



Aleksandra GASPÉROWICZ¹, Przemysław RANACHOWSKI², Feliks REJMUND²

Instytut Elektrotechniki, Oddział Wrocław (1), Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa (2)

Strukturalne i ultradźwiękowe badania jednorodności izolatorowego betonu polimerowego

Streszczenie. Praca zawiera opis badań próbek betonów polimerowych izolatorów średniego napięcia. Badania objęły próbki pni izolatorów po krótkim oraz po długim czasie wibrowania homogenizującego materiał w procesie technologicznym. Opisano specjalną procedurę przygotowania zglądów do analizy strukturalnej. Badania mikroskopowe obejmowały ocenę mikrostruktury betonu polimerowego pod kątem zawartości i rozkładu wypełniaczy w osnowie organicznej, występowania niejednorodności i porów oraz efektów grawitacyjnych. Opisano również warstwy brzegowe przekrojów pni. Próbki poddano badaniom ultradźwiękowym w celu stwierdzenia przydatności techniki akustycznej do oceny jednorodności i właściwości sprężystych kompozytu polimerowego. Pomiarzy potwierdziły przydatność metody akustycznej do badań tworzywa izolatorowego tego typu. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych powiązano z parametrami mikrostruktury materiału. Wykonane badania, obok kompleksowego uwidocznienia cech budowy tworzywa, pozwoliły również na ocenę procesu technologicznego homogenizacji betonu polimerowego.

Abstract. (Homogeneity Investigation of Polymer Concrete Insulators Using Optical and Ultrasonic Methods). The work presents results of structural and ultrasonic research of polymer concrete samples from a core of medium voltage overhead insulators. The first group of samples came from the material after a long time of vibrating in technological process of homogenization. The second group originated from a core of insulator after a short period of vibrating. The main purpose of research was to describe the microstructure of samples, in particular, find structural defects and finally, compare the texture of material from both groups. The examination made it possible to determine some correlations between the microstructure of polymer concrete and the parameters of ultrasonic wave propagation. Thanks to the research it was also easier to formulate technological suggestions in relation to the process of fabricating material

Słowa kluczowe: beton polimerowy, mikroskopia strukturalna, badania ultradźwiękowe.

Keywords: polymer concrete, structural microscopy, ultrasonic research.

Wstęp

Materiały kompozytowe zawierające beton i polimery opracowano po raz pierwszy około 30 lat temu, równoległe w USA oraz w Japonii [1, 2].

Można je podzielić następująco:

- Betony modyfikowane polimerami (ang. PCC-Polymer Cement Concrete lub PPCC-Polymer Portland Cement Concrete);
- Betony impregnowane polimerami (ang. PIC-Polymer Impregnated Concrete),
- Betony polimerowe (ang. PC-Polymer Concrete).

Od lat 1980-tych coraz większego znaczenia nabierają betony polimerowe (PC). Są one stosowane do naprawy elementów betonowych z cementu portlandzkiego, jako wylewki na podłogi, mosty, drogi itp., jako wyściółki antykorozyjne w przewodach ściekowych oraz podłogi odporne na chemikalia. Z betonów polimerowych wykonywane są również wyroby odlewane, takie jak rurociągi systemów irygacyjnych, elementy elektroizolacyjno-konstrukcyjne, zbiorniki na wodę i kwasy, dachówki, pustaki, panele o wyglądzie sztucznego marmuru, elementy budowlane typu sandwich z rdzeniem lekkim itp. [1, 2].

Betony polimerowe składają się z 70-95% wag. napelniaczy różnego rodzaju, zwykle mineralnych i 5-30% wag. lepszczą organicznego. Lepszczą zawiera żywice o małej lepkości, utwardzalne w temperaturach bliskich otoczeniu (epoksydowe, winyloestrowe, poliestrowe, akrylowe, fenolowe; nie zawierające wody) oraz dodatki inicjujące proces utwardzania w temperaturach otoczenia i dodatki ułatwiające przetwarzanie.

Zaletami betonów polimerowych są między innymi: niska cena wynikająca z obecności dużej zawartości tanich napelniaczy i małej energochłonności procesu przetwarzania oraz możliwość modyfikacji właściwości materiału w szerokim zakresie w prosty sposób, przez zmianę składu tworzywa.

