

## Badania powierzchni elementów wewnętrznych ograniczników przepięć

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań powierzchni nieuszkodzonych i uszkodzonych podczas eksploatacji elementów wewnętrznych ograniczników przepięć. Elementy te wytypowano na podstawie uprzednio wykonanych charakterystyk prądowych pod napięciem sieciowym. Stwierdzono, że analiza kształtu prądu płynącego przez ogranicznik może być pomocna w ocenie jego stopnia zdegradowania oraz może stanowić podstawę dopuszczenia go do dalszej eksploatacji.

**Abstract.** The paper presents results of surface investigations of internal elements of surge arresters being in good working order or defected. The elements were selected on the basis of wave-form of current characteristics and their parameters, obtained at line voltages. It was found that analysis of the wave-form of current which flows through an surge arrester can be useful for evaluation of its current degradation level. It allows also to take up the decision concerning further operation of the surge arrester. (*Investigation on surfaces of internal elements of surge arresters*).

**Słowa kluczowe:** ogranicznik przepięć, charakterystyka prądowa, warystor, włókno szklane.

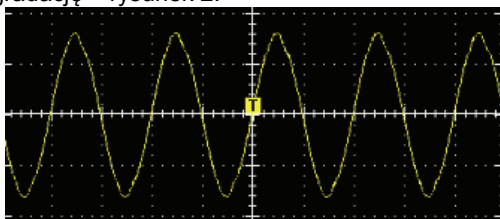
**Keywords:** surge arrester, current characteristic, varistor, glass fibre composite.

### Wstęp

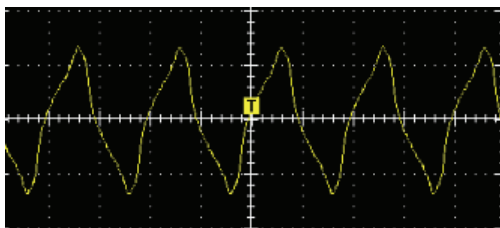
W Instytucie Energetyki od wielu lat prowadzone są badania diagnostyczne ograniczników przepięć (iskiernikowych i beziskiernikowych) własną, opatentowaną metodą „on-line”, w trakcie ich eksploatacji [1-5]. Podczas tych badań analizowany jest między innymi kształt prądu przepływającego przez ogranicznik. W artykule wskazano na istnienie zależności pomiędzy rejestrowanymi podczas eksploatacji ogranicznika odkształconymi przebiegami prądów, a uszkodzeniami struktury jego elementów wewnętrznych. Przedstawiono wyniki badań optycznych powierzchni warystorów oraz elementu tekstolitowego. Stopień odkształcenia charakterystyki prądowej YT, gdzie Y jest osią prądu a T osią czasu, która określona jest współczynnikami opisanymi w patencie [6], może być wykorzystany przy dopuszczaniu diagnozowanego ogranicznika do dalszej eksploatacji.

### Badania diagnostyczne ograniczników

Badania wykonano na dwóch beziskiernikowych ogranicznikach przepięć, przeznaczonych do pracy w sieciach średniego napięcia (SN). W trakcie badań diagnostycznych charakterystyk prądowych YT, rejestrowanych przy użyciu oscyloskopu cyfrowego typu TDS 1002 firmy Tektronix, stwierdzono że wykazują one znaczne różnice. Charakterystykę prądową nie uszkodzonego ogranicznika – bez odkształcenia sinusoidy prądu, przedstawiono na rysunku 1. Charakterystyka drugiego ogranicznika była odkształcona, co wskazuje na jego degradację – rysunek 2.

