

Piotr PAPLIŃSKI¹, Jacek WAŃKOWICZ¹, Przemysław RANACHOWSKI², Zbigniew RANACHOWSKI²

Instytut Energetyki Instytut Badawczy ul. Mory 8, 01-330 Warszawa (1)
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN (IPPT PAN) ul. Pawińskiego 5b, 02-106 Warszawa (2)

doi:10.15199/48.2018.10.01

Doświadczenia z eksploatacji wysokonapięciowych liczników zadziałań oraz badania degradacji mikrostruktury pochodzących z nich warystorów ZnO

Streszczenie. W pracy przedstawione zostały doświadczenia z eksploatacji liczników zadziałań, które stanowiły inspirację do badań pochodzących z nich warystorów ZnO. Badana była mikrostruktura elementów pochodzących z uszkodzonych liczników zadziałań. Odniesienie stanowił analogiczny warystor, z licznika który nie był w eksploatacji. Badania wykazały nietypowy skład fazowy tworzywa badanych warystorów oraz niską jednorodność i spójność ich czerepu. Opisano i udokumentowano procesy degradacji tworzywa o zróżnicowanym nasileniu. Wykazano szkodliwy wpływ wilgoci we wnętrzu rozszczelnionego licznika zadziałań na jego funkcjonowanie, w tym na umieszczone w nim warystory ZnO. Przedstawiono ponadto wnioski dotyczące kontroli eksploatacyjnej liczników zadziałań.

Abstract. The paper presents experience from exploitation of surge arrester counters. There was documented destructive influence of humidity inside the untight surge arrester counter on its operation and ZnO varistors within. There were presented examinations of microstructure of varistors of damaged surge arrester counters. A point of reference was similar ZnO varistor, not subjected to operation before. Investigations revealed that material of varistors had an untypical phase composition and was characterized by unsatisfying homogeneity and cohesion. There were recognized and described the subsequent stages of the degradation processes of varistors material. Conclusions resulting from the operation checking of surge arrester counters were also presented. **Experience from exploitation of surge arrester counters**

Słowa kluczowe: licznik zadziałań, warystory ZnO, mikrostruktura ceramiki ZnO, degradacja materiału ceramicznego.
Keywords: surge arrester counter, ZnO varistors, microstructure of ZnO ceramics, ceramic material degradation.

WSTĘP

Licznik zadziałań jest urządzeniem energetycznym dostosowanym do współpracy z odgromnikiem lub ogranicznikiem przepięć. Dynamiczny rozwój energoelektroniki i metrologii umożliwił wprowadzenie do eksploatacji szeregu rozwiązań liczników zadziałań, łączących ze sobą dotychczasową ich cechę – zliczanie impulsów prądów (liczby zadziałań), z jednoczesną możliwością odczytu prądu przepływającego przez odgromnik lub ogranicznik w czasie jego pracy [1, 2]. Odrębną grupę liczników zadziałań stanowią urządzenia wyposażone w przetworniki pomiarowe, z których sygnał jest wyprowadzany za pomocą złącza połączonego galwanicznie z analizatorem prądu upływu [3]. Najnowszą grupę liczników zadziałań stanowią liczniki pomiarowe, z których sygnał wyprowadzony jest łączem teletransmisyjnym do sensora odbiorczego usytuowanego na zewnątrz licznika zadziałań [4]. Przedmiotem niniejszej pracy są jednak tylko liczniki zadziałań aktualnie znajdujące się w eksploatacji, w których do obwodów zliczających i pomiarowych zastosowano warystory ZnO. Podejście to wynikało z nabytych doświadczeń przy ocenie efektów starzeniowych warystorów ZnO, pochodzących z beziskiernikowych ograniczników przepięć [5, 6].

Liczniki zadziałań zostały wprowadzone do eksploatacji niemal równocześnie z odgromnikami - ogranicznikami przepięć. W eksploatacji, górny zacisk licznika zadziałań łączono z dolnym zaciskiem ogranicznika przepięć, natomiast dolny zacisk licznika połączony był „w najkrótszy sposób” z uziemieniem stacji. By jednak możliwe były pomiary prądu płynącego przez licznik zadziałań,

niezbędne jest umieszczenie ogranicznika przepięć na podstawie izolacyjnej - rysunek 1.



Rys.1 Widok ogranicznika przepięć 220 kV, wraz z podstawą izolacyjną i licznikiem zadziałań w połowie wysokości konstrukcji wsporczej

W początkowym okresie wprowadzania liczników do eksploatacji, funkcja tych urządzeń sprowadzała się jedynie

do zliczania liczby zadziałań współpracującego z nim odgromnika lub ogranicznika przepięć. Początkowo konstrukcja mechaniczna i elektroniczna licznika była mało skomplikowana i obejmowała przede wszystkim metalowe elementy sprężynujące oraz sekcje warystorów wykonanych z węgla krzemowego (SiC). Rozwiązania konstrukcyjne ulegały wielokrotnym modernizacjom i przez długi czas nie opracowano żadnych dokumentów normalizacyjnych, ujmujących wymagania stawiane licznikom zadziałań. W związku z tym, przy konstruowaniu co raz to nowszych wersji liczników opierano się przede wszystkim na dokumencie opracowanym przez producenta tych liczników (warunki odbioru technicznego). Uwzględniano w nim przede wszystkim wytrzymałość części elektronicznej urządzenia na działanie udarów piorunowych i łączeniowych, przy których badano odgromniki lub ograniczniki przepięć. Zwracano także uwagę na rozwiązania mechaniczne obudowy licznika oraz rodzaj zastosowanego w nim liczydła elektromagnetycznego, zasilanego pośrednio poprzez warystory.

