLTAGE SURGE ARRESTERS EXPOSED ON IMPULSE ENERGETIC STRESSES

Surge arresters used for protection of electrical installations and devices are currently manufactured mainly from ZnO varistors. Each overvoltage causes energetic stress, which degrades the internal structure of the varistor. As a result, it changes its properties, and by cumulative effects of aging processes reduces the lifetime.

The paper presents the method and results of the investigations of low voltage ZnO surge arresters stressed by standardized current pulses 8/20 μ s repeated in 5 experimental cycles. In laboratory studies a *FRA* measuring system was used to record broadband impedance characteristics of varistors. Based on impedance spectroscopy data changes in selected electrical parameters of varistors due to the cumulative effects of energetic stresses were analyzed.

Keywords: surge arresters, metal-oxide varistors, impedance spectroscopy, and diagnostics.

5. BIBLIOGRAFIA

- Mielcarek W.: Uwarunkowania technologiczne warystorów tlenkowych, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt nr 212, Warszawa, 2002.
- Florkowska B., Furgał J., Szczerbiński M., Włodek R., Zydrón P.: Materiały elektrotechniczne. Podstawy teoretyczne i zastosowania, Wyd. AGH, Kraków, 2010.
- Meshkatoddini M.R.: Investigation of the influence of the ZnO varistor preparation method on its characteristics, Conf. Rec. 2008 IEEE Int. Symp. on Electr. Insul. ISEI 2008, s. 320-323.
- Levinson L.M., Philipp H.R.: The physics of metal oxide varistors, J. Appl. Phys., vol. 46, 1975, s. 1332-1341.
- Mahan G.D., Levinson L.M., Philipp H.R.: Theory of conduction in ZnO varistors, J. Appl. Phys., vol. 50, 1979, s. 2799-2812.
- Kabir M., Suzuki M., Yoshimura N.: An equivalent circuit for ZnO varistors deduced from electrical characteristics of a single grain, J. Inst. Electrostat. Jpn., vol. 28, no 6, 2004, s. 304-309.
- Bavelis K., Gjonaj E., Weiland T.: Modeling of electrical transport in zinc oxide varistors, Adv. Radio Sci., no. 12, 2014, s. 29-34.
- IEEE Working Group 3.4.11: Modelling of metal oxide surge arresters, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 7, no. no. 1, 1992, s. 302-309.
- Yuanfang W., Xianglian Y., Xiaoyu Y., Chengke Z.: Investigation into the equivalent circuit of MOV and the determination of its parameters, IEEE Trans. on Power Deliv., vol. 19, no. 3, 2004, s. 1091-1094.
- Borsukov E., Macdonald J. R.: Impedance spectroscopy. Theory, experiment, and applications, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
- Jianjun Liu i in.: Large dielectric constant and Maxwell-Wagner relaxation in Bi₂/3Cu₃Ti₄O₁₂, Physical Review B, vol. 70, 2004, paper 144106.
- Zydrón P.: Sygnały probiercze i pomiarowe w technice wysokich napięć i diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Rozprawy i Monografie nr 233, UWND AGH, Kraków 2011.
- Jaroszewski M., Pospieszna J.: An assessment of ageing of oxide varistors exposed to pulse hazards using dielectric spectroscopy, ICSD, Toulouse. France, 2004.
- Hasse L., Smulko J., Olesz M., Sedláková V., Šikula J., Sedlák P.: Diagnostics of ZnO varistors by means of nondestructive testing, ZN Wydziału EiA Politechniki Gdańskiej, Nr 30, 2011, s. 51-56.
- CIGRÉ WG A3.17: MO surge arresters stresses and test procedures, CIGRE Technical Brochure no. 544, 2013.