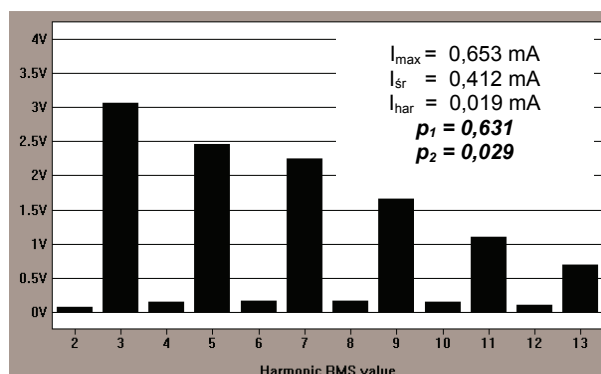


Rys.1. Charakterystyka YT nieuszkodzonego ogranicznika

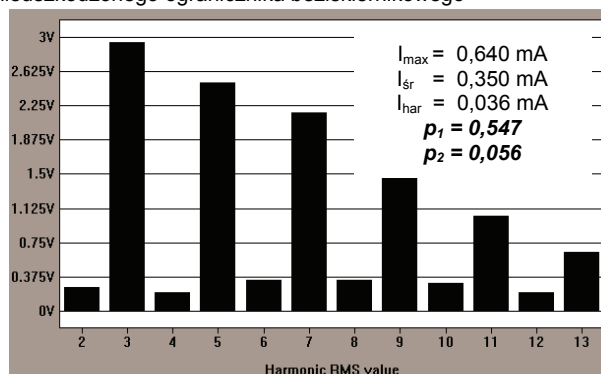


Rys.2. Charakterystyka YT ogranicznika w początkowym stadium degradacji

Zarejestrowane na oscyloskopie odkształcenia charakterystyki prądowej drugiego ogranicznika sugerują początkowe stadium degradacji jego elementów wewnętrznych. Taką ocenę stanu diagnozowanych ograniczników potwierdzają również harmoniczne, wyznaczone z charakterystyk prądowych YT metodą szybkiej transformaty Fouriera FFT oraz współczynniki  $p_1$  i  $p_2$ , które otrzymano według procedury opisanej w pracy [5]. Wartości wyznaczonych harmonicznych oraz współczynników diagnozowanych ograniczników przepięć przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys.3. Analiza przebiegu zależności YT metodą FFT nieuszkodzonego ogranicznika beziskiernikowego



Rys.4. Analiza przebiegu zależności YT metodą FFT ogranicznika beziskiernikowego w początkowym stadium degradacji

Analiza przebiegów charakterystyk YT oraz wyznaczonych na ich podstawie wartości współczynników  $p_1$  i  $p_2$ , potwierdziły, że pierwszy z ograniczników wykazuje prawidłowe działanie, natomiast drugi jest w początkowym stadium uszkodzenia. Dowodzą tego podwyższone w

stosunku do wykresu na rysunku 3 wartości parzystych harmonicznnych, przedstawione na rysunku 4.

W celu określenia stopnia uszkodzenia elementów wewnętrznych drugiego ogranicznika zastosowano metodę optyczną, porównując stan powierzchni warystorów znajdujących się w badanych ogranicznikach.

### Badania powierzchni warystorów

W celu zobrazowania i dokumentacji cech degradacji warystorów dokonano obserwacji mikroskopowej ich zewnętrznych powierzchni. Badane były elementy (warystory) wymontowane z uszkodzonego ogranicznika przepięć SN. Odniesienie stanowiły analogiczne warystory, pochodzące z ogranicznika, który wykazywał w pełni prawidłowe działanie. Przedmiotem badań mikroskopowych były jedynie zewnętrzne powierzchnie warystorów. Obserwacje dotyczyły powierzchni czołowych – elektrod oraz pokrytych izolacją ścian bocznych. Do badań wykorzystano telewizyjny analizator obrazu KSRUN – Zeiss wyposażony w teleobiektyw o maksymalnym powiększeniu 5 razy oraz komputerowy analizator obrazu kanadyjskiej firmy CLEMEX. Był on sprzężony z mikroskopem optycznym. Możliwa do wykorzystania moc obiektywu pozostawała w zakresie od x1 do x50. Jednak w przypadku badań typowych tworzyw oraz obiektów elektrotechnicznych wystarczająca jest moc obiektywu w przedziale x10 – x20, co odpowiada rozdzielczości na poziomie dziesiątych części mikrometra. Taka rozdzielczość była całkowicie zadowalająca w przypadku badań powierzchni warystorów, gdzie do obserwacji stosowano powiększenia nie przekraczające 200 razy. W celu lepszego zobrazowania faz obecnych na powierzchniach czołowych i bocznych warystorów przydatne było przedstawienie ich obrazów z wykorzystaniem wielobarwnej maski binarnej. Ponadto część zdjęć dokumentacji fotograficznej wykonana została przy pomocy aparatu cyfrowego Canon A630, w skali 1:1.