Prace w zakresie zastosowania betonów polimerowych do celów elektrotechnicznych rozpoczęto w połowie lat 1970-tych w USA. Miały one na celu opracowanie materiału o małej energochłonności procesu przetwarzania i właściwościach umożliwiających zastąpienie wyrobów elektrotechnicznych ze szkła i porcelany, zwłaszcza w zastosowaniach napowietrznych.

Od kilkunastu lat pracują izolatory wykonane z betonów polimerowych na liniach SN, WN i NN w USA, krajach Ameryki Południowej, Anglii oraz Indiach [3, 4].

W Instytucie Elektrotechniki, Oddział we Wrocławiu, opracowano mieszanki polimerobetonów (których skład jest chroniony zgłoszeniem patentowym [5]) oraz technologię ich przetwarzania na izolatory, zarówno wewnętrzne jak i napowietrzne. Opracowane tworzywo ma dobre właściwości elektryczne i mechaniczne, a wykonane z niego prototypy izolatorów napowietrznych pracują niezawodnie od 2 do 3,5 roku pod napięciem 20 kV przy obciążeniach zginających i rozciągających. Są odporne na uderzenie i pęknięcie oraz nagłe zmiany temperatury [6-8].

Przedstawione w pracy badania objęły próbki betonów polimerowych z pni izolatorów SN, opracowanych i wyprodukowanych w Oddziale Wrocławskim Instytutu Elektrotechniki. Klosze izolatorów wykonane były z kauczuku silikonowego. Materiał pni zawierał około 80% wypełniacza dwójakiego rodzaju – piasku elektroizolacyjnego i mączki kwarcowej, w odpowiedniej proporcji. Osnowę stanowiła żywica akrylowa. Jednym z najważniejszych etapów produkcji, warunkującym właściwą homogenizację tworzywa, jest wibrowanie. W przypadku pnia izolatora oznaczonego **a** proces ten prowadzono przez 6 minut. Materiał pnia izolatora oznaczonego **b** wibrowano przez 3 minuty. Amplituda wibrowania była w obu wypadkach taka sama i wynosiła $0,8 \div 1,3$ mm.

Celem badań akustycznych i strukturalnych było sprawdzenie jednorodności tworzywa pni izolatorów **a** i **b**. Jednocześnie podjęto próbę powiązania cech strukturalnej budowy betonu polimerowego z parametrami propagacji fal

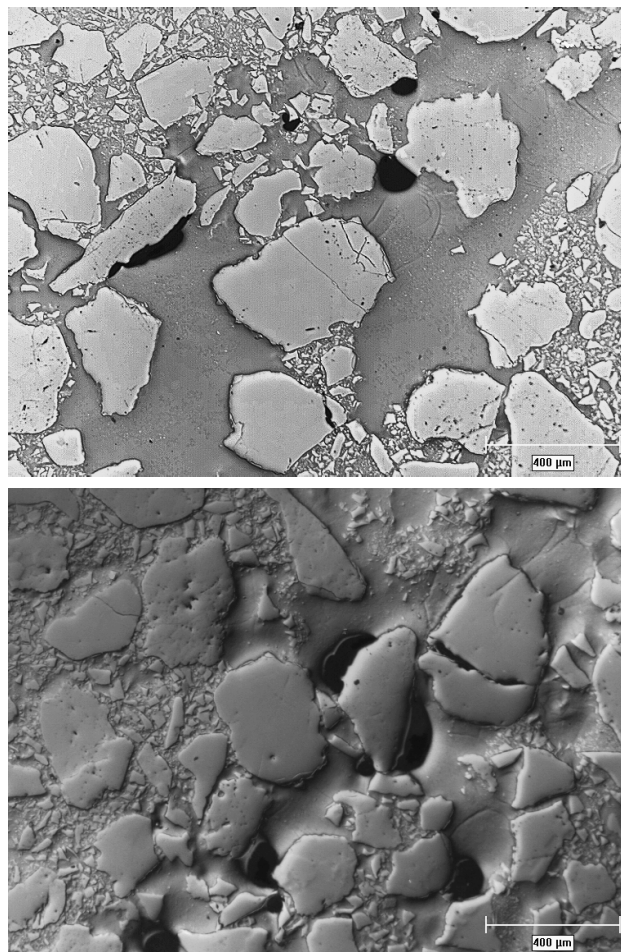
ultradźwiękowych. Wyznaczone prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych pozwoliły na wyliczenie modułu sprężystości Younga oraz liczby Poissona badanego materiału.