Zagadnienia związane ze szczelnością liczników zadziałań były traktowane przez producentów bardzo ogólnikowo. Uważano bowiem, że poprawny montaż elementów wewnątrz liczników, wraz z zastosowanymi uszczelnkami, jest wystarczający do zapewnienia ich szczelności. Jednak po demontażu liczników będących w eksploatacji ponad 10 lat - i ich otwarciu stwierdzano, że zapewnienia producentów urządzeń, co do szczelności liczników nie zawsze odpowiadają oczekiwaniom. Badania laboratoryjne zdementowanych liczników zadziałań i oględziny ich elementów wewnętrznych, zarówno elektrycznych, jak i mechanicznych, wykazywały często obecność wilgoci i związanej z nią korozji elementów metalowych. Stwierdzono, że wilgoć wnikała do wnętrza liczników wzdłuż izolatora górnego zacisku, w miejscu uszczelnienia liczydła oraz wskutek niezbyt dokładnego uszczelnienia wizjera liczydła - rysunek 2.



Rys.2 Wewnętrzne zawilgocenie wizjera liczydła w nieszczelnym liczniku zadziałań

Zjawisko nieszczelności licznika można zaobserwować w czasie jego oględzin, zwłaszcza wykonywanych w okresie wiosennym lub jesiennym. Wówczas, szczególnie w godzinach porannych, powietrze ma wysoką wilgotność. W przypadku utraty szczelności urządzenia, w jego wnętrzu - na wizjerze - widoczne są ślady wilgoci w postaci kropelek wody. W ciągu dnia, w miarę wzrostu temperatury, kropelki wody osadzają się na wewnętrznych elementach metalowych licznika - powodując ślady korozji oraz na warystorach, których właściwości zmienneoporowe ulegają pogorszeniu. W związku z tym, ocenę szczelności liczników w warunkach eksploatacyjnych zaleca się wykonywać w godzinach porannych, przy wilgotności powietrza powyżej 80%.

Nieszczelność jest bardzo niekorzystna przede wszystkim dla urządzeń będących w eksploatacji ponad 10 lat. Jednak zdarzały się przypadki, że utrata szczelności licznika zadziałań występowała już po czasie o połowę krótszym. Wilgoć osadza się na elementach dociskowych warystorów, które stanowią najczęściej metalowe blachy i

sprężyny. Z upływem czasu powoduje to utratę ich sprężystości i w konsekwencji prowadzi do powstania przerwy elektrycznej. Wówczas liczydło licznika nie wykazuje liczby zadziałań, a potencjał dolnego zacisku ogranicznika jest zbliżony do potencjału jego górnego zacisku. Efekt ten jest bardzo niebezpieczny dla personelu stacji, gdyż może prowadzić do porażenia w chwili dotknięcia do obudowy licznika zadziałań.

Jak wspomniano wcześniej, w wyniku utraty szczelności zawilgoceniu ulegają także warystory, których właściwości zmienneoporowe pogarszają się w wyniku postępującej ich degradacji. W konsekwencji zmienia się próg zadziałania licznika - najczęściej podniesieniu ulega próg reakcji liczydła. Najbardziej niekorzystnym efektem nieprzewidywalnej pracy licznika może być utrata ciągłości elektrycznej pomiędzy jego górnym a dolnym zaciskiem. Dzieje się tak podobnie jak w przypadku korozji metalowych elementów sprężynujących.

Liczniki zadziałań, z uwagi na swoją konstrukcję, ulegają rozszczelnieniu w trakcie eksploatacji znacznie częściej niż współpracujące z nimi ograniczniki przepięć [7]. Uszkodzenie licznika zadziałań podczas normalnej eksploatacji obwodu ogranicznik - licznik zadziałań, jest w praktyce bardzo trudne do stwierdzenia, podczas rutynowego obchodu stacji elektroenergetycznej dokonywanego przez personel. Uszkodzenie objawia się, bowiem zazwyczaj jedynie brakiem zmian liczby zadziałań. Wynika to z cech obwodów - zliczającego i pomiarowego licznika zadziałań. Zniszczenie licznika, z jednoczesnym jego rozerwaniem, występuje najczęściej w chwili uszkodzenia ogranicznika przepięć, któremu towarzyszy detonacja i rozerwanie ogranicznika. Wnętrza zniszczonych liczników zadziałań przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys.3 Wnętrze zniszczonego licznika warystorowego



Rys.4 Wnętrze zniszczonego licznika ferroelektrycznego

Nie istnieją normy dotyczące tylko liczników zadziałań, które systematyzowałyby zasady ich konstrukcji oraz wymagania elektryczne i mechaniczne. Uszkodzenia – w tym warystorów - które wiążą się z utratą szczelności liczników zadziałań, stanowią o randze problemów, z jakimi muszą się mierzyć projektanci nowych rozwiązań konstrukcyjnych.

Efekty starzenia elektrycznego, silnie zaznaczające się zwłaszcza w warystorach starszej generacji, wynikają nie tylko z długotrwałego obciążenia napięciem roboczym, lecz również z działania impulsów prądowych (impulse degradation) [8]. Wieloletnie badania, w tym obserwacje efektu elektroluminescencji dowiodły, że przepływ prądu przez warystory ma najczęściej charakter ścieżkowy – występują wyraźnie zaznaczone kanały przepływu [9]. Jest to konsekwencją różnic w konduktywności - niejednorodności w mikrostrukturze materiału warystorów. Poczynając od składu pierwiastkowego, budowy oraz właściwości warstw międzyziarnowych i punktów potrójnych, po wielkość i rozłożenie przestrzenne ziarn i wydzielen różnorodnych faz. Kanały przepływu łączą się - tworząc gorące punkty - zwłaszcza w miejscach, gdzie występują klastry większych ziarn. Tam też kumulacji ulegają i tak silne naprężenia o charakterze termomechanicznym [9].