Prawidłowe powierzchnie elektrod warystorów, które obserwowane były w powiększeniach od 5 do 50 razy, odznaczały się czystą, stosunkowo gładką metaliczną powierzchnią o jednorodnej barwie. Wyróżnić można było jedynie płaszczysty przestrzenny pierwszego planu oraz tła, które stanowiły odwzorowanie nierówności powierzchni.

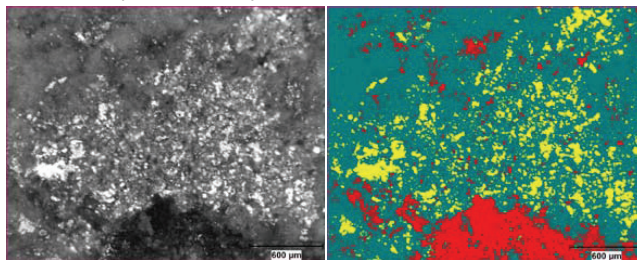
Badania powierzchni elektrody zdegradowanego warystora ZnO pozwoliły na wyróżnienie trzech faz materiałowych – rysunek 5.



Rys. 5. Obraz powierzchni elektrody zdegradowanego warystora ZnO w powiększeniu 5x

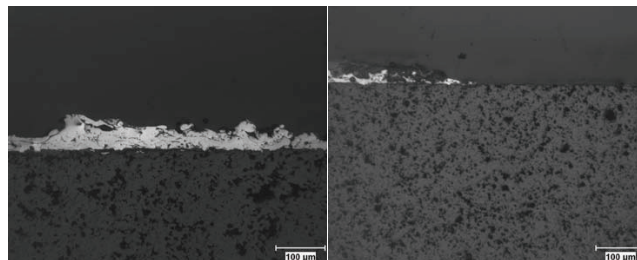
Faza brunatna, która układała się pierścieniowo na powierzchni elektrody, zidentyfikowana została jako metaliczna miedź oraz jej tlenki. Ciemniejsze ziarno oraz mniejsze szare wydzielania, o zbliżonej barwie, odwzorowują amorficzną postać krzemionki. Jaśniejsze tło stanowi pierwotne metaliczne pokrycie elektrody. Obrazy mikroskopowe wybranego fragmentu powierzchni, w powiększeniu 50 razy, przedstawiono w postaci oryginalnej – rysunek 6 - oraz jako obraz binarny – rysunek 7. Faza czarna (czerwona w obrazie binarnym) odwzorowuje miedź

i jej tlenki, faza biała (żółta w obrazie binarnym) – pierwotne pokrycie elektrody, faza szara (niebieska w obrazie binarnym) uwidacznia pokrycie dużej części elektrody amorficzną krzemionką.



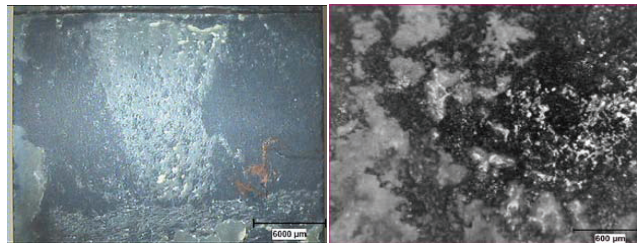
Rys. 6 i 7. Fragment powierzchni zdegradowanego warystora ZnO w powiększeniu 50x. Obraz mikroskopowy oraz barwna maska binarna

Innym istotnym defektem, który został wykryty na fragmentach powierzchni zdegradowanego warystora, był ubytek metalicznej warstwy elektrodowej. Po odcięciu części brzegowej warystora, wykonano w dużym powiększeniu zdjęcie obszaru zawierającego warstwę elektrody bez istotniejszych ubytków – rysunek 8 - oraz na granicy nieciągłości – rysunek 9.



