



Przemysław RANACHOWSKI¹, Feliks REJMUND¹,
Maciej JAROSZEWSKI², Janusz FLESZYŃSKI²

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN Warszawa (1);
Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii (2)

Ultradźwiękowa diagnostyka ceramicznych izolatorów liniowych po wieloletniej eksploatacji

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań ultradźwiękowych krajowych izolatorów liniowych typu LP 75/17, po około 30-letnim okresie eksploatacji oraz badań strukturalnych tworzywa izolatora, który uległ zerwaniu. Dla porównania zaprezentowano również badania ultradźwiękowe eksploatowanych izolatorów liniowych typu LS 75/21 produkcji byłej NRD z tego samego okresu. Dokonano oceny degradacji struktury tworzywa rodzaju 120 izolatorów krajowych oraz elektroporcelany C 112 elementów niemieckich. Badania wykazały odmienny charakter procesów starzeniowych w obszarze pnia oraz kloszy izolatorów. Analiza statystyczna parametrów ultradźwiękowych ujawniła zróżnicowaną jakość i jednorodność tworzywa poszczególnych izolatorów.

Abstract. (Ultrasonic examination of the ceramic line insulators after many years period of operation). This work presents the results of ultrasonic testing of LP 75/17 domestic line insulators after about 30 years long period of exploitation. Material structure of broken insulator of the same type was investigated using microscopic method. Additionally, ultrasonic measurements of LS 75/21 operated German (GDR) line insulators were described. Evaluation of structural degradation of insulators' material was performed. The study revealed different kind of aging degradation processes in the region of rod and sheds of broken insulator. Statistical analysis of ultrasonic results demonstrated varied quality and homogeneity of material for individual insulators.

Słowa kluczowe: ceramiczny izolator liniowy, porcelana elektrotechniczna, degradacja starzeniowa, badanie ultradźwiękowe.

Keywords: ceramic line insulator, electrotechnical porcelain, ageing degradation, ultrasonic measurement.

Wstęp

Od wielu lat realizowana jest modernizacja krajowych linii przesyłowych i rozdzielczych WN. Jednym z najważniejszych jej elementów jest wymiana eksploatowanych od dawna izolatorów. Izolatory długopniowe wykonane z porcelany wysokoglinowej rodzaju 120 (krajowe i jugosłowiańskie) oraz krystalobalitowej rodzaju 112 (produkcji byłej NRD) odznaczają się wysoką awaryjnością. Roczny wskaźnik uszkodzeń, w przeliczeniu na 10^5 eksploatowanych elementów, wynosi najczęściej kilkadziesiąt zerwań [1,2]. Poważny wzrost liczby uszkodzeń izolatorów długopniowych w liniach krajowych notowany był już w latach 1980-tych [3]. W latach następnych sytuacja nie uległa poprawie i problem jest aktualny do chwili obecnej, zwłaszcza w miesiącach zimowych (między listopadem i kwietniem). Prowadzone badania wykazały, że przyczyną samoistnych zerwań izolatorów były z reguły defekty produkcyjne: wtrącenia obcych ciał, wady teksturalne (skręty masy) oraz rozwarstwienia i pęknięcia wynikające z dużych naprężeń wewnętrznych [3, 4]. W przypadku izolatorów produkcji byłej NRD zwracano również uwagę na nieosiowy montaż okuć, a nawet niedopuszczalną otwartą porowatość porcelany. Niemniej, jako zasadnicza przyczyna awarii, podawane są w ogólnych opracowaniach skutki wieloletnich procesów starzeniowych. Przyczyny i charakter efektów degradacji najczęściej nie są jednak rozważane.