Efekty degradacji są konsekwencją licznych zadziałań, a w szczególności - nieszczelności ograniczników przepięć lub liczników zadziałań. Prowadzą one do przepływu silnych prądów zwarciovych i po pewnym czasie awarii. Przy okazji badań procesów starzenia, jakie mają miejsce w tworzywie warystorów w czasie ich wieloletniej eksploatacji - w ramach niniejszej pracy - podjęto badania warystorów pochodzących z eksploatowanych liczników zadziałań. Reprezentowały one zróżnicowany stopień degradacji materiału ceramicznego.

Próbki warystorów i procedura badań

Badaniom poddano cztery warystory ZnO wiodącego producenta, pochodzące z liczników zadziałań. Warystor referencyjny pochodził z licznika, który przeznaczony był do montażu w sieci i przedstawiony został na rysunku 5, z zaznaczeniem obszaru, z którego pobrana została próbka do badań. Kolejne dwa warystory – oznaczone 1 i 2 – pracowały na sąsiednich fazach i nosiły jedynie ograniczone ślady uszkodzeń, w postaci wypalanej ścieżki na bocznej powierzchni. Ostatni warystor, oznaczony 3, był silnie okopcony w następstwie pożaru. Pochodził on z licznika zadziałań, który uległ zniszczeniu. Był też zainstalowany na tej samej fazie, gdzie po kilku latach eksploatacji doszło do awarii ogranicznika przepięć.



Rys.5 Warystor referencyjny - pochodzący z licznika zadziałań, który nie był w eksploatacji. Na powierzchni czołowej zaznaczono na dole obszar, z którego wycięta została przeznaczona do badań kształtka

Na rysunku 6 przedstawiono warystor oznaczony 1, posiadający ślady uszkodzeń w postaci ścieżki, wypalanej w warstwie ochronnej na bocznej powierzchni. Rysunek 7 przedstawia warystor oznaczony 3, ze zniszczonego licznika zadziałań.

Przeprowadzone badania wszystkich czterech warystorów ZnO obejmowały ocenę podstawowych parametrów struktury. Dotyczyły one jednorodności materiału w skali mikro- i pół-makro, badano wielkość ziarn w czerepie oraz ilość i jednorodność rozłożenia faz domieszkujących – jasnych agregatów Bi_2O_3 oraz wydzielen spinelowych $\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$.



Rys.6 Warystor oznaczony 1, na bocznej powierzchni widoczna jest ścieżka wypalona w materiale osłony



Rys.7 Warystor oznaczony 3, pochodzący ze zniszczonego licznika zadziałań. Zwracają uwagę osady na powierzchni czołowej

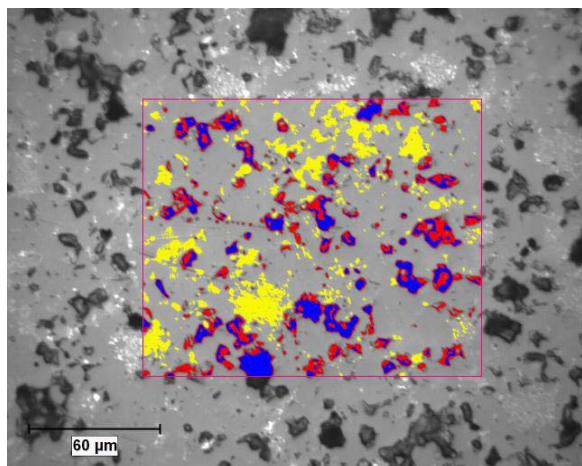
Ze wszystkich czterech warystorów wycięto kształtki do badań mikroskopowych w kształcie prostopadłościanów o boku 6 x 6 mm i długości równej grubości elementów. W przypadku warystorów oznaczonych 1 i 2 próbki zawierały obszary bezpośredniego nadpalenia w postaci ścieżki widocznej na ich bocznej powierzchni. Kształtki odcinane były z warystorów piłą z nasypem diamentowym o granulacji 30 μm , a następnie cięte przy pomocy piły drutowej z proszkiem roboczym o granulacji 10 μm , w zawieszynie olejowej. Tak przygotowane próbki inkludowano w żywicy epoksydowej, a następnie szlifowano na papierze ściernym SiC o granulacji 800, usuwając warstwę o grubości około 1 mm. Proces polerowania odbywał się na pastach diamentowych o wielkości ziarn 10 μm i 5 μm , do usunięcia warstwy o grubości około 150 μm . Finalne polerowanie prowadzono na pastach diamentowych o uziarnieniu 1 μm .

