

Ocena jakości mikrostruktury warystora poprzez pomiar wyższych harmonicznych w prądzie

Streszczenie. Celem prezentowanej pracy było znalezienie zależności pomiędzy parametrami mikrostruktury warystorów, a prądem płynącym przez ogranicznik przepięć dla różnych poziomów napięcia. Badania zostały wykonane na losowo wybranej populacji beziskiernikowych ograniczników przepięć w osłonach polimerowych, przeznaczonych do pracy w sieci średniego napięcia. Wykonano pomiary przebiegów referencyjnych dla badanej populacji ograniczników. Przyjęto jako kryterium oceny udział wyższych harmonicznych w przebiegu prądu. Praca stanowi wstęp do szerszego zakresu badań, prowadzonych w ramach wspólnych działań laboratoriów Instytutu Energetyki i Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN.

Abstract. The purpose of the presented work was to find the relationship between the varistor's microstructure parameters and the current flowing through the surge arrester for different voltage levels. The tests were performed on a randomly selected population of non-spark surge arresters in polymeric shields intended for operation in medium voltage networks. The reference waveforms were measured for the tested population. Higher harmonics participation in the current wave was assumed as the evaluation criterion. The work is an introduction to a wider range of research carried out as part of joint activities of the laboratories of the Institute of Power Engineering and the Institute of Fundamental Technological Research PAN. (**Evaluation of the varistor's microstructure quality by measuring higher harmonics in the current**).

Słowa kluczowe: beziskiernikowy ogranicznik przepięć, warystor ZnO, mikrostruktura ceramiki, analiza FFT.

Keywords: surge arrester, ZnO varistor, ceramic microstructure, FFT analysis.

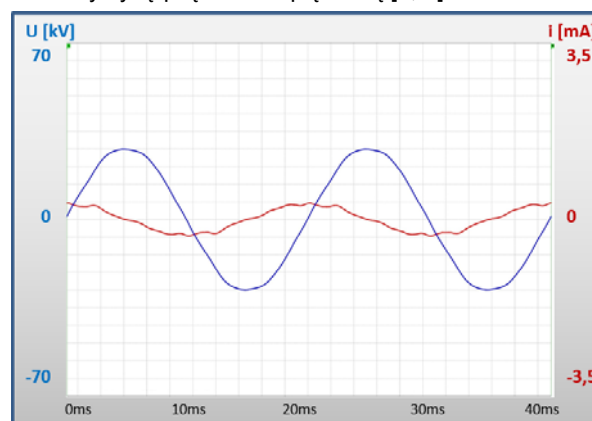
Wstęp

Ograniczniki przepięć są powszechnie stosowane w sieciach elektrycznych na wszystkich poziomach napięć, dla zapewnienia koordynacji izolacji. Ich celem jest ochrona sieci oraz urządzeń w niej pracujących przed przepięciami atmosferycznymi i łączeniowymi. Od ponad dwudziestu lat w modernizowanych i nowobudowanych stacjach energetycznych, w miejsce dotychczas stosowanych ograniczników iskiernikowych, instaluje się ograniczniki beziskiernikowe. Wynika to z prostoty ich konstrukcji, większej niezawodności oraz stosunkowo małych prądów upływowych warystorów ZnO. Pierwsze ograniczniki beziskiernikowe, stosowane w kraju, miały osłony porcelanowe. Natomiast obecnie wykonuje się takie ograniczniki prawie wyłącznie w osłonach polimerowych. Znaczenie mają tutaj zarówno problemy bezpieczeństwa podczas awarii ogranicznika, jak też aspekt ekonomiczny. Awarie elementów wewnętrznych ograniczników iskiernikowych wymusiły opracowanie wielu metod diagnostycznych i wskaźników do ujawniania osłabienia właściwości izolacyjnych lub uszkodzenia ograniczników, w celu określenia czy diagnozowany ogranicznik nadaje się do dalszej eksploatacji. Wadą takich metod diagnostycznych było to, że mogły być prowadzone jedynie w trybie „off line”, czyli po odłączeniu ogranicznika od systemu. Podobne instrukcje oraz metody badań diagnostycznych opracowuje się do badań ograniczników typu beziskiernikowego [1-5]. Instytut Energetyki od wielu lat wykonuje nie tylko badania typu [6], ale też badania diagnostyczne ograniczników przepięć (iskiernikowych i beziskiernikowych) wysokiego napięcia (110 – 400 kV) opatentowaną, własną metodą „on line” - to znaczy podczas ich eksploatacji [7].

