

Wpływ temperatury na parametry warystorów tlenkowych ograniczników przepięć niskiego napięcia badanych metodami spektroskopii impedancyjnej

Streszczenie. Warystory tlenkowe znalazły powszechne zastosowanie w układach ograniczających wartości przepięć powstających w sieciach i układach elektroenergetycznych. W artykule opisano zagadnienia związane ze stosowaniem szerokopasmowej spektroskopii impedancyjnej dla określenia wybranych parametrów elektrycznych i materiałowych niskonapięciowych ograniczników przepięć. Są one ilustrowane wynikami badań wykonanych dla określenia wpływu temperatury oraz udarowych narażeń prądowych na wybrane parametry opisujące stan warystora.

Abstract. Gapless Metal-Oxide Varistors are widely used in systems limiting the surges which arise in electrical networks and electrical power systems. The article describes issues related to the application of wideband impedance spectroscopy for the experimental determination of some of electrical and material parameters of low voltage surge arresters. They are illustrated with examples of the results of tests performed to determine the effect of temperature and high current pulse stresses on some parameters describing the condition of the varistor. (**Influence of temperature on parameters of low-voltage surge arresters' metal-oxide varistors investigated by impedance spectroscopy methods**).

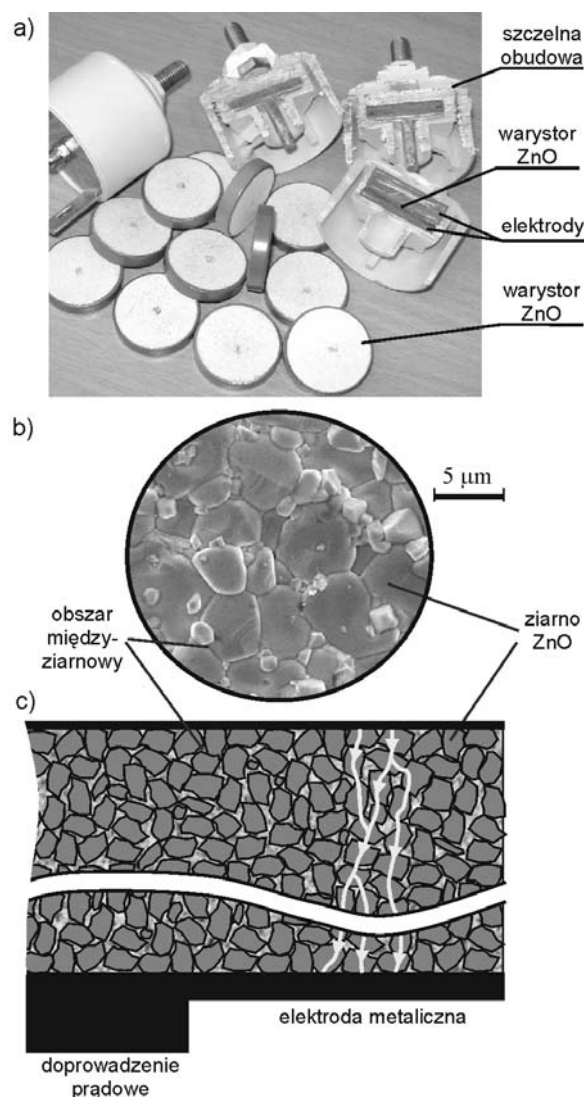
Keywords: MOV's, surge arresters, impedance spectroscopy, varistors' models

Słowa kluczowe: warystory tlenkowe, ograniczniki przepięć, spektroskopia impedancyjna, modele warystorów