W badaniach prowadzonych metodą mikroskopii optycznej (MO) wykorzystywano mikroskop wyposażony w komputerowy analizator obrazu firmy CLEMEX. Obrazy mikrostruktury przedstawiono przy najwyższym dostępnym powiększeniu - 500 razy. Najczęściej wykorzystywany był kontrast interferencyjno-fazowy Nomarskiego. Wówczas, w zależności od orientacji przestrzennej granic, oświetlenia

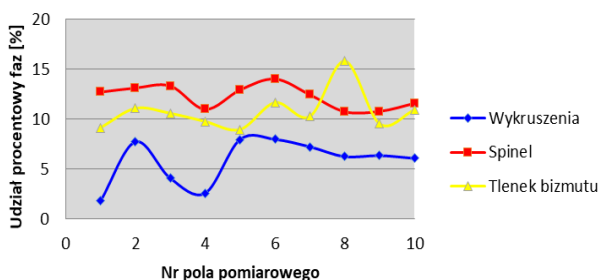
oraz zagłębienia w wierzchniej warstwie wykonanego zglądu, ziarna oraz ich agregaty wykazują różne odcienie szarości. Stąd, część ciemnych obszarów na obrazach zglądów - nie odwzorowuje w rzeczywistości wykruszeń, lecz obecne w mikrostrukturze, ale zagłębione ziarna, ich agregaty oraz wydzielenia o zróżnicowanym ułożeniu przestrzennym.

Badania mikroskopowe warystorów

Oględziny zglądów wykazały niezadowalającą jednorodność materiału w skali mikro- i pół-makro. Niejednorodności dotyczyły w szczególności rozłożenia przestrzennego i wielkości wydzieleni dobrze widocznej, jasnej fazy domieszkującej Bi_2O_3 , jak również obszarów wykruszeń, które związane były w szczególności z fazą spinelową.



Rys.8 Typowy widok mikrostruktury warystora referencyjnego. Na środkowej części obrazu została nałożona barwna maska binarna, obrazująca agregaty jasnej fazy domieszkującej Bi_2O_3 – kolor żółty oraz spinelową fazę domieszkującą – kolor czerwony. Obszary wykruszonych elementów mikrostruktury i nielicznych porów - w kolorze granatowym - obejmują około 6% powierzchni. Szare tło stanowi osnowa ZnO



Rys.9 Procentowy udział poszczególnych faz w próbce referencyjnej, w 10 polach obserwacyjnych. Wartości średnie wynoszą: wykruszenia i pory – 5,8%; spinel nie wykruszony – 12,3%. Zawartość fazy spinelowej w strukturze wyjściowej wynosiła 17 - 18%, przyjmując porowatość na poziomie ułamka procenta. Tlenek bizmutu zajmuje średnio 10,8% powierzchni

Po dokonaniu analizy zdjęć z mikroskopu optycznego przy pomocy komputerowego analizatora obrazu CLEMEX, odpowiednim przeformatowaniu i obróbce programem Photo Paint-Corel, można wyróżnić kolejne fazy szarości w obrazach mikrostruktury analizowanych warystorów – rysunek 8. Fazę zabarwioną kolorem niebieskim stanowią wykruszenia ziarn z osnowy ZnO oraz bardzo nieliczne pory. Fazę, oznaczoną kolorem żółtym, stanowią wydzielenia - agregaty tlenku bizmutu. Jest to najważniejsza faza domieszkująca w warystorach ZnO. Kolejną fazę domieszkującą – spinelową ($\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$) –

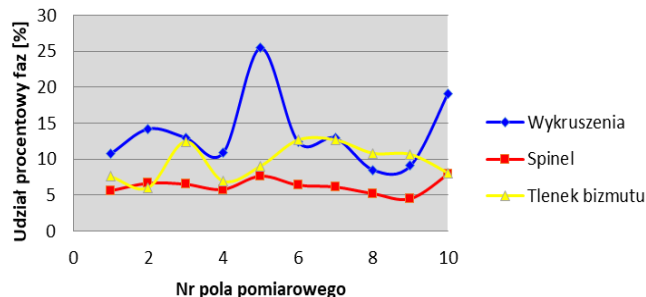
oznaczono kolorem czerwonym. Szare tło stanowi osnowa ZnO. Ze względu na dużą zawartość faz domieszkujących, matryca ZnO stanowiła jedynie około 70% objętościowych czerepu. Najczęściej domieszki stanowią tylko kilka procent materiału i warystory zawierają ponad 90% ZnO [8, 10]. Maski binarne, których przykład pokazano na rysunku 8, pozwalają na ilościową ocenę poszczególnych faz budujących materiał warystorów.

Na rysunku 9 przedstawiono procentowe udziały badanych faz w 10 polach obserwacyjnych próbki warystora referencyjnego.

Obserwowana mikrostruktura wykazywała niedostateczną spoiwość. Widoczne były dosyć liczne wykruszenia - czarne obszary o wielkości najczęściej od kilku do kilkunastu mikrometrów. Wyłupania były związane z obecnością kruchej i słabej mechanicznie fazy spinelowej. Pojedyncze ziarna spinelu posiadały kanciasty, wieloboczny kształt. Mniejsze nie przekraczały $1\ \mu\text{m}$, jednak zwykle miały wielkość kilku mikrometrów i były mniejsze niż ziarna matrycy ZnO. Wykruszenia obejmowały najczęściej grupy ziarn i wraz z bardzo nielicznymi, drobnymi porami stanowiły średnio 5,8% (od 2 do 8%) powierzchni. Faza spinelowa obecna była w nadspodziewanie dużej ilości. Pozostała w mikrostrukturze – nie wykruszona jej zawartość obejmowała średnio 12,3% (od 11 do 14%) powierzchni. Wyjściową zawartość spinelu w czerepie ocenić można na 17-18%. Jednak niemal 1/3 tej fazy uległa wykruszeniu w czasie przygotowywania zglądów. Mimo, iż zastosowano specjalną, delikatną procedurę polerowania próbek, zainkludowanych wcześniej w żywicy epoksydowej.