Prowadzone przez autorów kompleksowe badania izolatorów wsporczych WN, po długim okresie eksploatacji, poszerzyły wiedzę dotyczącą efektów degradacji starzeniowej elektroporcelany [5, 6]. Stwierdzono, że obciążenia eksploatacyjne oraz czynniki atmosferyczne mają niewielki wpływ na natężenie procesów starzeniowych. Decydujące znaczenie mają naprężenia wewnętrzne, przede wszystkim w skali mikro, w tworzywie ceramicznym. Głównym ich źródłem są liczne ziarna kwarcu (ponad 20 % w starszym tworzywie C 120) oraz – w mniejszym stopniu – wydzielienia mulitu, w postaci dużych igłowych kryształów.

Prezentowana praca dotyczy grupy krajowych izolatorów liniowych typu LP 75/17 z połowy lat 1970-tych. W ich wypadku, na proces degradacji starzeniowej istotny wpływ miały wieloletnie obciążenia eksploatacyjne, o statycznym i dynamicznym charakterze. Tworzywo izolatorów liniowych miało skład i budowę zbliżoną do izolatorów wsporczych z tego samego okresu. Jednak procesy starzeniowe w pniu, który przenosi naprężenia eksploatacyjne oraz w kloszach – gdzie obciążenia takie nie występowały – były wyraźnie różne. Dowiodły tego badania strukturalne izolatora, który uległ zerwaniu po prawie 30-letnim okresie eksploatacji.

W pracy zaprezentowano wyniki badań ultradźwiękowych 16 izolatorów LP 75/17 oraz porównawczo, 6 izolatorów LS 75/21, produkcji byłej NRD. Pomiary wykonano w miejscu eksploatacji – na stacjach transformatorowo-rozdzielczych 110/6 kV energetyki przemysłowej (rys. 1).



Rys. 1. Pomiary ultradźwiękowe izolatora LP 75/17 w miejscu eksploatacji

Do grupy badanych izolatorów włączono również zerwany izolator LP 75/17, oznaczony LPa, który poddano laboratoryjnym badaniom ultradźwiękowym oraz mikroskopowym – na próbkach pobranych z różnych miejsc pnia oraz kloszy. Izolatory niemieckie pochodziły również z połowy lat 1970-tych i od tego czasu znajdowały się w eksploatacji. Wykonane były jednak z gorszego materiału – porcelany krystalicznej rodzaju 112. Większość badanych izolatorów pracowała jako elementy odciągowe.

wykonywanie uciążliwych pomiarów c_T . Niepewność wyznaczonych wartości modułów sprężystości wynosiła ± 2 GPa.

Wyniki badań ultradźwiękowych izolatorów LP 75/17, przedstawiono w tabeli 1. Zebrano wartości: prędkości propagacji fal c_L , amplitudy A sygnału przechodzącego, modułu sprężystości Younga E oraz parametrów statystycznych. Na rysunku 2 przedstawiono zależność rozrzutu wartości prędkości propagacji fal ultra-

Tabela 1. Wyniki badań ultradźwiękowych izolatorów LP 75/17 wraz z parametrami statystycznymi

Lp	Parametr	Wartość średnia	Zakres wartości	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Rozrzut względny
1	c_L [m/s]	5980	5790÷6180	93	1,5 %	6,5 %
2	A [V]	3,3	2,1÷4,5	0,6	18,2 %	73 %
3	E [GPa]	74	69÷79	2	2,7 %	13,5 %

c_L - prędkość propagacji fal podłużnych, A - amplituda pierwszego sygnału, E - moduł sprężystości Younga
Rozrzut względny = $100 \% \cdot (\text{wartość}_{\text{max}} - \text{wartość}_{\text{min}}) / \text{wartość}_{\text{średnia}}$