Wprowadzenie

Jedną z metod ograniczania przepięć w sieciach i instalacjach elektrycznych, na wszystkich poziomach napięć, jest stosowanie ograniczników przepięć. Na wczesnym etapie ich użytkowania w elektroenergetyce, ze względu na ówczesny stan technologii materiałowych, były to ograniczniki iskiernikowe z rezystorami zmiennopoporowymi wytwarzanymi na bazie węgla krzemu SiC [1, 2]. Obecnie, w powszechnym użyciu są ograniczniki beziskiernikowe, z warystorami tlenkowymi, których początek stosowania przypada na wczesne lata 70. ubiegłego wieku [3-5]. Ich przewaga nad poprzednikami wynika ze znakomych parametrów użytkowych, związanych z nieporównanie większą nieliniowością charakterystyk napięciowo-prądowych. Warystory tlenkowe są wytwarzane na bazie polikrystalicznej, spiekanej ceramiki tlenkowej ZnO z niewielkimi, procentowymi dodatkami innych tlenków (bizmutu, magnezu, kobaltu, chromu). Dodatki te wraz z odpowiednio dobranymi parametrami procesu technologicznego produkcji warystorów pozwalają optymalizować ich właściwości eksploatacyjne, w szczególności poprzez kształtowanie charakterystyk napięciowo-prądowych [4-9]. Warystory, wykonywane najczęściej w postaci cylindrycznych dysków o różnych średnicach i grubościach są zamykane w szczelnych obudowach (rys. 1a), chroniących je przed oddziaływaniem zewnętrznych czynników środowiskowych, przede wszystkim przed penetracją wilgoci. Rozmiary geometryczne warystora są związane z zakładaną wartością prądu wyładowczego (średnica/pole powierzchni dysku), napięciem pracy (grubość dysku) oraz z jego zdolnością do pochłaniania energii (objętość dysku).

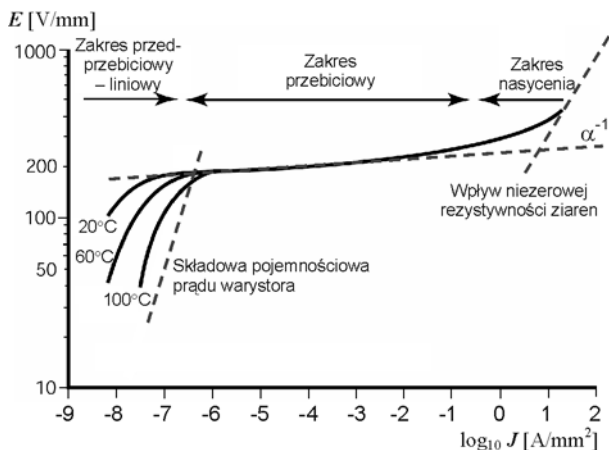
Materiał, z którego wytwarza się warystory jest odpowiednio przygotowywany – najpierw mielony i homogenizowany, a następnie prasowany i spiekany w wysokich temperaturach, wskutek czego powstaje ich polikrystaliczna struktura o unikalnych właściwościach (rys.1b). Podstawowym jej elementem są ziarna krystaliczne, które powinny cechować się odpowiednim rozmiarem, jednorodnością i niską rezystywnością [5]. Prąd płynący przez warystor jest sumą prądów cząstkowych, przepływających przez jego strukturę różnymi ścieżkami, pokonujących po drodze bardzo liczne złącza międzyziarnowe (rys.1c).



Rys.1. Niskonapięciowy, tlenkowy ogranicznik przepięć: a) budowa ogranicznika i elementy składowe, b) wewnętrzna, mikroskopowa struktura warystora, c) model struktury polikrystalicznej warystora z zaznaczonymi przykładowymi ścieżkami przepływu prądu

Mechanizm przewodzenia prądu w warystorze – czyli rezystorze o zmiennej rezystancji (ang. **variable resistor**), zależnej od napięcia do niego przyłożonego – jest złożony i ma związek ze zjawiskiem występowania barier potencjału na styku sąsiednich ziaren krystalicznych. Tego typu efekty są obiektem badań i analiz teoretycznych od połowy XX w., a wiele z nich dotyczy wyjaśnienia procesów przewodzenia prądu w strukturach warystorów cienkowych [3, 4, 9-16].

Silnie nieliniowa zależność napięcia na warystorze od płynącego przez niego prądu sprawia, że jest on stosowany jako element stabilizujący/ograniczający napięcie (rys.2).



Rys.2. Typowy kształt nieliniowej charakterystyki warystora ZnO we współrzędnych $E = f(J)$, zawierającej trzy specyficzne zakresy, determinowane odmiennymi właściwościami zjawisk fizycznych, określających procesy przewodzenia prądu elektrycznego

Analiza kształtu statycznej charakterystyki $E = f(J)$ warystora (rys. 2) pozwala na wyróżnienie w niej trzech charakterystycznych zakresów:

1. **Zakres przedprzebieciowy.** Jest to zakres małych gęstości prądu, z silnie zależnym od temperatury przewodnictwem omowym (liniowym) o ujemnym temperaturowym współczynniku rezystywności. W tym zakresie, prąd warystora przy stałym napięciu opisuje zależność:

$$(1) \quad I = I_0 \exp\left(\frac{-E_A}{kT}\right)$$

gdzie: I_0 – prąd odniesienia; E_A – energia aktywacji typowo 0,8 eV w temperaturze ok. 300 K); k – stała Boltzmanna; T – temperatura bezwzględna [K].