Podstawową fazą domieszkującą w warystorowych tworzywach tlenkowych jest Bi_2O_3 . W badanych próbkach wydzielenia tlenku bizmutu rozłożone były wyjątkowo niejednorodnie. Miały też mocno zróżnicowany kształt i wielkość. Uśredniona zawartość Bi_2O_3 wynosiła 10,8% (od 8 do 16%). Podkreślić należy, że w typowych tworzywach warystorowych zawartość Bi_2O_3 stanowi około $1 \div 3\%$ [8, 10].

Mikrostruktura materiału, zarówno w skali mikro-, jak i pół-makro, może być oceniona niekorzystnie - jako niedostatecznie zwarta i homogeniczna. Niejednorodność może świadczyć o niedostatecznym wymieszaniu proszkowych składników masy, jeszcze przed etapem jej ciśnieniowego formowania i następnie spiekania. Kruchość fazy spinelowej oraz jej duże skupiska, sugerują również nieoptymalny dobór warunków spiekania – jak temperatura, czas, atmosfera i ich pochodne. Niemniej, mikrotwardość materiału referencyjnego pozostawała na średnim poziomie i wynosiła $\text{HV}1 = 141,6 \pm 3,6$.



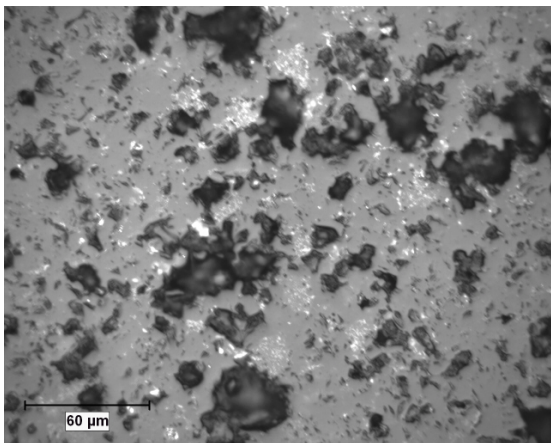
Rys.10 Procentowy udział poszczególnych faz w materiale próbek oznaczonych 1 i 2 w 10 polach obserwacyjnych obu kształtek. Wartości średnie wynoszą: wykruszenia i pory – 13,6%; spinel niewykruszony – 6,3% oraz tlenek bizmutu – 10,8% powierzchni

Próbki z warystorów oznaczonych 1 i 2 zawierały materiał z obszarów bezpośredniego nadpalenia w postaci ścieżki widocznej na ich bocznej powierzchni, jak również z

niece oddalonej strefy. Stopień degradacji materiału w obu próbkach miał ogólnie podobny - podkrytyczny stopień zaawansowania. Występowało przy tym jednak znaczne zróżnicowanie parametrów mikrostruktury, w zależności od pola obserwacji. Było to konsekwencją zarówno niedostatecznej jednorodności badanego materiału, jak i efektów degradacji. Zawartość poszczególnych faz w różnych polach pomiarowych zmieniała się w dosyć szerokich granicach – rysunek 10.

Jedynie pozostała w mikrostrukturze (nie wykruszona) część fazy spinelowej była dosyć jednorodnie rozłożona, podobnie jak w materiale odniesienia - rysunek 9. Jednak jej zawartość o połowę spadła, przy ponad dwukrotnym wzroście ilości wykruszonych elementów mikrostruktury. Natomiast uśredniona zawartość Bi_2O_3 , mimo znacznego rozrzutu, pozostała na takim samym poziomie jak w próbce odniesienia - średnio około 11%. Był on zatem obecny w stosunkowo bardzo wysokiej ilości, choć przy niejednorodnym rozłożeniu. Na rysunku 11 przedstawiono typową mikrostrukturę próbki oznaczonej 1 w strefie lekko oddalonej od wypalanej ścieżki.

W materiale próbek 1 i 2, zwłaszcza w sąsiedztwie ścieżki wypalanej na powierzchni walcowej, doszło do znaczącego poluzowania mikrostruktury materiału, która i tak nie należała do zwartych, spoiстых i jednorodnych. Ilość ubytków – wykruszeń, obserwowanych na zglądach, wzrosła do szerokiego zakresu $8 \div 25\%$ powierzchni - średnio 13,6% - rysunek 10. Pod wpływem przepływu prądu zwarciovego i naprężeń termo-mechanicznych wyseparowaniu z mikrostruktury uległa dalsza część fazy spinelowej. Z pierwotnej jej ilości na poziomie 17-18%, pozostała w przybliżeniu 1/3 – średnio 6,3%. Niewielki udział w wykruszonych elementach mikrostruktury - w granicach 2% - miały również ziarna ZnO . W niektórych obszarach słabo widoczne były mikropęknięcia obrzeżne wokół grup lub nawet pojedynczych ziarn ZnO , które jednak nie uległy wykruszeniu z matrycy. Mikrotwardość tworzywa uległa przy tym znacznemu obniżeniu, poważnie wzrósł za to rozrzut tego ważnego parametru - $\text{HV1} = 99,3 \pm 8,1$.