Badania strukturalne

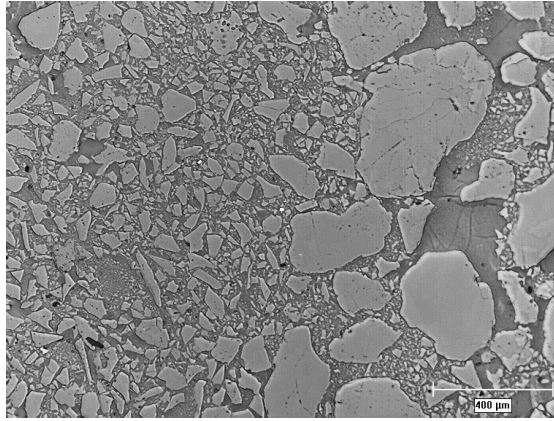
Do badań mikroskopowych wycięto z pni izolatorów **a** i **b** po 3 plastry o grubości 2 mm w kierunku poprzecznym do wzdłużnej osi elementów. Próbki pochodziły z dolnej, środkowej oraz górnej części pnia. Zarówno proces cięcia, jak i późniejszej obróbki nie mógł być prowadzony w sposób standardowy, gdyż groziłoby to wykruszeniem ziaren wypełniacza. Cięcie wykonano przy pomocy tarczy diamentowej zawierającej ziarna o wielkości poniżej 12 μm (zazwyczaj stosowane 60 \pm 90 μm). Konieczne było intensywne chłodzenie wodą, by nie doprowadzić do wypalenia matrycy polimerowej. Dzięki delikatnie przeprowadzonemu cięciu możliwa była rezygnacja ze szlifowania powierzchni próbek. Polerowanie wykonano z wykorzystaniem roztworu o zmodyfikowanym, w stosunku do klasycznej procedury, składzie. Zawartość żelu SiO_2 podwyższono trzykrotnie, przy rezygnacji z NaClO , na korzyść nieco większej ilości KOH . W ten sposób uzyskano równomierną szybkość polerowania ziaren wypełniacza oraz osnowy. Po wypłukaniu w chemicznie aktywnych detergentach i wysuszeniu w parach alkoholu, zgłady były gotowe do badań mikroskopowych. Wykorzystano w nich mikroskop optyczny (MO) sprzężony z komputerowym analizatorem obrazu.

Badania pozwoliły na stwierdzenie dużego podobieństwa próbek pochodzących z tych samych pni izolatorów. Nie wykryto jakichkolwiek efektów grawitacyjnych oraz obecności odmiennych warstw brzegowych przy bocznych powierzchniach próbek. Przyleganie kauczuku silikonowego do powierzchni betonu polimerowego nie budziło zastrzeżeń. Średnia zawartość wypełniacza była dla obu badanych pni podobna i wynosiła około 80%. Jednak w przypadku próbek z pnia izolatora oznaczonego **b** stwierdzono występowanie szeregu obszarów pozbawionych ziarn wypełniacza – rysunek 1. Duże ziarna piasku, o rozmiarach w zakresie 100 \pm 350 μm , miały w wielu wypadkach pęknięcia poprzeczne i obrzeżne odspojenia od matrycy. Wykryto również obecność porów o relatywnie dużych wymiarach – rzędu 100 μm . Przylegały one najczęściej do dużych ziaren kwarcu – rysunki 1 i 2. Pory obecne były jednak głównie w ograniczonych obszarach i uśredniona ich zawartość nie przekraczała 0,5%. Badania próbek grupy **b** ujawniły ogólnie niezadowalającą jednorodność. Przejawiała się ona, obok wspomnianych efektów, również obecnością obszarów zawierających wyłącznie duże ziarna piasku oraz przeciwnie – posiadających prawie wyłącznie drobne ziarna mączki kwarcowej, o wymiarach nie przekraczających 80 μm . Na rysunku 3 przedstawiono granicę takich obszarów.