W tym zakresie, przy typowych temperaturach pracy, dominującą składową prądu warystora jest składowa pojemnościowa, co wynika m.in. z dużej wartości przenikalności elektrycznej względnej ϵ_r materiału, sięgającej wartości rzędu 10^3 .

2. **Zakres przebieciowy.** Najczęściej kształt statycznej charakterystyki $I(U)$ w tym zakresie jest przybliżany empirycznym wzorem potęgowym [3]:

$$(2) \quad I = k \cdot U^\alpha$$

gdzie: I – prąd płynący przez warystor, U – napięcie na warystorze, k , α – stałe, zależne nie tylko od materiału podstawowego i dodatków, ale również od parametrów procesu technologicznego produkcji warystora.

Wartość współczynnika nieliniowości α można oszacować na podstawie pomiarów dwóch różnych napięć na warystorze (U_1 , U_2) w zakresie przebieciowym, przy odpowiadających im wartościach prądów:

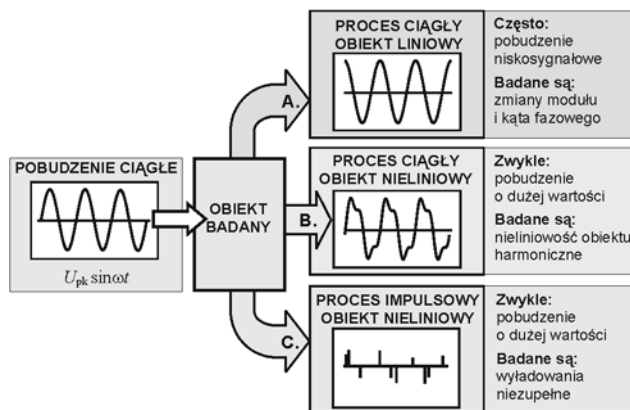
$$(3) \quad \alpha \cong \frac{\log_{10} I_2 - \log_{10} I_1}{\log_{10} U_2 - \log_{10} U_1}$$

Współczynnik ten osiąga wartości z przedziału od 10 do 100 (typowo 30 do 50 [8]). Nachylenie charakterystyki $E(J)$ (rys. 2) w zakresie przebieciowym wynosi α^{-1} .

O właściwościach warystorów w tym obszarze pracy decyduje nie tylko ich podstawowa zdolność do stabilizowania/ograniczania wartości napięcia, ale również zdolność pochłaniania dużych ilości energii, co ma istotne znaczenie dla skutecznej eliminacji przepięć pojawiających się w chronionych przez nie sieciach i układach elektroenergetycznych [2, 5, 6, 9, 17].

3. **Zakres nasycenia.** W tym zakresie uwidacznia się wpływ skończonej wartości konduktywności ziaren ZnO, które decydują o dalszym wzroście napięcia na warystorze przy rosnącej wartości prądu.

Beziskernikowe ograniczniki przepięć są od początku ich użytkowania przedmiotem licznych prac mających na celu opracowanie i wdrożenie metod oceny stanu technicznego, jak również zmierzających do doskonalenia symulacji i analiz poprawności ich działania jako urządzeń zapobiegających powstawaniu przepięć o nieakceptowanych wartościach. Efektem tych działań są m.in. normy i zalecenia techniczne publikowane przez organizacje międzynarodowe [18, 19]. Badania diagnostyczne ograniczników są prowadzone na wszystkich etapach ich technicznego życia. Bazują one na różnych metodach oceny, np. na inspekcji wizualnej, badaniach termowizyjnych, czy też na pomiarach parametrów elektrycznych, wykonywanych zarówno przy napięciach stałych, jak i przemiennych. Występujące w eksploatacji narażenia energetyczne (przepięcia) i środowiskowe (fizykochemiczne) ograniczników, prowadzą do wystąpienia przemian wewnętrznej struktury warystorów oraz różnego typu uszkodzeń zewnętrznych (np. powierzchni bocznych, osłon) [4, 18-24]. Wśród badań wykonywanych z zastosowaniem napięć AC (pobudzenie sinusoidalne, ciągle) wyróżnić można trzy podstawowe grupy badań, przedstawione na rysunku 3.