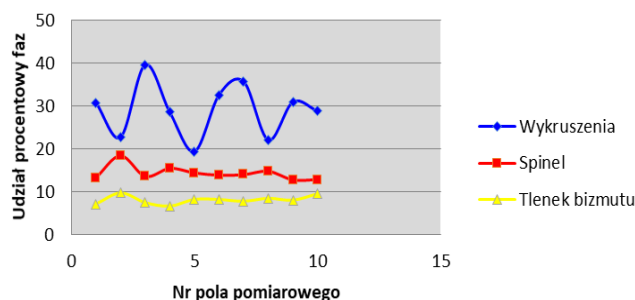


Rys.11 Obraz mikrostruktury próbki oznaczonej 1 około 1cm od wypalanej ścieżki. Wykruszenia elementów mikrostruktury stanowią 11% powierzchni

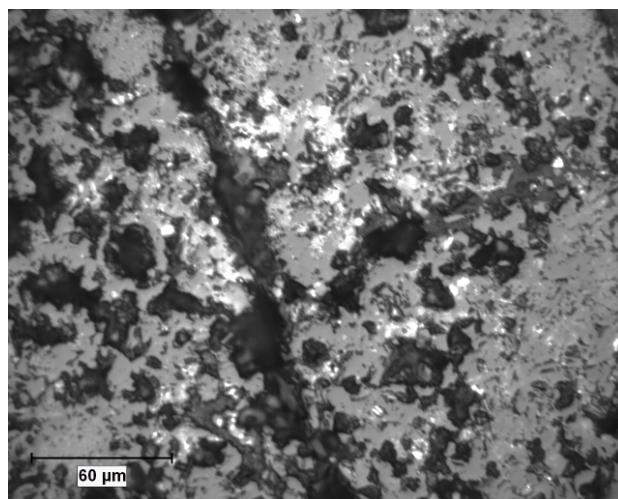
Warystor oznaczony 3 był silnie okopcony i nosił ślady pożaru. Był on wymontowany ze zniszczonego licznika zadziałania, który był zainstalowany na fазie, gdzie po kilku latach eksploatacji doszło do awarii ogranicznika przepięć. W próbce oznaczonej 3 spodziewano się zatem silnie zaawansowanej degradacji tworzywa, w konsekwencji działania skojarzonych efektów elektrycznych, termicznych i mechanicznych.

Zgodnie z przewidywaniami, stopień degradacji materiału w próbce mógł być określony jako mocno zaawansowany podkrytyczny i bliski stanu krytycznego. Widoczne było silne poluzowanie i osłabienie mechaniczne tworzywa, którego już wyjściowa zwartość i spoiścność była niewysoka. Występowało przy tym zróżnicowanie parametrów mikrostruktury w zależności od pola obserwacji. W szczególności pola obszarów wykruszonych elementów czerepu zmieniały się w szerokich granicach – rysunek 12. Wynikało to i z niedostatecznej jednorodności badanego materiału i z silnego działania naprężeń o charakterze termo-mechanicznym.

Pozostała w mikrostrukturze część fazy spinelowej była dosyć jednorodnie rozłożona, podobnie jak w materiale pozostałych próbek - rysunki 9 i 10. Jednak wbrew oczekiwaniom, jego zawartość nie tylko nie uległa dalszej redukcji, lecz była wyższa nawet niż w materiale referencyjnym (około 12%). W próbce oznaczonej 3 faza spinelowa stanowiła od niecałych 12% do około 19%, przy średniej wartości równej 14,4%. Zatem z pierwotnej zawartości spinelu, wynoszącej 17-18%, wykruszeniu uległo jedynie około 3%. Możliwym wytłumaczeniem tego dosyć zaskakującego efektu jest znacząca poprawa powiązania ziarn spinelu między sobą oraz z ziarnami osnowy ZnO w wyniku stopienia i wtórnej rekryystalizacji. Mogło dojść do tego w wyniku silnego wzrostu temperatury przy przepływie prądu zwarciovego i w wyniku pożaru.



Rys.12 Procentowy udział poszczególnych faz w materiale próbki oznaczonej 3, w 10 polach obserwacyjnych. Wartości średnie wynoszą: wykruszenia i pory – 29,1%; spinel niewykruszony – 14,4% oraz tlenek bizmutu – 8,2% powierzchni



Rys.13 Pęknięcie w mikrostrukturze warystora oznaczonego 3. Jego inicjacja nastąpiła w miejscu większej koncentracji faz domieszujących – jasnego Bi_2O_3 oraz ciemniejszego spinelu

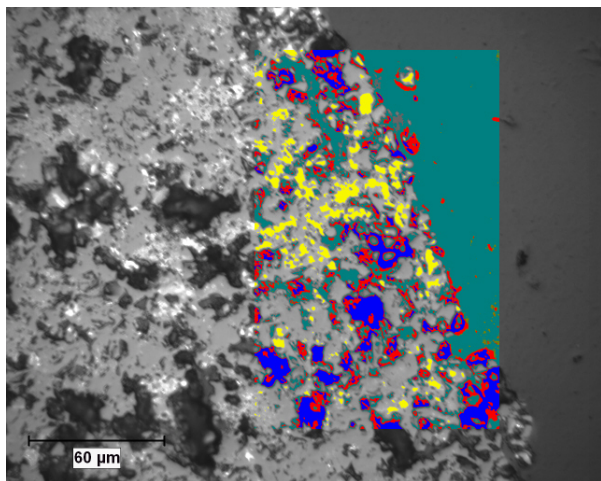
Tlenek bizmutu, który zarówno w materiale referencyjnym, jak i w strukturze próbek oznaczonych 1 i 2 stanowił prawie 11%, wciąż licznie obserwowany był w badanych zglądach i zajmował około 8%.