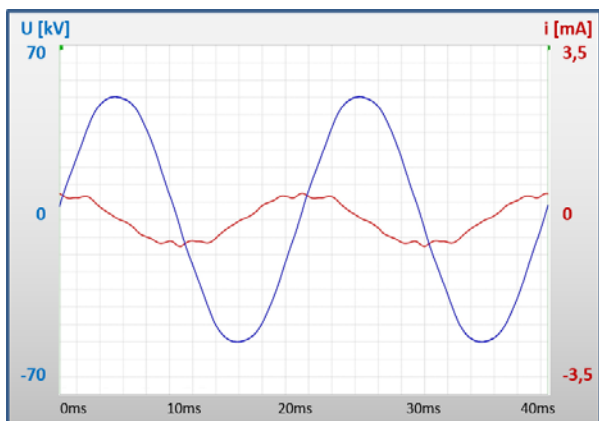
Prąd upływowy ogranicznika przepięć, płynący przez ogranicznik po podłączeniu napięcia, może być wykorzystywany do oceny stopnia jego zużycia. Degradacja ogranicznika objawia się poprzez zmianę jego charakterystyki prądowo-napięciowej. Dotyczy to zarówno zakresu przedprzebiciowego - dla prądów mniejszych od znamionowego prądu wyładowczego, jak też zakresu napięć powyżej napięcia długotrwałej pracy. Kryterium stabilności tych charakterystyk dla narażeń prądowych spowodowanych przez narażenia elektrotermiczne. Zmiana

charakterystyki ogranicznika w wyniku nagrzania struktury może mieć charakter odwracalny [8]. Dla ogranicznika nowego i niezdegradowanego prąd upływowy przy napięciu znamionowym sieci ma charakter sinusoidalny o dominującej składowej pojemnościowej (rys.1). Wraz ze wzrostem napięcia, jak też przy uszkodzeniu ogranicznika, silnie wzrasta udział składowej czynnej (rysunki 2 i 3).

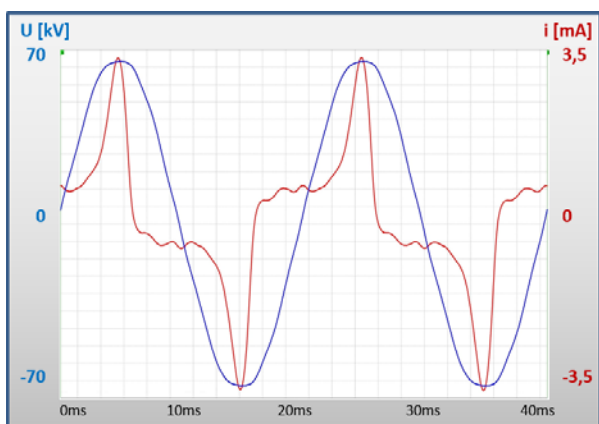
Najprostszym modelem elektrycznym ogranicznika przepięć jest układ równolegle połączonych elementów - pojemnościowego i nieliniowej rezystancji. Dla ograniczników przepięć wyższych napięć, gdzie stosuje się stopy szeregowo i równolegle łączonych warystorów, model ogranicznika uwzględniający pasożytnicze pojemności doziemne może być przedstawiony jak na rysunku 4. Istnieje też wiele innych modeli, które pozwalają precyzyjnie dopasować charakterystykę ogranicznika w okresie przedprzebiciowym. Przeważnie dopasowanie to uzyskuje się poprzez szeregowo i/lub równoległe dołączanie gałęzi zawierających elementy pojemnościowe, rezystancyjne oraz indukcyjne w celu uwzględnienia wpływu rezystancji cząstkowych, indukcyjności doprowadzeń, temperatury i częstotliwości na charakterystykę prądowo-napięciową [8, 9].



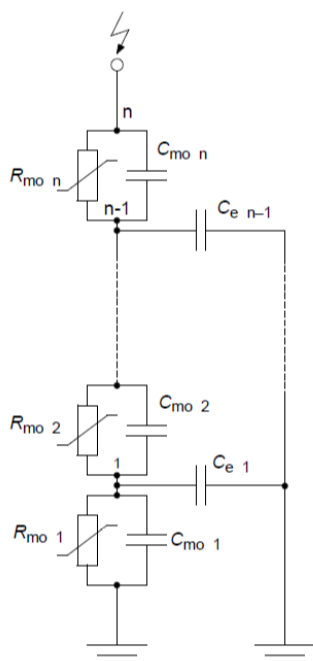
Rys.1. Przebiegi prądu upływowego i napięcia na ograniczniku pod napięciem trwałej pracy ogranicznika



Rys.2. Przebiegi prądu upływowego i napięcia na ograniczniku pod napięciem znamionowym



Rys.3. Przebiegi prądu upływowego i napięcia na ograniczniku pod napięciem referencyjnym