Rys.3. Odpowiedzi elektryczne obiektu (ogranicznika przepięć) na pobudzenie napięciem sinusoidalnie zmiennym (na podstawie [25])

W przypadku pobudzeń niskosygnałowych analizowane są zmiany parametrów dielektrycznych struktur warystorów, poprzez rejestrację charakterystyk impedancyjnych $Z(f)$ w zakresie napięć, w którym warystor może być traktowany jako element liniowy. Przy pobudzeniach napięciowych na poziomie napięć roboczych wskaźnikami degradacji struktur i stopnia zatarzenia warystora są wyniki analiz nieliniowości sygnałów prądowych, najczęściej poprzez określenie wartości wyższych harmonicznych prądu, przede

wszystkim trzeciej harmonicznej [18]. Ponadto, przy pobudzeniach wysokonapięciowych pewne rodzaje defektów ograniczników ujawniają swoją obecność poprzez występujące wówczas wyładowania niezupełne, specyficzne dla warunków, dla których przekroczone zostają krytyczne wartości natężenia pola elektrycznego.

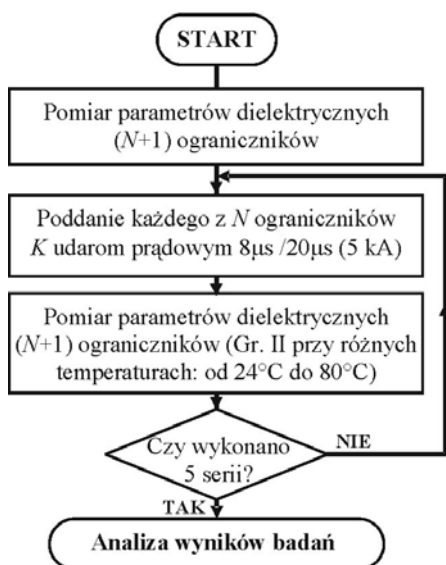
W dalszej części artykułu przedstawione zostaną wyniki badań eksperymentalnych, wykonanych dla zbioru niskonapięciowych ograniczników tlenkowych. Ich parametry dielektryczne były określane metodą spektroskopii impedancyjnej podczas procedury starzenia struktur warystorów seriami udarów prądowych, podobnie jak to opisano w publikacji [26]. Podczas tych badań pomiary parametrów wykonywano jednak dla różnych temperatur ograniczników, uwzględniając dzięki temu wspólny wpływ narażeń starzeniowych oraz temperatury na uzyskiwane wyniki.

Opis obiektów, procedury i metod pomiarowych stosowanych podczas badań eksperymentalnych

Badaniom poddano trzy typy niskonapięciowych ograniczników przepięć (Tabela 1), podzielonych na dwie grupy, w pierwszej po 5 sztuk z każdego typu, a w drugiej po 4. Jeden ogranicznik z każdego typu w grupie nie był poddawany narażeniom udarowym, a pozostałe narażano udarami prądowymi zgodnie z diagramem z rysunku 4.

Tabela 1. Wybrane parametry badanych ograniczników

Parametr	Typy ograniczników		
	280	440	660
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 ($1 \cdot$ udar $8\mu s / 20\mu s$; I_{max}) W_{max} [J]	1800	3000	4000
Liczba badanych ograniczników	Gr. I (4+1) / Gr. II (3+1)		



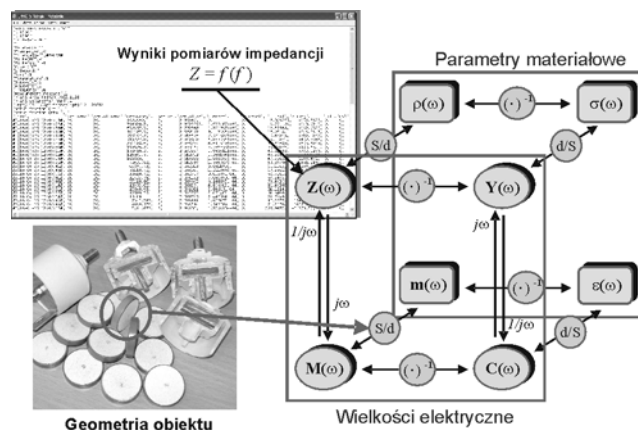
Rys.4. Algorytm realizacji zaplanowanej procedury badania niskonapięciowych ograniczników przepięć

Ograniczniki niepoddawane działaniu narażeń służyły jako obiekty referencyjne podczas pomiarów i analiz parametrów dielektrycznych w kolejnych cyklach badań. Całość programu eksperymentalnego zrealizowano na stanowiskach badawczych w Laboratorium Wysokich Napięć Katedry Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH w Krakowie. Impulsowymi narażeniami energetycznymi struktur warystorów były udary prądowe $8\mu s / 20\mu s$ (5 kA) wytwarzane przez generator udarów prądowych. Rejestrowano przebiegi prądów i napięcia i na tej podstawie określano energie udarów, pochłaniane przez warystory.