Duże osłabienie zwartości oraz poluzowanie mikrostruktury materiału jest dobrze widoczne na rysunkach 13 i 14. Ilość ubytków – wykruszeń, obserwowanych na zglądach, wzrosła z wyjściowego poziomu około 6% i średnio niecałych 14% w próbkach oznaczonych 1 i 2 do szerokiego zakresu $19 \div 40\%$ powierzchni. Średnio ubytki stanowiły 29,1%. Zatem niemal 1/3 materiału, pod wpływem działania silnych naprężeń o charakterze termomechanicznym, uległa wyseparowaniu z mikrostruktury i wykruszeniu przy polerowaniu zglądów. Co istotne, ubytek faz domieszkujących - Bi_2O_3 i spinelu był jednak niewielki - odpowiednio około 2,5% i 3%. Silnej degradacji uległa przede wszystkim matryca ZnO . Wykruszone jej ziarna stanowiły średnio około 24% z pierwotnej zawartości około 70% objętościowych czerepu.

Innym efektem daleko posuniętej degradacji, już o krytycznym charakterze, były pęknięcia – rysunek 13. Obserwacja ich przebiegu dowodzi, że powstały i propagowały się w miejscach, gdzie znajdowały się duże wydzielenia faz domieszkujących - Bi_2O_3 oraz spinelu.

Wysoka temperatura spowodowała stopienie metalizacji (warstwy stykowej) na czołowej powierzchni warystora oznaczonego 3. Mikrostruktura w warstwie granicznej uległa przy tym tak dalekiemu osłabieniu i poluzowaniu, że powstały głębokie szczeliny, przez które żywica wnikała w głąb próbki. Głębokość silnie spękanej warstwy przy powierzchni czołowej warystora sięgała $80 \mu\text{m}$ – rysunek 14.

Mikrotwardość materiału warystora oznaczonego 3, zgodnie z oczekiwaniami, uległa dalszemu obniżeniu w stosunku do parametrów wyjściowych i wynosiła $\text{HV1} = 79,0 \pm 7,4$.



Rys.14 Obraz mikrostruktury granicznego obszaru czerepu warystora oznaczonego 3 przy powierzchni czołowej. Warstwa metalizacji uległa stopieniu. Po prawej stronie widoczna jest szara żywica epoksydowa, w której inkludowana była próbka. Barwna maska binarna, nałożona na część obrazu, obrazuje fazy domieszkujące - jasne agregaty Bi_2O_3 – kolor żółty, spinelową – kolor czerwony oraz obszary wykruszonych elementów mikrostruktury i nielicznych porów - w kolorze granatowym. Szare tło stanowi osnowa ZnO . Zaznaczona kolorem turkusowym żywica wnika w głąb próbki

Podsumowanie

Doświadczenia eksploatacyjne dowiodły, że podczas awarii odgromnika lub ogranicznika przepięć, zniszczeniu ulega również współpracujący z nim licznik zadziałających.

Następuje wówczas zniszczenie liczydła, elementów elektronicznych oraz współpracujących z nimi warystorów, które pośrednio pełnią funkcję ich zasilania. Niemniej, najczęstszą przyczyną uszkodzeń liczników podczas eksploatacji jest ich rozszczelnienie. Wynika ono najczęściej z rozwiązań konstrukcyjnych liczników od strony wysokiego napięcia. Stwierdzono, że wilgoć wnika do wnętrza liczników wzdłuż izolatora górnego zacisku, w miejscu uszczelnienia liczydła oraz wskutek niezbyt dokładnego uszczelnienia wizjera liczydła. Dodatkowy problem, w odróżnieniu od ograniczników przepięć, stanowi nieprzestrzeganie reżimu parametrów warystorów, przy ich doborze do liczników zadziałających.

Powyższe obserwacje wskazują na potrzebę przeprowadzania badań diagnostycznych liczników zadziałających co najmniej w cyklach czasowych przewidzianych dla ograniczników przepięć. Badania powinny obejmować oględziny wizjera licznika, prawidłowość działania liczydła - przy zastosowaniu generatora udarów prądowych - oraz sprawdzenie zachowania ciągłości przepływu prądu przez licznik.

Niespełnienie warunku szczelności może w konsekwencji doprowadzić do pojawienia się potencjału na górnym zacisku licznika. Stwarza to niebezpieczeństwo porażenia obsługi stacji z chwilą dotknięcia do jego obudowy. Z chwilą utraty szczelności przez licznik zadziałających, proces degradacji warystorów, które są w nim zamontowane, przebiega dużo szybciej. Wynika to z braku możliwości odprowadzenia wilgoci z wnętrza licznika. Tym bardziej, że z reguły jest on umieszczony w zacienieniu poniżej ogranicznika przepięć.

Pod kątem efektów degradacji materiału badane były cztery warystory ZnO , pochodzące z liczników zadziałających. Pierwszy, nieeksploatowany warystor, stanowił element referencyjny. Warystor oznaczony 3, o najniższym stopniu degradacji, pochodził z licznika, który uległ zniszczeniu wskutek przepływu prądu zwarciowego. Pracował on na tej samej fazie, gdzie doszło do awarii ogranicznika przepięć. Pozostałe dwa – oznaczone 1 i 2 – pracowały na sąsiednich fazach i wykazywały ograniczone ślady uszkodzeń - w postaci ścieżki wypalonej na ich bocznej powierzchni.

Badane warystory miały nietypową budowę fazową czerepu - ze stosunkowo bardzo wysoką zawartością faz domieszkujących. Prawdopodobnie wynikało to z ich zastosowania – w licznikach zadziałających, a nie w ogranicznikach przepięć. Tlenek bizmutu stanowił około 11%, spinel ($\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$) pierwotnie ok. 18%, lecz 1/3 uległa wykruszeniu. Stąd matryca ZnO zajmowała jedynie około 70% objętościowych czerepu. W typowych tworzywach warystorowych domieszki stanowią tylko kilka procent materiału i czerep zawiera ponad 90% ZnO . Przy tym struktura badanego tworzywa, zarówno w skali mikro-, jak i pół-makro, może być oceniona niekorzystnie - jako niedostatecznie zwarta i jednorodna. Niejednorodność może świadczyć o niedostatecznym wymieszaniu proszkowych składników masy, jeszcze przed etapem jej ciśnieniowego formowania i następnie spiekania. Kruchość fazy spinelowej oraz jej duże skupiska, sugerują również nieoptymalny dobór warunków spiekania, jak temperatura, czas, atmosfera i ich pochodne.