Rys.4. Uproszczony wielostopniowy schemat zastępczy ogranicznika, gdzie: R_{mo} - zależna od napięcia rezystancja pojedynczego warystora, C_{mo} - pojemność warystora, C_e - pojemność ziemna warystora, n - liczba warystorów

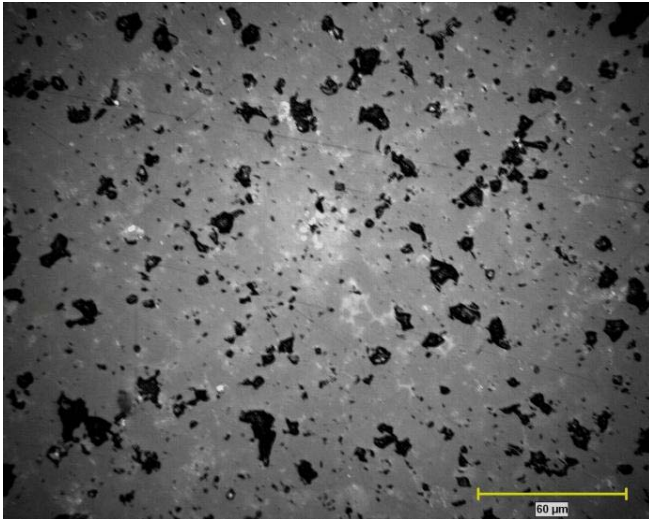
Badanie mikrostruktury warystorów

Metodą mikroskopii optycznej (MO) oraz skaningowej (SEM) przeprowadzono badania trzech wybranych warystorów ZnO z ogranicznika przepięć SN. Obejmowały one ocenę najważniejszych parametrów ich mikrostruktury. Dotyczyło to przede wszystkim jednorodności materiału w skali mikro- i pół-makro. Badana była wielkość ziaren ZnO w czerepie oraz ilość i jednorodność rozłożenia faz domieszkujących – jasnych agregatów Bi_2O_3 oraz ziaren spinelu. Oceniana była zwartość i stopień wypalenia czerepu, zespolenie ziaren i agregatów oraz ich odporność na wykruszanie w czasie wykonywania zglądów powierzchni. Badano ilość, wielkość i rozłożenie wykruszonych elementów mikrostruktury oraz porów, które były jednak bardzo nieliczne. Ponadto, by dokonać nie budzącej wątpliwości identyfikacji poszczególnych faz, zwłaszcza spinelu, konieczne było wykorzystanie techniki mikroanalizy rentgenowskiej SEM/EDS. Metodą tą także zidentyfikowano domieszki tworzywa. Parametry mikrostruktury trzech badanych warystorów były porównywane aby ocenić powtarzalność procesów technologicznych producenta. Wykonane badania mają w założeniu stanowić punkt wyjścia do badań mikrostruktury analogicznych warystorów, które uległy procesom starzenia w wyniku narażeń prądowych, napięciowych i termicznych ograniczników przepięć.

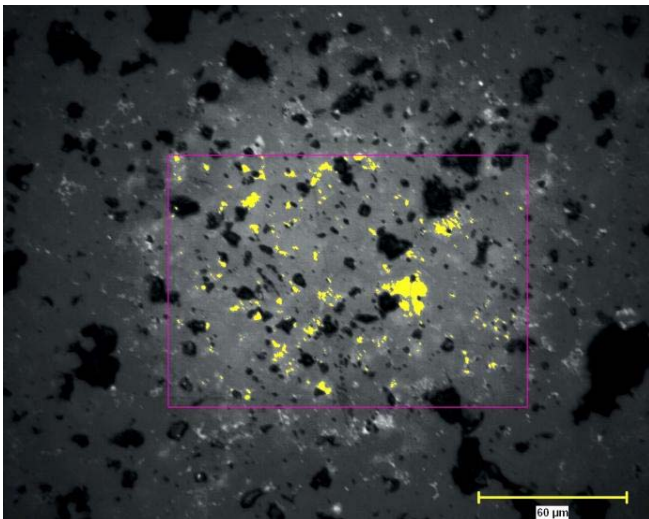
Z centralnego obszaru trzech badanych warystorów wycięto kształtki przeznaczone do badań mikroskopowych. Odcięte próbki miały kształt prostopadłościanów o bokach podstawy 5×5 mm i wysokości równej grubości warystorów tj. 25 mm. Jedną z bocznych powierzchni każdej z wyciętych kształtek szlifowano i polerowano do uzyskania zglądów badawczych. Umożliwiło to badanie zmian parametrów mikrostruktury tworzywa wzdłuż grubości warystorów. Przeznaczone do badań kształtki odcinane były z warystorów w specjalny - delikatny sposób - precyzyjną piłą z nasypem diamentowym o granulacji $20 \mu m$. Wycięte z warystorów próbki inkludowano w żywicy epoksydowej, a następnie szlifowano, usuwając warstwę o grubości około 1 mm. Proces polerowania odbywał się na specjalnych pastach diamentowych. Usuwno w ten sposób kolejną warstwę o grubości około $150 \mu m$. Finalne polerowanie prowadzono na pastach diamentowych o uziarnieniu $1 \mu m$.