Dla wyznaczenia parametrów dielektrycznych warystorów w różnych temperaturach przygotowano stanowisko wyposażone w komorę termiczną z wysokonapięciowymi przepustami teflonowymi oraz system Solartron 1260+1296, umożliwiający wyznaczanie charakterystyk impedancyjnych warystorów w szerokim zakresie częstotliwości (w badaniach realizowano pomiary w zakresie od 10^3 Hz do 10^6 Hz) (rys.5). Dla każdego ogranicznika z grupy II wykonano pomiary w czterech różnych temperaturach: otoczenia ($24^\circ C$), $40^\circ C$, $60^\circ C$ i $80^\circ C$. Danymi pierwotnymi, uzyskiwanymi z systemu pomiarowego Solartron 1260+1296 były szerokopasmowe charakterystyki impedancji (10 punktów pomiarowych na dekadę częstotliwości), przetwarzane następnie na inne wielkości elektryczne oraz materiałowe parametry dielektryczne badanych warystorów (rys.6).



Rys.5. Konfiguracja stanowiska do pomiaru parametrów dielektrycznych ograniczników przepięć: 1) system do szerokopasmowych pomiarów impedancyjnych Solartron 1260+1296; 2) komora termiczna; 3) komputer z programem sterującym pomiarami; 4) obiekt badany (ogranicznik przepięć) umieszczony wewnątrz komory termicznej z przepustami izolacyjnymi

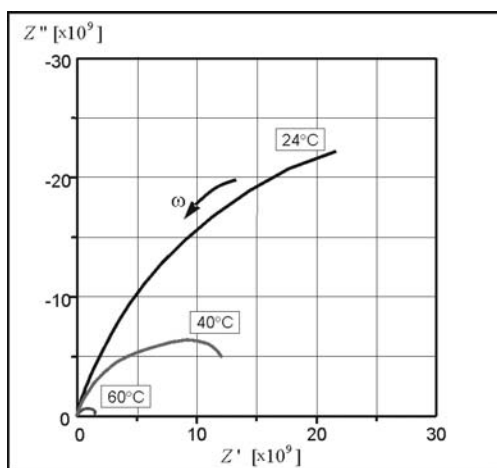


Rys.6. Struktura wzajemnych zależności pomiędzy pierwotnymi, impedancyjnymi danymi pomiarowymi i geometrią badanych warystorów, a wyznaczanymi wielkościami elektrycznymi i materiałowymi parametrami dielektrycznymi (na podstawie [27])

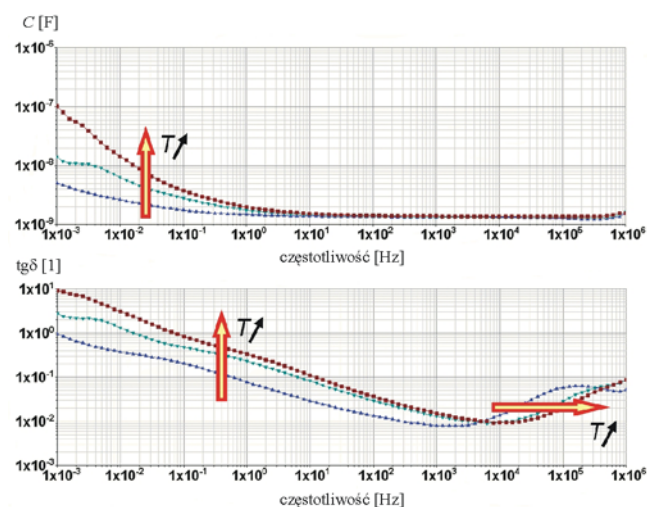
Wyniki badań laboratoryjnych

Wykonane badania wpływu temperatury oraz kontrolowanych narażeń energetycznych, związanych z poddaniem warystorów oddziaływaniu udarów prądowych o wartościach odpowiadających ich znamionowemu prądowi wyładowczemu, uwiadcniają zmiany charakterystyk szerokopasmowych rejestrowanych wielkości elektrycznych oraz parametrów materiałowych. Na rysunkach od 7 do 9 przedstawiono wybrane charakterystyki szerokopasmowe pokazujące typowe ich zmiany, spowodowane działaniem temperatury oraz przemian wewnątrzstrukturalnych powstałych w efekcie udarowych narażeń energetycznych.