Rys. 8 i 9. Obrazy powierzchni przekroju warystora ZnO z jasną warstwą metalicznej elektrody i częścią ceramiczną poniżej, pow. 200x. 8 – prawidłowa warstwa elektrodowa, 9 – przerwana warstwa elektrody

Niezależnie od obserwacji czołowych powierzchni warystorów, badaniom poddano ich boczne powierzchnie, pokryte izolacją. Prawidłowy obraz powierzchni bocznej warystora, zarówno w małym (5 razy), jak i większym powiększeniu (50 razy) ukazuje gładką i lśniącą izolację, bez żadnych uszkodzeń mechanicznych lub zanieczyszczeń obcymi związkami chemicznymi.

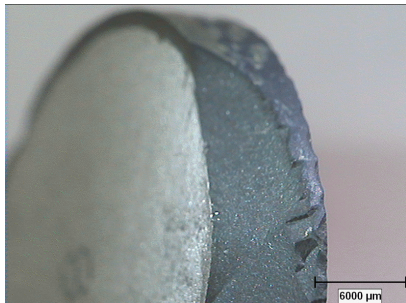


Rys. 10 i 11. Obraz powierzchni izolacji zdegradowanego warystora ZnO w powiększeniu 5x i 50x. Objasnienie w tekście

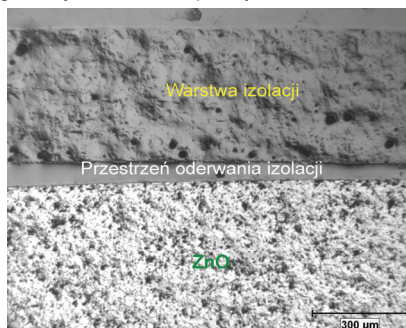
Obserwacje powierzchni bocznej zdegradowanego warystora ujawniły występowanie znacznej ilości amorficznej krzemionki oraz brunatnych wydzielen miedzi i jej tlenków na ciemniejszym tle przegrzanej izolacji – rysunek 10. Obraz mikroskopowy wybranego fragmentu bocznej powierzchni, w większym powiększeniu, przedstawiono na rysunku 11. Jasnoszary nalot krzemionki oraz białe drobiny miedzi widoczne są na ciemniejszym tle przegrzanej izolacji.

Oprócz obecności zanieczyszczeń, w zdegradowanych warystorach obserwowano liczne mechaniczne uszkodzenia izolacji. Miały one zróżnicowany charakter i

nasilenie. Gołym okiem oraz w niewielkim powiększeniu widoczne były pęknięcia i szczeliny w warstwie izolacji. Poważniejszym uszkodzeniem były wylupania izolacji. Obserwowane były one zwłaszcza w sąsiedztwie krawędzi. Niekiedy wykruszeniu ulegały wraz z izolacją fragmenty materiału ceramicznego warystora – rysunek 12. Stwierdzono również, że izolacja nie zawsze dobrze przylega do części ceramicznej badanego elementu. Widoczne jest to na zglądach, które wykonane zostały w płaszczyźnie elektrody – rysunek 13.



Rys. 12. Obraz wylupania izolacji wraz z fragmentami materiału ceramicznego warystora ZnO w powiększeniu 5x

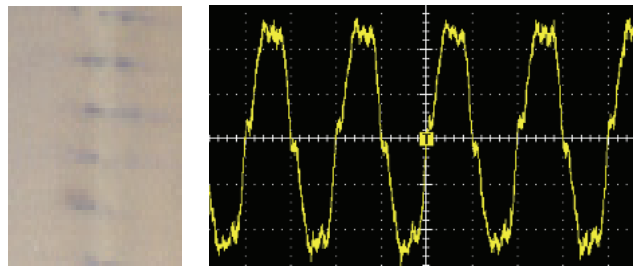


Rys. 13. Oderwanie izolacji od części ceramicznej zdegradowanego warystora ZnO w powiększeniu 100x