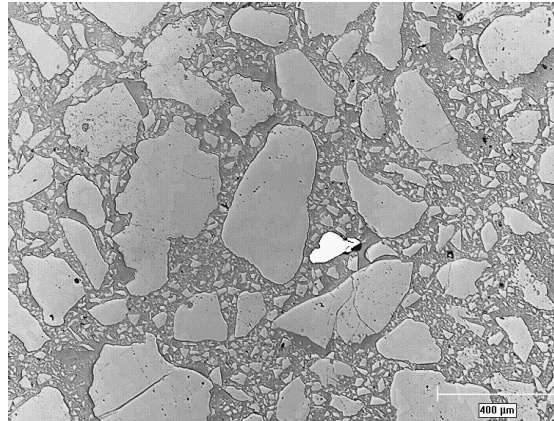
Próbki z pnia izolatora ozn. **a** posiadały dobrą homogeniczność. Ziarna piasku i mączki kwarcowej rozłożone były jednorodnie w osnowie polimerowej – rysunek 4.



Rys. 1, 2. Obrazy strukturalne tworzywa pnia izolatora ozn. **b** w powiększeniu 50 razy. U góry bez kontrastu, u dołu – w kontraście interferencyjno-fazowym Nomarskiego. Uwagę zwracają niejednorodności granulometryczne oraz duże pory



Rys. 3. Obraz strukturalny tworzywa pnia izolatora ozn. **b** w powiększeniu 50 razy. Widoczna granica obszarów zawierających różne frakcje wypełniacza



Rys. 4. Obraz strukturalny tworzywa pnia izolatora ozn. **a** w powiększeniu 50 razy. Materiał wykazuje dobrą jednorodność. Uwagę zwraca białe pole powstałe po wypadnięciu ziarna kwarcu

Duże pory występowały jedynie incydentalnie, brak było obszarów pozbawionych wypełniacza lub zawierających tylko jedną jego frakcję. Rzadkie były również pęknięcia matrycy (widoczne w obrazach grupy **b** na rysunkach 1 i 3). Istotniejszym defektem, widocznym jednak na wszystkich zglądach, pozostały pęknięcia dużych ziaren kwarcu oraz ich odspojenia od matrycy. Analogiczne efekty obserwuje się także w tworzywach ceramicznych o dużej zawartości kwarcu, jak porcelana elektrotechniczna C 110 i w mniejszym stopniu porcelana rodzaju 120 oraz kordieryt.

Pomiary ultradźwiękowe

Pomiary akustyczne wykonano na układzie zaprojektowanym i zbudowanym specjalnie do badań zarówno próbek, jak izolatorów długopniowych. Mały ciężar i gabaryty zestawu, w połączeniu z dużą dokładnością, umożliwiają także wykonanie badań terenowych - bezpośrednio na stacjach energetycznych. Konstrukcja układu i zasada jego działania opisane zostały w pracach [9, 10], metodyka pomiarowa przedstawiana była również na VII Sympozjum EUI '99 [11].

Pomiary akustyczne wykonano na trzech próbkach wyciętych z obu pni. Próbkę, pochodzącą z górnej, środkowej i dolnej części izolatorów, badane były w kierunku równoległym i prostopadłym do osi podłużnej.

Mierzono prędkość propagacji fal podłużnych (c_L) i poprzecznych (c_T) oraz amplitudowy współczynnik tłumienia (α). Ze względu na wysoką tłumienność tworzywa pomiary były trudne i wymagały zastosowania głowic o częstotliwości $f = 2$ MHz. Dokładność pomiaru prędkości fal ultradźwiękowych wynosiła ± 10 m/s, natomiast współczynnika tłumienia $\pm 0,08$ dB/cm. Na podstawie zarejestrowanych prędkości c_L i c_T , przy znanej gęstości

materiału $\rho = 2,2$ g/cm³, obliczono (wykorzystując znane zależności [11, 12]) stałe sprężyste materiału. Wyniki badań zestawiono w tabelach 1 i 2. Z uwagi na znaczny rozrzut wyników, szczególnie dla próbek z pnia izolatora **b**, przedstawiono zakresy wartości parametrów.

Pomiary akustyczne próbek pochodzących z różnych części pnia nie wykazały istotniejszych różnic pomiędzy nimi. Nie stwierdzono częstych w przypadku izolatorów ceramicznych niejednorodności na długości pnia. Również wartości c_L i c_T , mierzone prostopadle i równoległe do wzdłużnej osi izolatorów, można w granicach błędów uznać za takie same. Nieco wyższe było jedynie tłumienie w osi prostopadłej próbek.