Badania ultradźwiękowe

Badania ultradźwiękowe wykonano stosując oryginalny układ pomiarowy, zaprojektowany i zbudowany z przeznaczeniem do badań zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i w miejscu eksploatacji. Układ składa się z modułu nadawczo-odbiorczego, oscyloskopu cyfrowego, małogabarytowych głowic nadawczo-odbiorczych, przystosowanych do międzykloszowych badań izolatorów oraz zasilacza sieciowego. Schemat i zasada działania zestawu przedstawione zostały w pracy [7]. Podobny układ opisano również w publikacji [5]. Głowice ultradźwiękowe zainstalowane zostały wspólosiowo w wysięgnikach szczepek suwmiarki elektronicznej. Umożliwiło to dokładny pomiar średnicy pnia i zarazem długości drogi fal ultradźwiękowych. Oscyloskop cyfrowy, wchodzący w skład układu pomiarowego, zapewniał rejestrację sygnałów ultradźwiękowych oraz pomiary ich amplitud i czasów opóźnienia. Istotnych informacji dostarczała również analiza kształtu rejestrowanych sygnałów. W przypadku obecności wyraźnych wad strukturalnych obserwuje się zniekształcenie sygnałów oraz obniżenie ich amplitudy (zwykle poniżej 1 V). Występują też często dodatkowe odbicia od defektów w rodzaju makroporów, pęknięć lub wtrąceń. Pomiary wykonywane były w osi poprzecznej izolatorów – we wszystkich międzykloszowych obszarach pnia oraz w sąsiedztwie obu okuć. Ze względu na trudne warunki propagacji fal, wynikające z kształtu powierzchni izolatorów, stosowano kombinowaną metodę przepuszczania i echa. Pozwalało to uniknąć błędu związanego z obecnością warstw sprzęgających przy obu głowicach ultradźwiękowych. Dokładność wyznaczenia prędkości propagacji fal podłużnych c_L wynosiła ± 20 m/s, natomiast amplitudy sygnału A , $\pm 0,2$ V.

Na podstawie zmierzonych wartości c_L obliczono wielkość modułu sprężystości wzdłużnej Younga E , dla badanych grup izolatorów. Wykorzystano znaną zależność [8]:

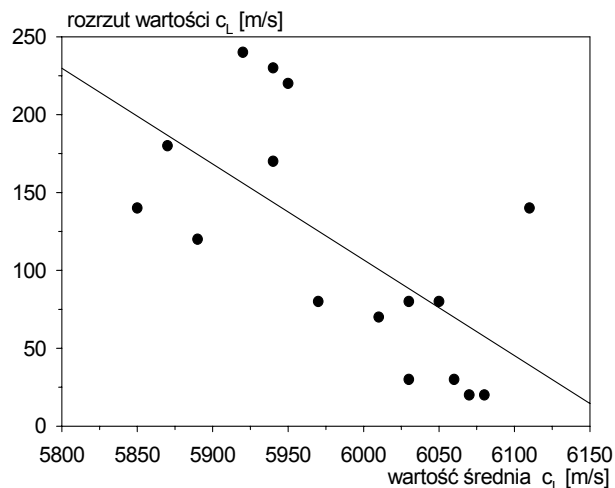
$$(1) \quad E = \rho c_T^2 (3c_L^2 - 4c_T^2) / (c_L^2 - c_T^2)$$

gdzie: ρ oznacza gęstość materiału, c_T – prędkość propagacji fal poprzecznych.

Na podstawie danych uzyskanych od producenta izolatorów oraz wyników własnych badań, przyjęto gęstość $\rho = 2,41$ g/cm³ dla tworzywa izolatorów LP 75/17 oraz $\rho = 2,34$ g/cm³ dla materiału izolatorów LS 75/21. W związku ze stałą wartością liczby Poissona ceramicznych tworzyw glinokrzemianowych ($\nu = 0,23$), prędkość propagacji fal poprzecznych jest ściśle skorelowana z prędkością fal podłużnych i wynosi $c_T = 0,59 c_L$. Stąd, nie było potrzebne

dźwiękowych, mierzonych na długości pnia, od wielkości średniej dla badanej grupy krajowych izolatorów.