### Badania elementu tekstolitowego

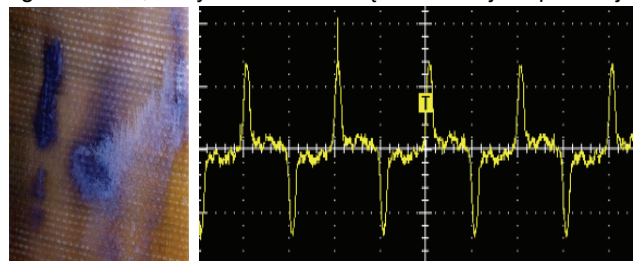
Wewnątrz ogranicznika przepięć znajdują się również elementy dystansowo-centrujące, wykonane najczęściej z tekstolitu. Jest to materiał kompozytowy, będący laminatem technicznym, który składa się z żywicy fenolowej i zbrojenia w postaci tkaniny bawełnianej lub szklanej (nośnik). Przy właściwym uszczelnieniu wnętrza ogranicznika, charakterystyka prądu, który przez niego płynie w czasie eksploatacji, nie ulega odkształceniu. Wówczas elementy dystansowo-centrujące nie mają wpływu na prąd płynący przez ogranicznik. Prawidłowy przebieg charakterystyki YT szczelnego ogranicznika ilustruje rysunek 1.

W eksploatacji znajdują się jednak również ograniczniki będące w różnych stadiach rozszczelnienia, wynikającego z długotrwałej ich eksploatacji lub niewłaściwego montażu. Brak szczelności ogranicznika powoduje dostawanie się wilgoci do jego wnętrza. W wyniku prowadzonej diagnostyki metodą „on-line” stwierdzono, że najbardziej wrażliwymi na działanie wilgoci są tekstolitowe elementy dystansowo-centrujące [4,5]. Wyładowania na powierzchni tych elementów powodują zniekształcenia charakterystyk prądowych. Ich odkształcenie jest ściśle powiązane ze stopniem nieszczelności wnętrza ogranicznika. W początkowym stadium utraty szczelności przez ogranicznik, na płytce dystansowo-centrującej pojawiają się wyładowania. W konsekwencji charakterystyka YT ulega zniekształceniu. Uszkodzenia płytki tekstolitowej na skutek wyładowań powierzchniowych oraz odpowiadająca im charakterystyka YT zostały przedstawione na rysunku 14.



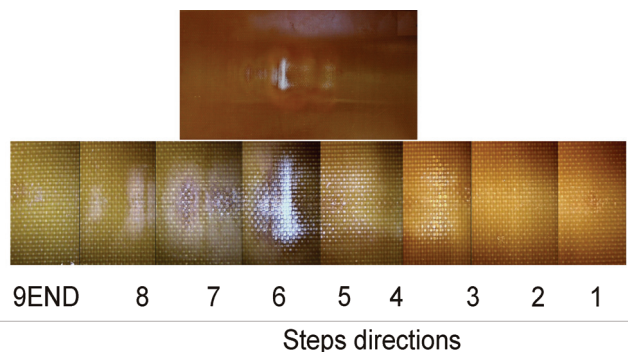
Rys. 14. Obraz początkowego stadium degradacji elementu dystansowo-centrującego oraz zniekształcenie charakterystyki YT związane z uszkodzeniem

W miarę jak postępuje zawilgocenie wnętrza ogranicznika, następuje utrata właściwości dielektrycznych tekstolitowego elementu dystansowo-centrującego. Prowadzi to do trwałego uszkodzenia ogranicznika. Jego charakterystyka prądowa YT ulega silnemu zniekształceniu. W konsekwencji ogranicznik nie nadaje się do dalszej pracy i powinien być bezzwłocznie wyłączony z eksploatacji. Na rysunku 15 przedstawiono fragment silnie uszkodzonego elementu dystansowo-centrującego oraz bardzo zniekształconą charakterystykę prądową YT ogranicznika, który nie nadawał się do dalszej eksploatacji.