Porównując parametry akustyczne i sprężyste tworzywa izolatorów **a** i **b** stwierdzono wyraźnie gorszą jednorodność materiału w grupie próbek **b**. Rozrzut wszystkich mierzonych parametrów był znacznie wyższy niż w przypadku grupy **a**. Tworzywo izolatora **b** wykazywało wyższe tłumienie - wartość uśredniona $\alpha_{sr} = 4,35$ dB/cm wobec $\alpha_{sr} = 4,03$ dB/cm dla materiału **a**. Uśrednione prędkości propagacji fal ultradźwiękowych były dla tworzywa **b** niższe niż w przypadku **a**: $c_L = 3760$ i $c_T = 2380$ m/s w stosunku do $c_L = 3980$ oraz $c_T = 2430$ m/s. Konsekwencją tego były niższe wartości modułu Younga E i liczby Poissona ν w przypadku próbek grupy **b**.

Badania ultradźwiękowe potwierdziły wyniki obserwacji mikroskopowych, które wskazywały na prawidłową budowę strukturalną tworzywa izolatora **a** oraz niezadowalającą jednorodność i podwyższoną porowatość w przypadku tworzywa **b**.

Pogłębione badania porównawcze poszczególnych próbek oraz ich fragmentów pozwoliły na powiązanie

wyników pomiarów ultradźwiękowych i cech budowy strukturalnej betonu polimerowego. Stwierdzono, iż obecność porów, a szczególnie ich zagęszczenia, powoduje obniżenie prędkości fal ultradźwiękowych – zarówno podłużnych, jak i poprzecznych. Występująca lokalnie kilkuprocentowa porowatość może obniżyć wartości c_L i c_T nawet o około 200 m/s. Podwyższeniu o dziesiąte części dB/cm ulega również wartość współczynnika tłumienia. Nadspodziewanie duży wpływ na tłumienność materiału zaobserwowano również w przypadku większych niejednorodności w rozkładzie przestrzennym faz wypełniacza. Niejednorodności granulometryczne nie powodowały jednak wyraźnego obniżenia prędkości fal podłużnych i poprzecznych. Zbliżone zależności stwierdzono również dla badanych od szeregu lat ceramicznych tworzyw elektrotechnicznych [11-13].

Tabela 1. Zestawienie zakresów prędkości propagacji fal podłużnych c_L oraz poprzecznych c_T (w m/s) i amplitudowego współczynnika tłumienia α (w dB/cm), zarejestrowanych dla próbek z pnia izolatora **a** oraz **b**. Prędkości fal ultradźwiękowych mierzone w kierunku równoległym (\parallel) oraz prostopadłym (\perp) do podłużnej osi izolatorów

a				
$c_L \parallel$	$c_L \perp$	$c_T \parallel$	$c_T \perp$	$ \alpha $
3910	3990	2360	2390	3,20
÷	÷	÷	÷	÷
3980	4050	2490	2480	4,86

b				
$c_L \parallel$	$c_L \perp$	$c_T \parallel$	$c_T \perp$	$ \alpha $
3730	3580	2390	2270	3,82
÷	÷	÷	÷	÷
3940	4000	2390	2500	5,42

Tabela 2. Zestawienie zakresów oraz wartości średniego modułu sprężystości Younga E (w GPa) oraz liczby Poissona ν wyznaczonych dla próbek z pnia izolatora **a** oraz **b**

a			
E	E_{sr}	ν	ν_{sr}
29,7	31,2	0,18	0,20
÷		÷	
32,5		0,22	

b			
E	E_{sr}	ν	ν_{sr}
26,4	29,5	0,15	0,18
÷		÷	
32,4		0,21	

Wnioski

Na podstawie wykonanych badań mikroskopowych oraz ultradźwiękowych opisano budowę strukturalną tworzywa polimerobetonowego pnia izolatorów średniego napięcia. Pozwoliło to na ocenę technologicznego procesu ich wytwarzania.