W badaniach prowadzonych metodą mikroskopii optycznej (MO) wykorzystywano mikroskop wyposażony w komputerowy analizator obrazu firmy CLEMEX. Oględziny prowadzono głównie przy powiększeniu 500 razy. W takich też powiększeniach przedstawione zostały obrazy mikrostruktury (rys. 5 i 6). Najczęściej wykorzystywany był kontrast interferencyjno-fazowy Nomarskiego, który pozwala na dobre wyróżnienie faz budujących materiał, jak również porów i wgłębień pozostałych po wykruszonych elementach mikrostruktury. Wadą tego typu kontrastu jest słabsze uwidocznienie granic poszczególnych ziaren i wydzielań.

Badane tworzywo warystorów wykazuje typową dla materiałów tlenkowych ZnO ziarnistą mikrostrukturę, w której poza główną fazą, dobrze widoczne są faza tlenku bizmutu (Bi_2O_3) oraz wgłębienia po wykruszonych ziarnach i ich zgrupowaniach. Niekiedy większe ziarna bywają otoczone przez grupy mniejszych ziaren, często o gorszej spoiowości. Zdarza się, że w trakcie operacji szlifowania i polerowania zawiesinami o granulacji zbliżonej do wielkości ziaren budujących czerep, obszary o geometrii ziaren i wydzielań zbliżonej do cząstek czynnika polerskiego, ulegają deformacji. Mają wówczas postać wgłębień.



Rys. 5. Obraz mikrostruktury warystora, na środku długości próbki, w powiększeniu 500 razy. Widoczne są czarne pola wykruszeń fragmentów mikrostruktury, ciemniejsze - szare obszary zagłębień w powierzchni zglądu oraz jasne wydzielenia fazy tlenku bizmutu



Rys. 6. Obraz mikrostruktury warystora, na środku długości próbki, w powiększeniu 500 razy. Na środkowej części obrazu widoczna jest nałożona barwna maska binarna. Obrazuje ona w kolorze żółtym agregaty jasnej fazy domieszkującej Bi_2O_3

Mikroskopia optyczna odznacza się ograniczoną głębią ostrości. W konsekwencji, zdeformowane polerowaniem obszary drobnoziarnistej mikrostruktury ceramicznej są wyraźnie ciemniejsze. Niezależnie od tego, ziarna oraz ich agregaty wykazują różne odcienie szarości. W konsekwencji, część ciemnych obszarów na obrazach zglądów, szczególnie w kontraście Nomarskiego, w rzeczywistości nie odwzorowuje wykruszeń, lecz obecne w mikrostrukturze zagłębione ziarna, ich agregaty oraz wydzielenia o zróżnicowanym ułożeniu przestrzennym. Rzeczywista powierzchnia zajmowana przez wykruszone z mikrostruktury jej elementy jest zatem nieco mniejsza niż wartość rejestrowana przy wykorzystaniu komputerowej analizy obrazu.

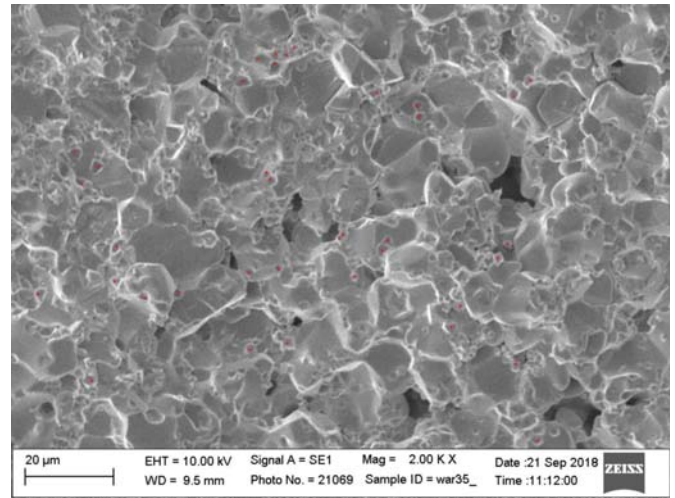
Obok badań mikroskopowych, wykonano również pomiary mikrotwardości tworzywa próbek. Stanowiły one istotne uzupełnienie wyników optycznej metody badań materiału. Umożliwiły też niezależną ocenę jednorodności i spistości tworzywa warystorowego. Pomiary wykonano metodą Vickersa, przy użyciu typowego

mikrotwardościomierza, ze standardowym – 1 kG obciążeniem węgelnika. Podkreślić należy, że obok uzyskanych wartości średnich, istotnych informacji dostarcza rozrzut wyników oraz wartości minimalne, rejestrowane w miejscach o wyraźnie słabszej – mniej zwartej i spoistej mikrostrukturze.

