

Krzysztof KOGUT  
Krzysztof KASPRZYK

## WPŁYW ZAWARTOŚCI WŁÓKNA SZKLANEGO NA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE I MECHANICZNE POLIAMIDOWEJ OSŁONY IZOLACYJNEJ OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ

**STRESZCZENIE** *W pracy przedstawiono mechanizmy wyładowań powierzchniowych na próbkach wykonanych z poliamidu oraz poliamidu z dodatkiem włókna szklanego, wykorzystywanych jako osłony izolacyjne beziskiernikowych ograniczników przepięć. Ograniczniki podczas prób napięciem impulsowym ulegały uszkodzeniu na skutek przeskoków powierzchniowych.*

*Przeskoki powierzchniowe prowadzą do rozwarstwienia pomiędzy izolacyjną osłoną a stosem warystorów. W celu określenia wpływu materiału wykonanego na osłonę, na rozwój wyładowania, wykonano pomiary napięć przeskoków. Określono rolę ładunku powierzchniowego w rozwoju wyładowania.*

*Aby wykazać znaczenie ładunku przestrzennego w materiale stosowanym na osłony wykonano pomiary prądów termicznie stymulowanych (TSD). Na podstawie danych podanych przez producentów porównano wytrzymałość mechaniczną materiałów.*

**Słowa kluczowe:** *ogranicznik przepięć, wyładowanie powierzchniowe, ładunek powierzchniowy i przestrzenny, poliamid, włókno szklane, prąd termicznie stymulowany*

---

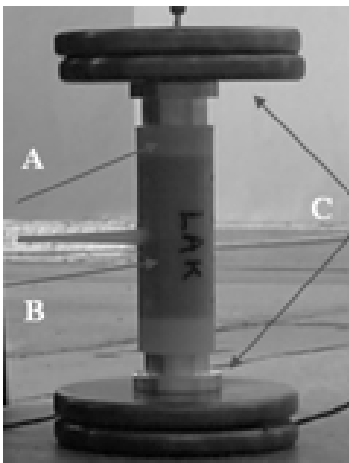
**mgr inż. Krzysztof KOGUT**  
e-mail: k.kogut@iel.wroc.pl

**dr inż. Krzysztof KASPRZYK**  
e-mail: k.kasprzyk@iel.wroc.pl

Instytut Elektrotechniki, Oddział we Wrocławiu  
Pracownia Materiałów Ceramicznych i Biotworzyw

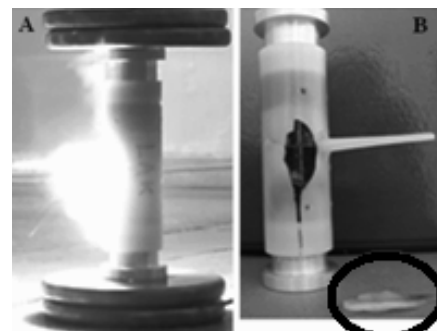
## 1. WSTĘP

Urządzenia zasilane z sieci energetycznej wymagają bezpiecznego dostarczenia energii elektrycznej. Zagrożeniem dla bezawaryjnego funkcjonowania wielu urządzeń elektrycznych i elektronicznych są przebiegi. Wyróżnia się następujące rodzaje przebiegów: powstające na wskutek wyładowań atmosferycznych oraz łączeniowe i komutacyjne. W celu zabezpieczenia systemów elektroenergetycznych przed ich niszczącym działaniem wykorzystuje się tlenkowe ograniczniki przebiegów chroniące zarówno sieć, jak i odbiorniki. Podstawową częścią ogranicznika jest stos warystorów wykonanych z tlenku cynku z dodatkiem szeregu tlenków innych metali. Stos ten umieszczony jest w obudowie wykonanej z materiału izolacyjnego (rys. 1). Warystory wykonane są z ceramiki, charakteryzują się nieliniową charakterystyką napięciowo-prądową.



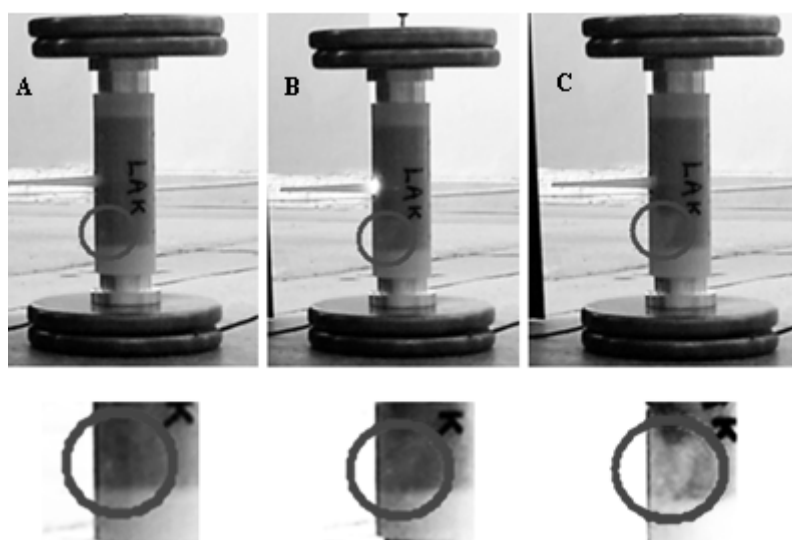
**Rys. 1. Beziskiernikowy ogranicznik przebiegów:** A – osłona izolacyjna – poliamid, B – blok warystorów, C – okucia [2]

Testy beziskiernikowych ograniczników przebiegów wykonuje się zarówno przy impulsach napięciowych, jak i prądowych o dużej wartości amplitudy [1]. Próby napięciem impulsowym wykonane przez autorów pokazały, że wyładowania powierzchniowe powstałe w czasie prób mogą powodować trwałe uszkodzenia poliamidowej osłony ogranicznika (rys. 2) [2].