Stopień degradacji tworzywa próbek oznaczonych 1 i 2 miał ogólnie podobny - podkrytyczny stopień zaawansowania, jednak przy znacznym zróżnicowaniu parametrów mikrostruktury w zależności od pola obserwacji. Wyseparowaniu z poluzowanej mikrostruktury próbek uległa dalsza część fazy spinelowej. Z pierwotnej jej ilości pozostała w przybliżeniu 1/3 – około 6%. Ilość ubytków – wykruszeń, obserwowanych na zglądach,

wzrosła ponad dwukrotnie – do poziomu kilkunastu procent. Jednak tlenek bizmutu pozostawał dobrze powiązany z matrycą ZnO i jego ilość nie uległa obniżeniu.

Stopień degradacji materiału w nadpalonej próbce oznaczonej 3 był podkrytyczny, lecz bliski już stanu krytycznego. Zaobserwowano pęknięcia, które rozwijały się w miejscach, gdzie znajdowały się duże wydzielienia faz domieszkujących. W wyniku przepływu silnego prądu zwarcowego i pożaru, mikrostruktura w warstwach granicznych uległa tak dalekiemu osłabieniu i poluzowaniu, że powstały głębokie szczeliny na powierzchni warystora. Ilość ubytków – wykruszeń wzrosła do szerokiego zakresu. Stanowiły one średnio około 30% powierzchni. Ubytek Bi₂O₃ i fazy spinelowej był jednak niewielki (około 2,5% oraz 3%). Silnej degradacji uległa przede wszystkim matryca ZnO. Wykruszone jej ziarna stanowiły około 1/4 pierwotnej zawartości. Natomiast zawartość fazy spinelowej nie tylko nie uległa dalszej redukcji, lecz była wyższa nawet niż w materiale referencyjnym. Było to zaskakujące. Prawdopodobnie doszło do efektu stopienia i wtórnej rekrytalizacji. W wyniku tego nastąpiła znaczna poprawa powiązania ziarn spinelu pomiędzy sobą oraz z ziarnami osnowy ZnO. W przypadku tlenku bizmutu potwierdzono, obserwowane także w innych tworzywach warystorowych, jego dobre powiązanie z matrycą ZnO i odporność na pękanie i wyseparowanie z mikrostruktury.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Jacek Wańkiewicz, Instytut Energetyki Instytut Badawczy ul. Mory 8, 01-330 Warszawa,

e-mail: jacek.wankowicz@ien.com.pl;

mgr inż. Piotr Papliński, Instytut Energetyki Instytut Badawczy ul. Mory 8, 01-330 Warszawa,

e-mail: piotr.paplinski@ien.com.pl;

dr hab. Przemysław Ranachowski, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN (IPPT PAN), ul. Pawińskiego 5b, 02-106 Warszawa, E-mail: pranach@ippt.pan.pl;

dr hab. Zbigniew Ranachowski, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN (IPPT PAN), ul. Pawińskiego 5b, 02-106 Warszawa, E-mail: zranach@ippt.pan.pl.

LITERATURA

- [1] Licznik zadziałań typu i 3EX5 050 firmy Siemens. Instrukcja obsługi Nr 1198/RSJ, Berlin 1998 r.
- [2] Licznik zadziałań typu SC 13 firmy Bowthroe EMP Limited. Instrukcja obsługi. Nr 066/1, Brighton 1994 r.
- [3] Licznik zadziałań typu GLX. Karta katalogowa GLX/06/00, „ZWAR” S.A. Zakład Produkcyjny Z - 4, Przasnysz 1998 r.
- [4] Licznik zadziałań typu EXCOUNT-I. Karta Katalogowa ABB Ludvika, kwiecień 2008 r.
- [5] Raport z oceny stanu technicznego uszkodzonego beziskiernikowego ogranicznika przepięć typu 3EQ 4 336-3PP42-4TZ-1, nr fabryczny K/35227949 firmy Siemens rok prod. 2013 zdemontowanego z pola nr 5 EIk tor 2 w SE 400 kV Łomża Systemowa. Opracowanie IEn –lb, luty/marzec 2016 r.
- [6] Ekspertyza z rewizji beziskiernikowego ogranicznika przepięć typu VARISIL HI firmy Tridelta Parafoudres S.A. Opracowanie IEn –lb, grudzień 2016 r.
- [7] Papliński P., Ranachowski P., Badania powierzchni elementów wewnętrznych ograniczników przepięć, Przegląd Elektrotechniczny, 5a, 2012, 73-76.
- [8] Levinson L.M., editor, Advances in Varistor Technology, Ceramic Transactions, 3 (Am. Ceram. Soc.) 1989.
- [9] S. Boggs, J. Kuang, H. Andoh, S. Nishiwaki; Electro-thermal-mechanical computations in ZnO arrester elements, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15 (1), 2000, 128-134.
- [10] Papliński P., Ranachowski P., Mikrostruktura i stopień degradacji warystorów ZnO z eksploatacji w badaniach mikroskopowych, Przegląd Elektrotechniczny, Vol.92, No.10, 2016, 120-125.