Stwierdzono, że obrazy mikroskopowe tworzywa wszystkich trzech próbek warystorów były bardzo do siebie podobne. Również w obrębie poszczególnych próbek zmienność parametrów mikrostruktury była niewielka i ograniczała się jedynie do nieistotnych zmian w ilości wykruszonych elementów na długości próbek, czyli grubości warystorów. Jak wykazały dokładniejsze badania, wykruszenia związane były w szczególności z zianami fazy spinelowej. Oględziny zglądów wszystkich trzech próbek wykazały ogólnie dobrą jednorodność materiału w skali mikro- i pół-makro.

W przypadku jasnych wydzielen tlenku bizmutu (Bi_2O_3) stwierdzono ogólnie dobrą jednorodność rozłożenia domieszki w objętości badanych próbek. Ilość tej najważniejszej z faz domieszkujących każdy materiał warystorowy zmieniała się dla różnych punktów pomiarowych na wysokości warystorów (długości wyciętych próbek) od 1,2 do 3,2%. Wartości średnie dla tworzywa trzech badanych próbek były przy tym bardzo zbliżone - od 2,0 do 2,4%.

Dokładne oględziny powierzchni przełamów próbek pozwoliły na ocenę rozłożenia oraz ilości fazy spinelowej. Na rysunku 7 zaznaczono na czerwono licznie występujące drobne regularne ziarna o charakterystycznym wielobocznym kształcie. Są one dosyć regularnie rozłożone w materiale badanych warystorów.



Rys.7. Obraz SEM przełamu badanego materiału warystora, w powiększeniu 2000 razy. Czerwonymi kropkami zaznaczono część widocznych ziarn spinelu. Ich wielkość z reguły nie przekracza $2,5 \mu\text{m}$ i mają charakterystyczny wieloboczny kształt z widocznymi zwykle krawędziami

Punktowa analiza EDS potwierdziła, że są to ziarna spinelu antymonowo-cynkowego ($\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$). Wielkość ziaren spinelu zawiera się w przybliżonych granicach $0,5 \div 2,5 \mu\text{m}$. Znacznie trudniej jest oszacować zawartość fazy spinelowej w tworzywie. Pamiętać bowiem należy, że ziarna spinelu z reguły tworzą wyraźnie słabsze połączenia z zianami matrycy niż w przypadku połączeń pomiędzy zianami ZnO . Stanowią też fazę najbardziej podatną na wykruszenie z materiału nie tylko w wyniku procesów degradacji, lecz także w czasie przygotowania zglądów lub przełamów [11, 12]. Łatwiej też ulegają wykruszeniu przy polerowaniu ziarna ZnO , zwłaszcza o mniejszych

wymiarach, gdy sąsiadują z ziarnami spinelu. Jak wykazały badania wykonane metodą mikroskopii optycznej – wykruszenia w zglądach próbek badanych warystorów stanowią średnio około 9% powierzchni. Największą ilościowo część (około połowy) stanowią wykruszenia elementów mikrostruktury o wielkości $0,5 \div 2,5 \mu\text{m}$. Odpowiada to wielkości ziaren spinelu, jakkolwiek część stanowią fragmenty ziaren ZnO. Ziarna spinelu obserwowane na przełamach próbek stanowią około 3%, jednak z dużym i trudnym do oceny błędem niedoszacowania. W czasie powstawania przełamu wykruszeniu uległa bowiem znaczna część ziaren spinelu. Stąd też całkowita ilość fazy spinelowej w badanych próbkach może być jedynie oszacowana na poziomie $4,5 \div 5\%$. Podobna i zazwyczaj również trudna do dokładnego oznaczenia zawartość spinelu występuje w typowych tworzywach warystorowych [13, 14].

Zmierzone wartości mikrotwardości HV1 były relatywnie bardzo wysokie – od 195 do 210 (średnio 203) i odpowiadały tworzywom warystorowym o najwyższej jakości. Rozrzut wyników był przy tym bardzo nieduży – w granicy $\pm 3,5\%$. Bardzo dobrze świadczy to o jednorodności i spoiwości tworzywa badanych warystorów. Nawet w mikroobszarach, gdzie lokalnie występował znacząco podwyższony poziom zawartości fazy domieszkującej Bi_2O_3 , spadek mikrotwardości był niewielki (do około 180).