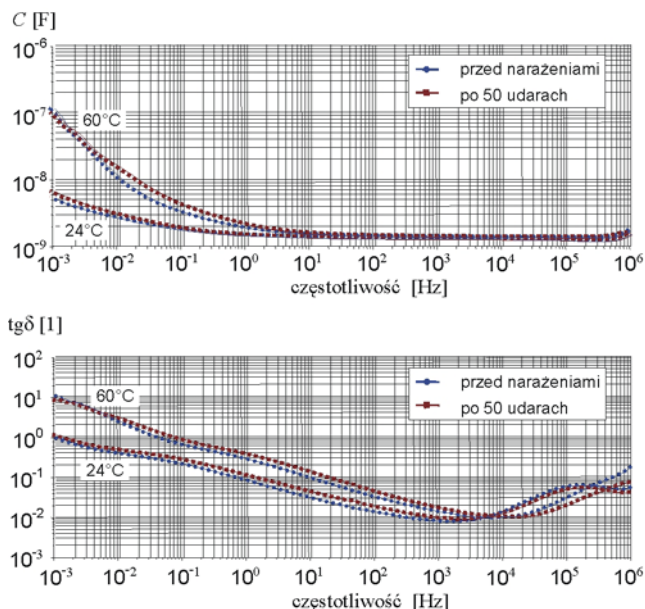
Dla interpretacji zmian charakterystyk warystorów, wyznaczanych przy zastosowaniu spektroskopii impedancyjnej/dielektrycznej stosowane są różne metody analizy, m.in. bazujące na analizie topologii i wartości elementów ich schematów zastępczych [25-34]. Przykłady tego typu schematów zastępczych warystorów tlenkowych przedstawiono na rysunku 10. Trzeba zaznaczyć, że wszystkie one reprezentują modele liniowe, inaczej niżeli schematy tworzone w celu wykonania analizy wielkosygnałowej, charakterystycznej dla potrzeb ochrony przeciwprzebiegowej i koordynacji izolacji [2, 35, 36].



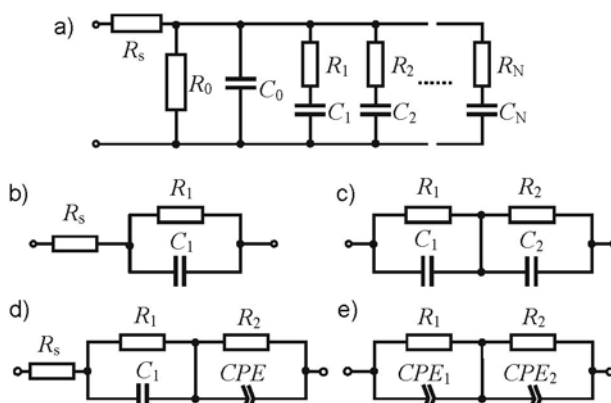
Rys. 7. Wpływ temperatury na impedancję niepoddanego działaniu narażeń udarowych warystora jednego z badanych ograniczników przepięć typu 440, przedstawioną na płaszczyźnie Cole-Cole



Rys. 8. Wpływ temperatury (24°C, 40°C, 60°C) na szerokopasmowe charakterystyki modułu zespolonej pojemności C oraz współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ jednego z ograniczników przepięć typu 440, niepoddanego działaniu narażeń udarowych



Rys. 9. Wpływ temperatury na szerokopasmowe charakterystyki modułu zespolonej pojemności C oraz współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ jednego z ograniczników przepięć typu 440, podanego działaniu narażeń udarowych (ch-ki ogranicznika przed i po 5 cyklach narażeń, każdy z 10 udarami prądowymi 5 kA)



Rys. 10. Wybrane niskosygnałowe schematy zastępcze warystorów tlenkowych: a) model wg [31, 32], b) model ziarna i warstwy granicznej wg [29], c) model dwuwarstwowy wg [34] (Maxwella-Wagnera), d) model z pojedynczym elementem CPE wg [26], e) model z dwoma elementami CPE wg [33]

We wcześniejszych badaniach autorów [26] wskazano, że dla analizy zmian kształtu szerokopasmowych charakterystyk współczynnika strat powodowanych zmianami strukturalnymi korzystne jest stosowanie podczas modelowania schematów zastępczych elementów typu CPE (ang. Constant Phase Element), dzięki którym następuje dokładniejsze dopasowanie krzywych modelowych do rzeczywistych danych eksperymentalnych.