Rozrzut prędkości c_L dla poszczególnych izolatorów mieścił się w zakresie od 20 do 240 m/s. Wartość średnia była równa 120 m/s. Wyniki te wskazują na dużą niejednorodność tworzywa izolatorów badanej grupy. Rozrzut ten był z reguły wyższy dla izolatorów o niższej średniej prędkości c_L w tworzywie (rys. 2), a zatem o gorszym module sprężystości i wytrzymałości mechanicznej. Znaczna dyspersja parametrów tworzywa oraz obniżone jego parametry są konsekwencją zaawansowanych procesów starzeniowych. Wiadomo, że około 30-letni okres eksploatacji powoduje blisko 18 % obniżenie średniej wytrzymałości mechanicznej tworzywa. Rozrzut wytrzymałości poszczególnych izolatorów jest przy tym około 2,5 razy większy niż w przypadku nowych elementów [9].



Rys. 2. Rozrzut prędkości propagacji fal podłużnych c_L w funkcji wartości średniej prędkości c_L dla poszczególnych izolatorów LP 75/17

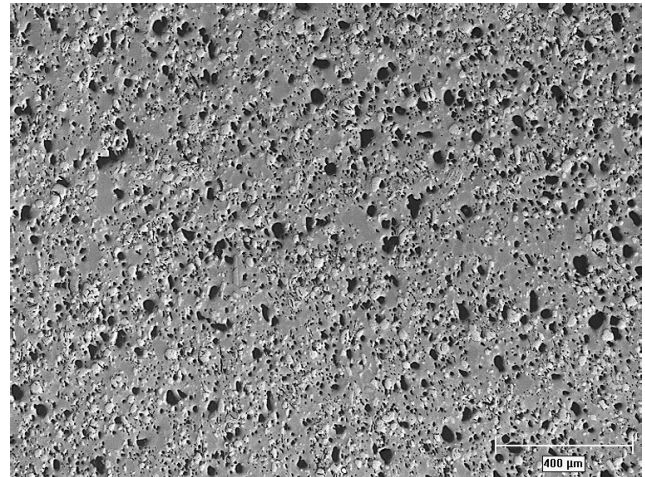
Badany strukturalnie izolator LPa wykazywał niewielki rozrzut prędkości $c_L = 6070 \div 6090$ m/s, przy średnich wartościach amplitudy sygnałów – około 3 V. Zaawansowanie procesów starzeniowych w obszarze pnia było jednak wysokie, co szerzej przedstawiono w następnym punkcie. Stan tworzywa pozostałych izolatorów można ocenić jako ogólnie zbliżony. W badanej grupie izolatorów nie wykryto natomiast defektów silnie obniżających wytrzymałość mechaniczną. Elementy zawierające takie defekty, z dużym prawdopodobieństwem, w ciągu długiego okresu eksploatacji uległyby zerwaniu.

Pomiarom akustycznym poddano również 6 niemieckich izolatorów typu LS 75/21. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzić można, że izolatory badanej grupy wykazywały ogólnie dobrą jednorodność tworzywa. Prędkość c_L zmieniała się w wąskim zakresie – od 5640 do 5800 m/s, wartość średnia wynosiła 5720 m/s. Rozrzut względny c_L posiadał niską wartość równą 2,8 %. Zaskakująco duży rozrzut wykazywała natomiast amplituda przechodzącego sygnału – pomiędzy 2,6 V a 3,8 V. Może to wskazywać na zróżnicowanie stopnia zaawansowania procesów starzeniowych. Moduł sprężystości tworzywa, obliczony na podstawie wyznaczonych wartości prędkości c_L oraz gęstości materiału ($\rho = 2,34 \text{ g/cm}^3$), zawierał się w zakresie od 64 GPa do 68 GPa. Wartość średnia modułu Younga wynosiła 66 GPa, natomiast rozrzut względny był równy 5,3 %. Niskie wartości modułu odpowiadają parametrom porcelany kwarcowej (C 110) i wskazują na poważnie obniżoną wytrzymałość mechaniczną tworzywa izolatorów. Jest to niewątpliwie skutkiem zarówno niewysokiej jakości wyjściowej, jak i zaawansowanych procesów degradacji starzeniowej w strukturze niemieckiej elektroporcelany. W związku z silnymi naprężeniami wewnętrznymi, tworzywo krystalalitowe wykazuje niską odporność na rozwój mikropęknięć, szczególnie w polu naprężeń mechanicznych i termomechanicznych [1-4].