Niezależnie od parametrów mikrostruktury, bardzo zbliżona masa wszystkich warystorów oraz brak istotniejszych różnic w ich cechach geometrycznych wskazuje na powtarzalność i dopracowanie technologii formowania oraz wypalania kształtek. Wyniki badań mikroskopowych oraz pomiarów mikrotwardości tworzywa warystorów wykazały wysoką zwartość i spoiłość mikrostruktury oraz jej dobrą jednorodność. Wskazuje to na stabilność i powtarzalność parametrów procesów technologicznych. Dobrze można ocenić ogólną jakość i bardzo pożądaną w tworzywach tej klasy wytrzymałość mechaniczną materiału warystorów.

Badania przebiegów referencyjnych

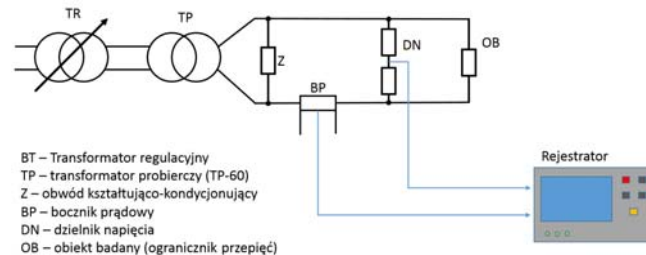
Weryfikację jakości mikrostruktury warystorów, w tym w szczególności ich jednorodności oraz prądu płynącego przez ogranicznik, dokonano poprzez pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych badanych ograniczników oraz wyznaczenie udziału wyższych harmonicznych w przebiegach prądu dla różnych poziomów napięć. Badania zostały wykonane na losowo wybranej populacji beziskiernikowych ograniczników przepięć w osłonach polimerowych, dostosowanych do pracy w sieci średniego napięcia 30 kV. Wykonano pomiary przebiegów referencyjnych dla badanej populacji ograniczników. Przyjęto jako kryterium oceny udział wyższych harmonicznych w przebiegu prądu. Badania wykonano w układzie pokazanym na rysunku 8, w którym źródłem napięcia jest transformator probierczy TP-60. Dla zapewnienia niskiej zawartości harmonicznych w napięciu wymuszającym, transformator obciążono równoległą impedancją Z, linearyzującą charakterystykę zewnętrzną transformatora. Charakterystykę prądowo-napięciową czternastu przebadanych ograniczników pokazano na rysunku 9.

Do zarejestrowanych wszystkich czternastu charakterystyk dopasowano metodą najmniejszych kwadratów krzywą aproksymacyjną o równaniu:

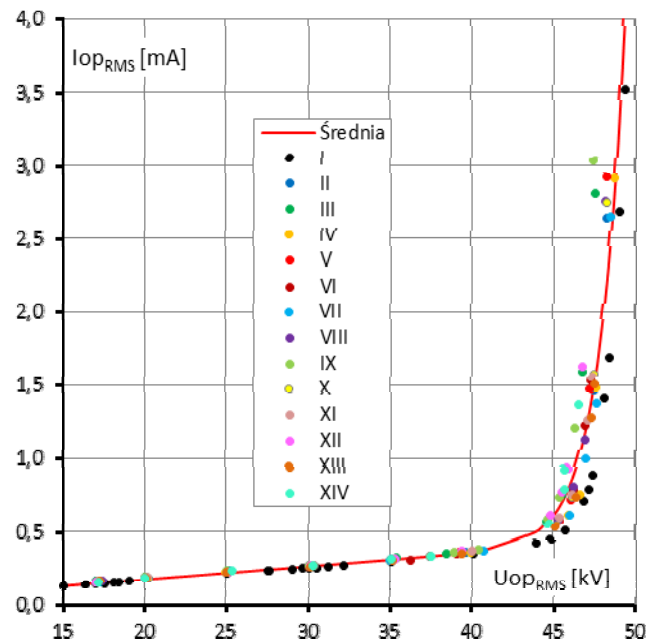
$$(1) \quad I_{op} = 0,00895 \cdot U_{op} + 3,85 \cdot 10^{-51} \cdot U_{op}^{30,1}$$

Współczynnik dopasowania, czyli kwadrat współczynnika korelacji, dla tej krzywej wynosi: $R^2=0,884$, a

suma błędów średniokwadratowych dla wszystkich punktów pomiarowych: $\Delta^2 = 9,020 \cdot 10^{-6} \text{ A}^2$.