Wnioski i podsumowanie

Efektorem wysokoenergetycznych narażeń udarowych oddziaływujących na ograniczniki przepięć są trwałe zmiany wewnętrznej struktury warystorów, modyfikujące ich właściwości elektryczne, opisywane odpowiedzią warystorów, zarówno na pobudzenia nisko- jak i wielkosygnałowe. Podczas badań warystorów metodami spektroskopii impedancyjnej uwiadcniają się one w zmianach kształtu charakterystyk szerokopasmowych [26-28, 33, 34, 37]. Zmiany strukturalne powodują m.in. wzrost strat przewodnościowych, co w widoczny sposób ujawnia się dla zakresu bardzo niskich częstotliwości (VLF)

charakterystyki $tg\delta(f)$. Badania degradowanych warystorów ujawniły, że istotny wpływ na ich wyniki ma temperatura, której zmiany podczas pomiaru można traktować jako zaburzenie utrudniające diagnostycznie efektywne zastosowanie tej metody badań. Temperatura i starzeniowe zmiany strukturalne w identyczny sposób modyfikują analizowane charakterystyki szerokopasmowe, przy czym już niewielkie zmiany temperatury (rzędu pojedynczych stopni) dają efekt zbliżony do skutków zmian strukturalnych wywołanych licznymi udarami prądowymi.

Analizy wybranych niskosygnałowych modeli warystora pokazują [26], że korzystnym rozwiązaniem w tworzeniu jego schematów zastępczych jest stosowanie elementów CPE, pozwalających dokładniej odwzorować rzeczywiste charakterystyki częstotliwościowe strat dielektrycznych, wraz z obserwowanymi efektami ich szerokopasmowego rozproszenia. Ten kierunek badań będzie kontynuowany dla opisu zmian parametrów warystorów wywołanych synergicznym działaniem opisanych czynników.