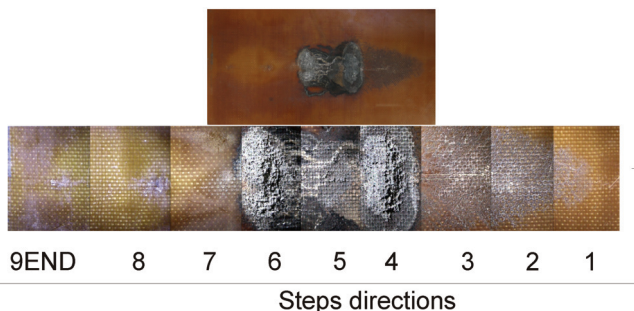
Rys. 15. Obraz zaawansowanego stadium degradacji elementu dystansowo-centrującego oraz silne zniekształcenie charakterystyki YT związane z uszkodzeniem. Ogranicznik został wyłączony z eksploatacji

Niezależnie od opisanych powyżej warystorów, badaniom optycznym poddano płytkę tekstolitową, wyjętą z uszkodzonego ogranicznika przepięć SN. Badana była wierzchnia strona płytki oraz jej strona dolna, która sąsiadowała z warystorami. Przy użyciu analizatora obrazu KSRUN-Zeiss z teleobiektywem wykonano pełną dokumentację zdjęciową obydwu powierzchni płytki. Zdjęcia ilustrują całą powierzchnię oraz małe fragmenty, które w układzie sekwencyjnym przedstawiają poszczególne fazy rozwoju uszkodzenia. Na obu stronach technicznego laminatu bawełniano-fenolowego uwidoczniło pole oddziaływań termicznych na całej długości płytki – rysunki 16 i 17.



Rys.16. Widok wierzchniej strony uszkodzonej płytki tekstolitowej. Poniżej przedstawiono sekwencyjne fragmenty płytki w powiększeniu 2,5x w stosunku do obrazu całej płytki

Silne uszkodzenie struktury materiału organicznego, w postaci zwęglenia powierzchni wyraźnie widoczne jest w środkowej części powierzchni dolnej – rysunki 17 i 18.



Rys.17. Widok spodniej – silnie uszkodzonej powierzchni płytki tekstolitowej. Poniżej przedstawiono sekwencyjne fragmenty płytki w powiększeniu 2,5x w stosunku do obrazu całej płytki

Jakkolwiek od strony warystorów znajdowała się spodnia strona płytki, gdzie miało miejsce wyładowanie, również na jej górnej stronie obecne są ślady przegrzania – rysunek 16. Taki stopień degradacji spotykany jest często przy uszkodzeniach ograniczników przepięć. Jest on skutkiem właściwości laminatu, który wykazuje niewystarczającą odporność na skutki awaryjnej pracy ogranicznika przy jego zawilgoceniu, które następuje przy rozszczelnieniu osłony. Obecność wilgoci wewnątrz ogranicznika przepięć powoduje powstawanie wyładowań pełnych na jego elementach wewnętrznych. W wyniku tego dochodzi do zwęglenia i wypalenia fragmentów powierzchni tekstolitu. Skutkuje to istotnym pogorszeniem pracy stosu warystorów - rośnie wartość prądu płynącego przez ogranicznik i zwiększona jest zawartość parzystych harmonicznych. Powyższy proces może doprowadzić do trwałego uszkodzenia ogranicznika przepięć. Na rysunku 18 przedstawiono obraz fragmentu dolnej powierzchni płytki tekstolitowej o najsilniejszym stopniu degradacji. Widoczne jest zwęglenie żywicy fenolowej oraz kilku warstw bawełnianej tkaniny.



Rys. 18. Powiększony obraz fragmentu dolnej powierzchni płytki tekstolitowej o najsilniejszym stopniu degradacji. Zwęgleniu uległa żywica fenolowa oraz kilka warstw bawełnianej tkaniny

### Podsumowanie

W eksploatowanych ogranicznikach przepięć rozwijają się procesy degradacji (starzenia) elementów wewnętrznych. Procesy te zostały przedstawione w pracy na podstawie przeprowadzonej mikroskopowej analizy uszkodzeń (degradacji) elementów wewnętrznych ograniczników. Degradacja dotyczyła zarówno elementów dystansowo-centrujących, jak i samych warystorów.