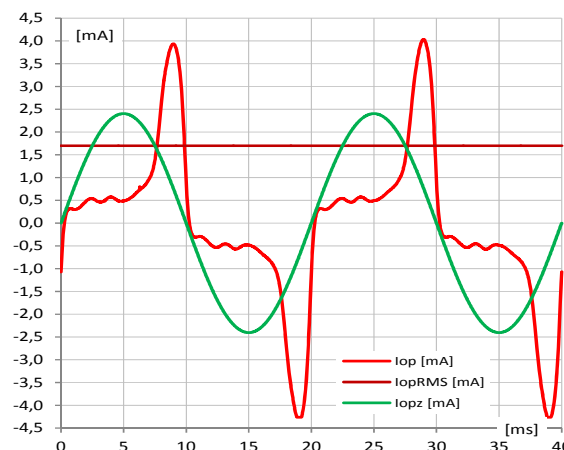


Rys.8. Schemat układu probierczego



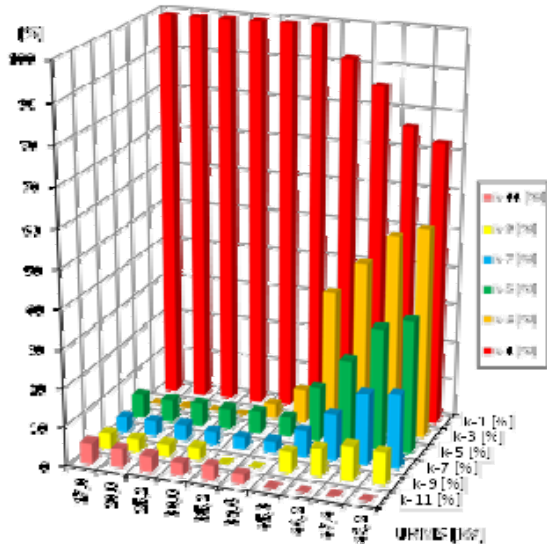
Rys. 9. Charakterystyki prądowo-napięciowe czternastu badanych ograniczników przepięć z zaznaczoną krzywą aproksymującą

Analizując udział wyższych harmonicznych w przebiegach prądów upływowych przyjęto założenie odnośnienia wartości szczytowych poszczególnych harmonicznych do wartości szczytowej zastępczego prądu i_{opz} , wyznaczonego jako jednoczęstościowości, sinusoidalny przebieg prądu o częstotliwości 50 Hz o wartości skutecznej i_{opRMS} równej wartości skutecznej zarejestrowanego prądu upływu ogranicznika, zgodnie z rysunkiem 10.

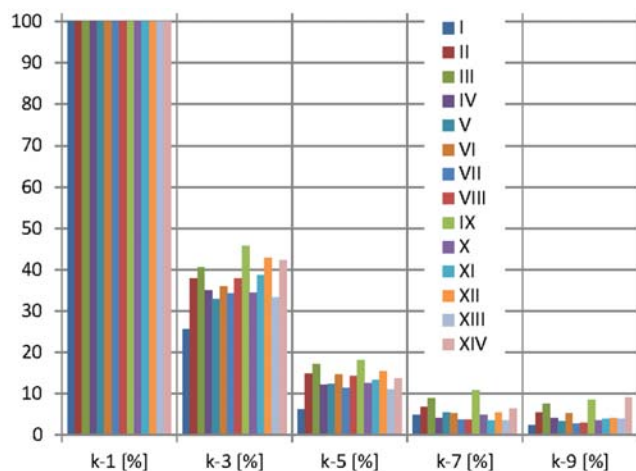


Rys. 10. Ilustracja metody wyznaczania prądu odniesienia

Zestawienie znaczących wyższych harmonicznych nieparzystych (parzyste nie występowały) w prądzie upływu jednego z badanych ograniczników przepięć, dla wymuszenia napięciem quasi-sinusoidalnym, zamieszczono na rysunku 11. Na rysunku 12 przedstawiono względne udziały wyższych harmonicznych prądów upływu wszystkich czternastu badanych ograniczników dla napięcia referencyjnego 45 kV w odniesieniu do częstotliwości podstawowej 50 Hz.