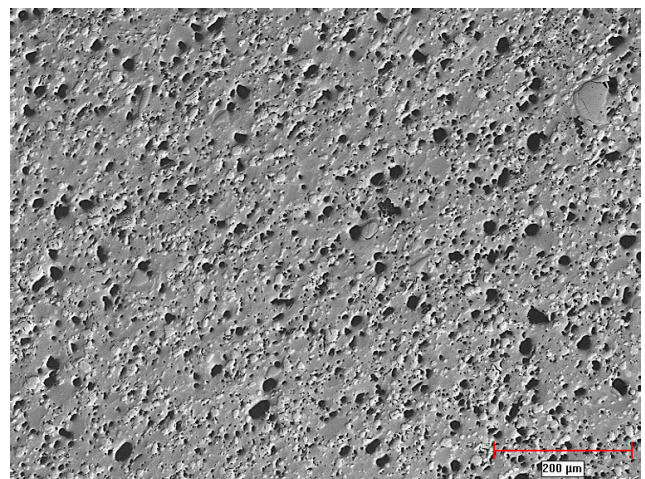
Badania strukturalne

Badania mikroskopowe przeprowadzone zostały na próbkach pnia oraz kloszy izolatora oznaczonego LPa. Wycięte zostały one z dwóch fragmentów izolatora – z okolicy przełamu w jego dolnej części oraz z części górnej. Procedura przygotowania zglądów była dostosowana do tworzywa porcelanowego o osłabionej strukturze i opisana została w pracy [6]. W badanych próbkach nie stwierdzono obecności wtrąceń obcych ciał lub defektów teksturalnych. Jedynie w obszarze kloszy obserwowano słaby efekt anizotropii jednokierunkowej. Jakość wypalenia, stopień przereagowania surowców oraz zagęszczenie tworzywa były dobre. Zawartość kwarcu była wysoka i wykazywała znaczny rozrzut, zmieniając się w szerokim zakresie od około 20 do prawie 29 % (średnio 24 %). Przestrzenne rozłożenie fazy kwarcowej w czerepie uznaje się jednak za prawidłowe i jednorodne. Wielkość ziaren kwarcu mieściła się w przedziale od kilku do ponad 50 μm . Zarówno duże, jak i małe ziarna uległy silnemu wyseparowaniu z matrycy. Jest to typowym efektem degradacji starzeniowej materiału glinokrzemianowego. Znacznie wyższe nasilenie procesów degradacji obserwowano w obszarze pnia izolatora. Duże ziarna były również spękane wewnątrz. Znacząca część ziarn kwarcu wypadła podczas przygotowywania zglądów. W sąsiedztwie ziaren kwarcu obecne były liczne drobne (poniżej 15 μm) pęknięcia biegnące w głąb matrycy. Analiza metodą mikroskopii elektronowej (SEM) ujawniła również submikronowe spęknięcia osnowy szklistej w otoczeniu ziaren kwarcu. Efekty degradacji nasilone były w obszarze pnia – rysunek 3 i znacznie słabsze w tworzywie kloszy (rys. 4). W obszarze kloszy pęknięcia submikronowe występowały jedynie incydentalnie. Zawartość mulitu wynosiła około 35 %. Dostyc duże jego wydzielenia (kilkadziesiąt mikrometrów) były jednorodnie rozłożone w osnowie szklistej. Nie były one spękane lub wyseparowane z matrycy. Podkreślić należy, że wydzielenia mulitu miały z zasady igłową morfologię i o ile dobrze łączyły się z osnową szklistą, bardzo słabo powiązane były z ziarnami kwarcu. Ziarna te szczególnie były narażone na wykruszenie, gdy w dużym stopniu sąsiadowały z fazą mulitową. Faza korundowa, w formie pojedynczych niedużych ziaren, występowała w marginalnej ilości. Nie