Autorzy: dr hab. inż. Paweł Zydrón prof. n. AGH; mgr inż. Michał Bonk, mgr inż. Łukasz Fuśnik, mgr inż. Bartłomiej Szafraniak, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Kraków, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: pzydron@agh.edu.pl; bonkm@agh.edu.pl; lfusnik@agh.edu.pl; szafrani@agh.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Ashworth F., Needham W., Sillars R.W., Silicon carbide non-ohmic resistors, *J. Inst. Electr. Eng.*, 93, Part I (1946), no. 69, 385-401
- [2] Furgal J., Analiza narażeń przepięciowych izolacji transformatora chronionego iskiernikowymi i beziskiernikowymi ogranicznikami przepięć, Wyd. AGH, Seria Rozprawy i Monografie, nr 118, Kraków, 2003
- [3] Matsuoka M., Nonohmic properties of zinc oxide ceramics, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 10 (1971), no. 6, 736 – 746
- [4] Eda K., Zinc oxide varistors, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 5 (1989), no. 6, 28-41
- [5] Mielcarek W., Uwarunkowania technologiczne warystorów tlenkowych, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt nr 212, Warszawa, 2002
- [6] Gupta T.K., Application of zinc oxide varistors, *J. Am. Ceram. Soc.*, 73 (1990), no. 7, 1817-1840
- [7] 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, 320-323
- [8] Gubański A., Mielcarek W., Prociów K., Warycha J., Wróbel J., The effect of aluminium additive on the electrical properties of ZnO varistors, *Materials Science – Poland*, 27 (2009), no. 4/2, 1207-1218
- [9] Physical properties of zinc oxide varistors, ABB Power Technology Products AB, High Voltage Products, Surge Arresters, 2002
- [10] Levinson L.M., Philipp H.R., The physics of metal oxide varistors, *J. Appl. Phys.*, 46 (1975), no. 3, 1332-1341
- [11] Emtage P.R., The physics of zinc oxide varistors, *J. Appl. Phys.*, 48 (1977), no. 10, 4372-4384
- [12] Eda K., Conduction mechanism of non-ohmic zinc oxide ceramics, *J. Appl. Phys.*, 49 (1978), no. 5, 2964-2972
- [13] Mahan G.D., Levinson L.M., Philipp H.R., Theory of conduction in ZnO varistors, *J. Appl. Phys.*, 50 (1979), 2799-2812
- [14] Blatter G., Greuter F., Electrical breakdown at semiconductor grain boundaries, *Phys. Rev. B.*, 34 (1986), no. 12, 8555-8572
- [15] Levinson L.M., Philipp H.R., Sonder E., Interface effects in zinc oxide varistors, *Mat. Sci. Research*, 21 (1987), Ceramic Microstructures '86. Role of Interfaces, 665-678
- [16] Greuter F., Blatter G., Electrical properties of grain boundaries in polycrystalline compound semiconductors, *Semicond. Sci. Technol.*, 5 (1990), no. 2, 111-137
- [17] Bartkowiak M., Comber M.G., Mahan G. D., Energy handling capability of ZnO varistors, *J. Appl. Phys.*, 79 (1996), no. 11, 8629-8633
- [18] IEC International Standard 60099-5:2013 Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations, Edition 2.0, 2013-05
- [19] CIGRÉ WG A3.17, MO surge arresters stresses and test procedures, CIGRE Technical Brochure no. 544, 2013
- [20] Lundquist J., Stenström L., Schei A., Hansen B., New method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters in service, *IEEE Trans. on Power Deliv.*, 5 (1990), no. 4, 1811-1822
- [21] Papiński P., Wańkowicz J., Śmietanka H., Diagnostyka ograniczników przepięć – doświadczenia z badań eksploatacyjnych, XI Sympozjum EUI Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia, Krynica, *Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje*, (2007), nr 3, 173-176
- [22] 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*, (2011), nr 30, 51-56
- [23] Olesz M., Diagnostyka niskonapięciowych warystorowych ograniczników przepięć, *ZN Wydziału EiA Politechniki Gdańskiej*, 2012, nr 31, 113-116
- [24] Papiński P., Wańkowicz J., Niestandardowe metody badań ograniczników przepięć w eksploatacji, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 10, str. 118-120
- [25] Zydrón P., Sygnały probiercze i pomiarowe w technice wysokich napięć i diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Rozprawy i Monografie nr 233, UWND AGH, Kraków 2011
- [26] Zydrón P., Bonk M., Fuśnik Ł., Spektroskopia impedancyjna w badaniach właściwości ograniczników przepięć niskiego napięcia poddanych działaniu impulsowych narażeń energetycznych, *ZN Wydziału EiA Politechniki Gdańskiej*, (2015) nr 46, 115-118
- [27] Nitsch K., Zastosowanie spektroskopii impedancyjnej w badaniach materiałów elektronicznych, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1999
- [28] Levinson L.M., Philipp H.R., AC properties of metal-oxide varistors, *J. Appl. Phys.*, 47 (1976), no. 3, 1117-1122
- [29] Kabir M., Suzuki M., Yoshimura N., An equivalent circuit for ZnO varistors deduced from electrical characteristics of a single grain, *J. Inst. Electrostat. Jpn.*, 28 (2004), no. 6, 304-309
- [30] Yuanfang W., Xianglian Y., Xiaoyu Y., Chengke Z., Investigation into the equivalent circuit of MOV and the determination of its parameters, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 19 (2004), no. 3, 1091-1094
- [31] Saha T.K., Mardira K.P., Modeling metal oxide surge arrester for the modern polarization based diagnostics, *IEEE Trans. Dielectr. and Electr. Insul.*, 12 (2005), no. 6., 1249-1258
- [32] Bassi W., Tatizawa H., Early prediction of surge arrester failures by dielectric characterization, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 32 (2016), no. 2, 35-42
- [33] Vojisavljević K., Žunić M., Branković G., Srećković T., Electrical properties of mechanically activated zinc oxide, *Science of Sintering*, 38 (2006), 131-138
- [34] Bueno P.R., Pianaro S.A., Pereira E.C., Bulhões L., Longo E., Varela J.A., Investigation of the electrical properties of SnO₂ varistor system using impedance spectroscopy, *J. Appl. Phys.*, 84 (1998), no. 7, 3700-3705
- [35] IEEE Working Group 3.4.11, Modelling of metal oxide surge arresters, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 7 (1992), no. 1, 302-309
- [36] Pinceti P., Giannettoni M.: A simplified model for zinc oxide surge arresters, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 14 (1999), no.2, 393-397
- [37] Jaroszewski M., Pospieszna J., An assessment of ageing of oxide varistors exposed to pulse hazards using dielectric spectroscopy, Proc. 2004 IEEE ICSD, vol. 2, pp. 727-730, Toulouse, France, 2004