Rys. 11. Udział wyższych harmonicznych prądu upływowego w odniesieniu do wartości skutecznej zarejestrowanego prądu



Rys. 12. Względne udziały wyższych harmonicznych prądu upływu wszystkich czternastu badanych ograniczników dla napięcia referencyjnego 45 kV w odniesieniu do częstotliwości podstawowej 50 Hz

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały dobrą powtarzalność parametrów badanych ograniczników przepięć. Niewielkie rozrzuty charakterystyk prądowo-napięciowych oraz zbliżony udział wyższych harmonicznych dla poszczególnych badanych ograniczników wskazują na pełną powtarzalność procesu produkcyjnego oraz wysoką jakość warystorów. Potwierdziły to wykonane badania strukturalne. Badania mikroskopowe oraz pomiary mikrotwardości tworzywa warystorów wykazały wysoką zwartość i spistość mikrostruktury oraz ogólnie dobrą jednorodność.

Wydaje się, że zaproponowana metoda analizy udziału harmonicznych w przebiegu prądów upływowych niesie w sobie duży potencjał wykrywania wad w strukturze warystorów. Takie analizy będą przedmiotem dalszych badań po przeprowadzeniu prób przyspieszonej degradacji ograniczników w tym między innymi: udarów prądowych, przegrzewania i innych, w oparciu o normę [10], według opracowywanego algorytmu degradacji

Autorzy: Waldemar S. Chmielak, Robert Paczkowski, Zbigniew Piątek: Instytut Energetyki Instytut Badawczy, Laboratorium Urządzeń Rozdzielczych, Warszawa, Polska, waldemar.chmielak@ien.com.pl;
Piotr Papiński, Hubert Śmietanka: Instytut Energetyki Instytut Badawczy, Pracownia Oddziaływań Środowiskowych i Ochrony Przeciwprzepięciowej, Warszawa, Polska, piotr.paplinski@ien.com.pl;
Przemysław Ranachowski, Zbigniew Ranachowski: Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa, Polska, pranach@ippt.pan.pl.

LITERATURA

- [1] George R. S. Lira, Edson G. Costa, Tarso V. Ferreira, Metal-oxide surge arrester monitoring and diagnosis byself-organizing maps, *Electric Power Systems Research* 108, 2014, 315– 321
- [2] P. Papiński, Jacek Wańkowicz, Application of leakage current parameters for technical diagnostics of surge arresters, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 23, Issue 6, Dec. 2016
- [3] P. Papiński, J. Wańkowicz, Niestandardowe metody badań ograniczników przepięć w eksploatacji, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr. 10, 2014, 118-120
- [4] P. Papiński, P. Ranachowski, Badania powierzchni elementów wewnętrznych ograniczników przepięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr. 5a, 2012, 73-76
- [5] PN-EN 60099-5:2018-08, Ograniczniki przepięć -- Część 5: Zalecenia wyboru i stosowania
- [6] L. Gruza, P. Konieczny, S. Maziarz, R. Paczkowski, Z. Piątek, Unikatowy obwód probierczy dla prób zwarciovych ograniczników przepięć w Laboratorium Urządzeń Rozdzielczych Instytutu Energetyki, *Urządzenia dla Energetyki*, nr. 4, 2018, 44-48
- [7] P. Papiński, J. Wańkowicz, H. Śmietanka, Diagnostyka ograniczników przepięć – doświadczenia z badań eksploatacyjnych, *Mat. XI Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia - EUI-2007*, Krynica 25-28.09.2007 r
- [8] M. Olesz, Problemy pomiaru prądów upływowych w diagnostyce ograniczników przepięć, *OWPG, monografie* nr. 156, Gdańsk 2016.
- [9] Su-Bong Lee, Seung-Ju Lee, Bok-Hee Lee, Analysis of thermal and electrical properties of ZnO arrester block, *Current Applied Physics* 10, 2010, 176–180
- [10] PN-EN 60099-4:2015-01, Ograniczniki przepięć -- Część 4: Beziskiemikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali do sieci prądu przemiennego
- [11] P. Papiński, J. Wańkowicz, P. Ranachowski, Z. Ranachowski, Doświadczenia z eksploatacji wysokonapięciowych liczników zadziałań oraz badania degradacji mikrostruktury pochodzących z nich warystorów ZnO, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr. 10, 2018, 1-7
- [12] P. Papiński, J. Wańkowicz, P. Ranachowski, Z. Ranachowski, Investigation of microstructure of ZnO varistors taken from surge arrester counters, *Archives of Metallurgy and Materials*. 64, 1, 2019, 191-196
- [13] P. Papiński, P. Ranachowski, Mikrostruktura i stopień degradacji warystorów ZnO z eksploatacji w badaniach mikroskopowych, *Przegląd Elektrotechniczny* nr.1, 2016, 122-127
- [14] P. Papiński, J. Wańkowicz, P. Ranachowski, Z. Ranachowski, Microstructure and degree of degradation of ZnO varistors in surge arresters due to operation, *Archives of Metallurgy and Materials*, 63, 3, 2018, 1267-1273