odgrywała ona praktycznie żadnej roli w dyspersyjnym wzmocnieniu czerepu. Zawartość porów nie przekraczała 4 %. Pory miały prawidłową wielkość (poniżej 10 μm) oraz kształt i rozłożenie. Podkreślić należy, że pory znajdowały się w osnowie szklistej i bardzo rzadko przylegały do faz krystalicznych. Obecna w zglądach duża liczba ciemnych pól wynika z wykruszenia ziarn kwarcu i nie ma związku z pierwotną zawartością porów w czerepie. Zawartość szklistej matrycy wynosiła około 40 %. Z wydzieleniami mulitu była dobrze zespolona, natomiast w sąsiedztwie ziaren kwarcu obserwowano liczne drobne pęknięcia. W obszarze pnia obecne były również pęknięcia submikronowe – tzw. efekt jetu. Materiał kloszy zawierał o wiele mniej pęknięć, przy niemal całkowitym braku spękań submikronowych.



Rys. 3. Obraz strukturalny tworzywa pnia izolatora LPa w powiększeniu 50 razy. Większe ciemne obszary pozostały po wypadnięciu ziaren kwarcu. Widoczna jest wyraźnie duża ilość mikropęknięć



Rys. 4. Obraz strukturalny tworzywa klosza izolatora LPa w powiększeniu 50 razy. Zwraca uwagę brak mikropęknięć będących konsekwencją obciążeń eksploatacyjnych

W konsekwencji około 30-letniej eksploatacji tworzywo izolatora uległo zaawansowanemu, choć zróżnicowanemu, procesom degradacji starzeniowej. W przypadku pnia, narażonego na działanie naprężeń eksploatacyjnych, spowodowały one duże obniżenie wytrzymałości mechanicznej. Świadczy o tym gładki charakter przełamu – rysunek 5. Było to konsekwencją przede wszystkim wysokiej zawartości kwarcu, zwłaszcza w postaci dużych ziaren. Po latach eksploatacji, nie tylko same działają jak

pory, lecz co gorsza, w ich sąsiedztwie znacznemu osłabieniu ulega matryca tworzywa. Wobec braku istotniejszych defektów technologicznych, za najważniejszą przyczynę zerwania uznać należy zaawansowane procesy degradacji starzeniowej w tworzywie pnia. Bezpośrednią przyczyną awarii było prawdopodobnie gwałtowne silne obciążenie izolatora w wyniku drgań przewodów. Biorąc pod uwagę, że awaria nastąpiła w okresie zimowym, istotną rolę mogły również odegrać naprężenia termomechaniczne.



Rys. 5. Obraz przełamu izolatora LPa

Wnioski

Na podstawie pomiarów ultradźwiękowych grupy izolatorów liniowych LP 75/17 oraz badań strukturalnych zerwanego izolatora tego typu, wyciągnąć można następujące wnioski:

- W następstwie blisko 30-letniego okresu eksploatacji, tworzywo wysokoglinowe izolatorów uległo zaawansowanym procesom degradacji starzeniowej. Głównym ich źródłem były wewnętrzne naprężenia w czerepie. Wynikały one przede wszystkim z relatywnie wysokiej (ponad 20 %) zawartości kwarcu, zwłaszcza w postaci dosyć dużych ziarn (około 30 μm). Ziarna te były również słabo powiązane z wydzieleniami mullitu.

- Znaczne różnice w stanie tworzywa pnia oraz kloszy izolatorów liniowych wskazują na duży wpływ mechanicznych obciążeń eksploatacyjnych na procesy starzeniowe w elektroporcelanie. Naprężenia mechaniczne pnia izolatorów, zwłaszcza dynamiczne, powodują intensyfikację degradacji strukturalnej tworzywa. Jej wyraźnie odmienny charakter, widoczny jest szczególnie w skali submikronowej.

- Zasadniczą przyczyną zerwania izolatora oznaczonego LPa były zaawansowane procesy degradacji starzeniowej. W ich wyniku wytrzymałość tworzywa na obciążenia mechaniczne, zarówno statyczne jak i dynamiczne, uległa dużemu obniżeniu. Stan materiału pozostałych izolatorów typu LP 75/17 ocenić można jako podobny.