Badania wykazały, że dla uzyskania dobrej jednorodności materiału niezbędny jest odpowiednio długo prowadzony proces wibrowania – co najmniej 5 minut przy amplitudzie około 1 mm. Wiąże się to z właściwościami tiksotropowymi układu i obecnością struktury, która musi ulec zniszczeniu w trakcie wibrowania. W przypadku zbyt krótkiego czasu homogenizacji uzyskane tworzywo posiada szereg defektów, głównie o charakterze teksturalnym. Obecna jest podwyższona zawartość porów oraz pęknięcia – nie tylko przylegające do ziarn, lecz i biegnące w głąb matrycy. Powoduje to wyraźne pogorszenie właściwości użytkowych materiału. Na tej podstawie wyciągnąć można istotny wniosek dotyczący technologii wytwarzania tworzywa, z punktu widzenia jego wytrzymałości mechanicznej. Właściwa homogenizacja ma istotniejsze znaczenie niż ewentualne odsianie grubszych ziarn

wypełniacza (piasku elektroizolacyjnego). Obrzeźne pęknięcia, obecne głównie wokół dużych ziarn kwarcu, są mniej szkodliwe niż spękania osnowy obserwowane jedynie w próbkach grupy **b**, o niedostatecznej jednorodności.

Badania pozwoliły ponadto na wyznaczenie parametrów akustycznych i sprężystych tworzywa. Powiązano cechy budowy strukturalnej betonu polimerowego z parametrami propagacji fal ultradźwiękowych. Stworzono w ten sposób podstawy do opracowania metodyki badań nieniszczących elementów wykonanych z materiału polimerobetonowego.

Badania finansowane były częściowo przez Komitet Badań Naukowych, Grant Nr 4 T08D 026 22

LITERATURA

- [1] Fowler D.W., Current Status of Polymers in Concrete, 5th International Conference on Polymers in Concrete, Brighton, England, 22-24 September 1987, 1.1/Session 1
- [2] Okada K., Ohama J., Recent Research and Applications on Concrete Polymer Composites in Japan, 5th International Conference on Polymers in Concrete, Brighton, England, 22-24 September 1987, 1.3/Session
- [3] Gunasekaran M., Boneti H. J., Performance of Polymer Concrete Insulators in Latin America, IEEE Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 20-23 October (1996), San Francisco, USA, 422
- [4] Gunasekaran M., Polymer Concrete: A Viable Low-Cost Material for Innovative Power Systems, Proc. 5th IEEE Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials, 25-30 May 1997, Seoul, South Korea, 70
- [5] Zgłoszenie patentowe nr P 329258, Dielektryczna kompozycja konstrukcyjna (1998)
- [6] Gasperowicz A., Stankiewicz J., Kramarzewski A., Jaroszewski M., Laboratoryjne i terenowe badania starzeniowe prototypów izolatorów napowietrznych z nowego materiału kompozytowego, Mat. IV Ogólnopolskiej Konf. Naukowo-Techniczna NIWE 2000, 27-29 czerwca 2000, 181-185
- [7] Gasperowicz A., Tymań A., Sojda E., Rutkowski J., Badania wysokonapięciowe prototypów izolatorów napowietrznych z energooszczędnego materiału kompozytowego, Mat. IV Konf. Nauk. "Postępy w elektrotechnologii" Jamrozowa Polana, 14-15 września 2000, 89-93
- [8] Gasperowicz A., Properties of Outdoor Insulators Made of Polymer Concrete, Conference 12-14 September 2000, Casta-Pila, Slovak Republik, 122
- [9] Ranachowski P., Fleszyński J., Rejmund F., Ultradźwiękowe i strukturalne badania porcelanowych izolatorów długopniowych, Przegląd Elektrotechniczny, Mat. VI Ogólnopolskiego Symp. Inż. Wys. Napięć IW'2002, 10 (2002), 256-261
- [10] Ranachowski P., Rejmund F., Fleszyński J., Badania procesów starzeniowych w ceramicznym tworzywie izolatorowym rodzaju 120, Mat. VII Ogólnopolskiej konferencji naukowo-technicznej Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce NIWE 2003, Wrocław – Szklarska Poręba (2003)
- [11] Ranachowski J., Ranachowski P., Metody akustyczne w badaniach ceramicznych izolatorów energetycznych, Materiały VII Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia EUI '99. Zakopane – Kraków (1999), 361-368
- [12] Wehr J., Pomiary prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych, Warszawa, PWN (1972), Rozdział II
- [13] Ranachowski J., Zastosowanie prób ultradźwiękowych do badań jednorodności tekstury izolatorów pniowych, Szkło i ceramika, 6 (1967)

Autorzy: dr inż. Aleksandra Gasperowicz, Instytut Elektrotechniki, Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55/61, 50-369 Wrocław, E-mail: gasper@iel.wroc.pl; 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