Szybkość i wielkość zmian starzeniowych w ogranicznikach uzależniona jest pośrednio od czasu trwania

jego eksploatacji, a bezpośrednio od jakości jego wykonania oraz montażu.

Po utracie szczelności przez ogranicznik, w pierwszej kolejności uszkodzeniu ulegają elementy centrująco-dystansowe. Wykonane są one zazwyczaj z tekstolitu lub włókna szklanego, które charakteryzują się niską wytrzymałością elektryczną w warunkach zawilgocenia.

W następnej kolejności degradacji ulegają warystory, z których bardziej wrażliwe na zawilgocenie są elementy wykonane z węgliku krzemu (SiC) niż z tlenku cynku (ZnO).

Na podstawie przedstawionych w pracy badań mikroskopowych stwierdzono, że przegrzanie elementów dystansowo-centrujących ma ścisły związek z degradacją warystorów, a tym samym z uszkodzeniem całego ogranicznika.

Stwierdzono również, że decydujący wpływ na poprawną pracę ogranicznika w systemie ma zapewnienie szczelności jego wnętrza oraz czas trwania eksploatacji.

Wyniki opisanych w artykule badań laboratoryjnych wskazują na potrzebę prowadzenia diagnostyki ograniczników przepięć metodą „on-line”, bez względu na czas ich eksploatacji.

Proponowana obecnie przez niektórych producentów ograniczników rezygnacja z badań diagnostycznych w początkowym okresie ich eksploatacji, w wielu wypadkach nie znajduje uzasadnienia [1].

Podsumowując, stwierdza się celowość wykonywania diagnostyki ograniczników przepięć w miejscu pracy, z uwagi na zachodzące zjawiska starzeniowe ich elementów wewnętrznych w trakcie eksploatacji.

### LITERATURA

- [1] Papliński P., Wańkiewicz J., Doświadczenia z badań laboratoryjnych i terenowych ograniczników przepięć przeznaczonych do sieci 110 kV, Mat. VIII Sympozjum „Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia EU1'01”, Zakopane, 18-20 października 2001, 357-364.
- [2] Komorowska I., Papliński P., Opracowanie zasad oceny stanu ograniczników przepięć na podstawie analizy zawartości harmonicznych w prądzie upływu, Opracowanie Instytutu Energetyki, Warszawa 2004.
- [3] Papliński P., Wańkiewicz J., Analizator parametrów prądów upływu ogranicznika typu AAPPU-02, Mat. VIII Konferencji Naukowo-Technicznej „Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w energetyce NIWE'2007”, Szklarska Poręba – Piechowice, 12-15 czerwiec 2007, Energetyka XII, 90-92.
- [4] Papliński P., Wańkiewicz J., Śmietanka H., Diagnostyka ograniczników przepięć - doświadczenia z badań eksploatacyjnych, Mat. XI Sympozjum „Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia EU1 2007”. Krynica 25-28.09.2007, Przegląd Elektrotechniczny, 3, 2007, 173-176.
- [5] Papliński P., Wańkiewicz J., Śmietanka H., Wpływ warunków środowiskowych na działanie ogranicznika przepięć w warunkach terenowych, Mat. IX Konferencji Naukowo-Technicznej „Napowietrzna Izolacja Wysokonapięciowa w Energetyce NIWE'2009”, Szklarska Poręba 30.09-2.10 2009, Przegląd Elektrotechniczny, 5, 2010, 207-209.
- [6] Sposób diagnozowania stanu zużycia ograniczników przepięć. Patent Instytutu Energetyki nr P 345375.

### Autorzy:

mgr inż. Piotr Papliński, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, e-mail: [piotr.papliński@ien.com.pl](mailto:piotr.papliński@ien.com.pl)  
 dr Przemysław Ranachowski, IPPT PAN ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa, e-mail: [pranach@ippt.gov.pl](mailto:pranach@ippt.gov.pl)