- Izolatory posiadające tworzywo o gorszych właściwościach akustycznych, charakteryzują się również wyższym rozrzutem modułu sprężystości Younga. Dowodzi to znaczącego zróżnicowania wyjściowych parametrów tworzywa wysokoglinowego z połowy lat 1970-tych oraz

pogłębienia różnic w wyniku wieloletnich procesów degradacji starzeniowej.

Parametry akustyczne oraz mechaniczne, zarówno wyjściowe jak i obecne, krystalobalitowego tworzywa wschodniemieckich izolatorów są wyraźnie niższe niż w przypadku krajowej elektroporcelany z tego samego okresu. Stopień nasilenia procesów degradacji starzeniowej w materiale izolatorów LS 75/21 ocenić można jako wysoki. Izolatory te powinny być jak najszybciej wycofane z eksploatacji.

LITERATURA

- [1] Duda D., Gacek Z., Kiś W., Lokalny wskaźnik uszkodzeń mechanicznych izolatorów długopniowych w liniach napowietrznych 110 kV, *Pr. Nauk. IPEiE Polit. Wrocławskiej* 36, Seria: Konferencje 11: NIWE 2000, Wrocław (2000), 213-218
- [2] Gacek Z., Kiś W., Analiza awaryjności mechanicznej izolatorów długopniowych w liniach napowietrznych wysokiego napięcia, *Energetyka, I/2003, Zeszyt tematyczny, NIWE 2003*, 33-35
- [3] Czaplak W., Analiza uszkodzalności izolatorów długopniowych i możliwości ich użytkowania w sieciach 110-220 kV, *Energetyka*, 11 (1987), 69-73
- [4] Bertrand J., Chromiński H., Gładki A., Nasiborski R., Flanc J., Izolatory długopniowe VKLF 75/16. Określenie przyczyn pęknięcia izolatorów długopniowych VKLF 75/16 pracujących na liniach elektroenergetycznych 110 i 220 kV, *Ekspertyza naukowa Nr PM/PR/467/2070 wykonana na zlecenie BSPE ENERGOPROJEKT Kraków*, Instytut Energetyki, Warszawa (1982)
- [5] Ranachowski P., Fleszyński J., Rejmund F., Ultradźwiękowe i strukturalne badania porcelanowych izolatorów długopniowych, *Przegląd Elektrotechniczny, IW 2002*, 10 (2002), 256-261
- [6] Ranachowski P., Rejmund F., Fleszyński J., Badania procesów starzeniowych w ceramicznym tworzywie izolatorowym rodzaju 120, *Energetyka, I/2003, Zeszyt tematyczny, NIWE 2003*, 109-112
- [7] Jaroszewski M., Kaczmarek P., Ranachowski P., Fleszyński J., Badania ultradźwiękowe porcelanowych izolatorów długopniowych po wieloletniej eksploatacji, *Przegląd Elektrotechniczny-Konferencje*, 2, 1/2004, IW 2004, 92-95
- [8] Wehr J., *Pomiary prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych*. PWN, Warszawa 1972, rozdz. II
- [9] Liebermann J., Avoiding Quartz In Alumina Porcelain for High-Voltage Insulators, *American Ceramic Society Bulletin*, 80 (2001), n. 6-7, 37-48

Autorzy: dr Przemysław Ranachowski, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Świętokrzyska 21, 00-049 Warszawa, E-mail: pranach@ippt.gov.pl; doc. dr hab. Feliks Rejmund, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Świętokrzyska 21, 00-049 Warszawa, E-mail: freymund@ippt.gov.pl; dr inż. Maciej Jaroszewski, Politechnika Wrocławska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: maciej.jaroszewski@pwr.wroc.pl; prof. dr hab. inż. Janusz Fleszyński, Politechnika Wrocławska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: janusz.fleszynski@pwr.wroc.pl