**Rys. 2. Wyładowanie powierzchniowe na ograniczniku przebiegów (A) oraz uszkodzenie powstałe w jego wyniku (B) [2]**

Podczas wykonywania prób zarejestrowano lokalne wyładowania pomiędzy warystorami, jak również wyładowanie w środkowej części ogranicznika. Podczas kolejnych prób zaobserwowano rozwarstwienie pomiędzy osłoną izolacyjną wykonaną z poliamidu a blokiem warystorów (rys. 3). Prawdopodobną przyczyną dalszego rozwarstwiania, a zatem osłabienia wytrzymałości elektrycznej, były wyładowania rozwijające się na granicy powierzchni ceramicznych warystorów oraz izolacyjnej osłony, efektem czego było całkowite uszkodzenie (oderwanie poliamidowej osłony) tlenkowego ogranicznika przepięć (rys. 2).

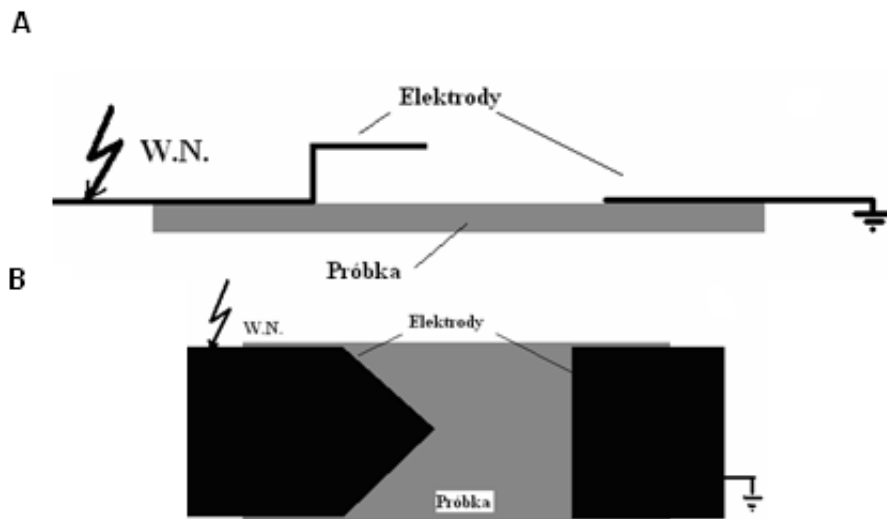


**Rys. 3. Rozwarstwienie izolacji poliamidowej od powierzchni bloku warystorów:**

- A – obraz przed wyładowaniem;
- B – obraz w czasie wyładowania;
- C – obraz po wyładowaniu z wyraźnym rozwarstwieniem [3]

## 1. 1. Wytrzymałość elektryczna izolacyjnych osłon ograniczników przepięć

Próbki z czystego poliamidu oraz poliamidu z 20%, 40% oraz 50% dodatkiem włókna szklanego wykonano w postaci płaskich płytek o grubości 3 mm, szerokości 50 mm i długości 110 mm. Poddano jej próbom napięciowym w układzie elektrod z elektrodą ostrzową (napięciową) i płaską (uziemiającą), gdzie koniec elektrody ostrzowej był uniesiony nad badaną próbką. Odległość pomiędzy elektrodami wynosiła 30 mm (rys. 4).



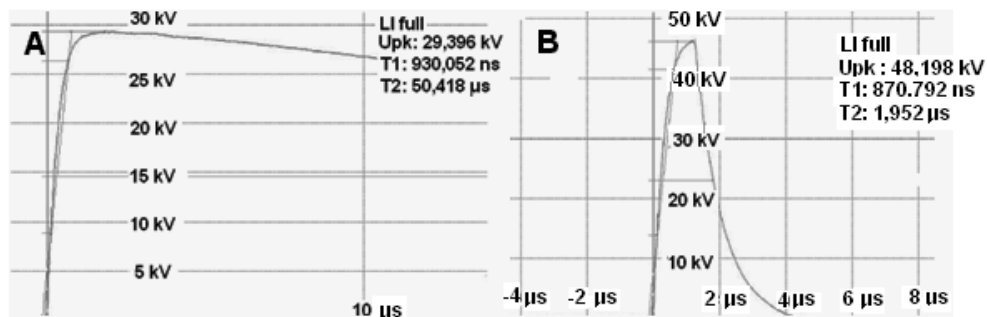
**Rys. 4. Układ elektrod do pomiaru napięć przeskoku:**  
(A) – widok z boku, (B) – widok z góry

Do pomiarów został użyty Generator Napięć Udarowych Haefely® 700 kV, 35 kJ (rys. 5).



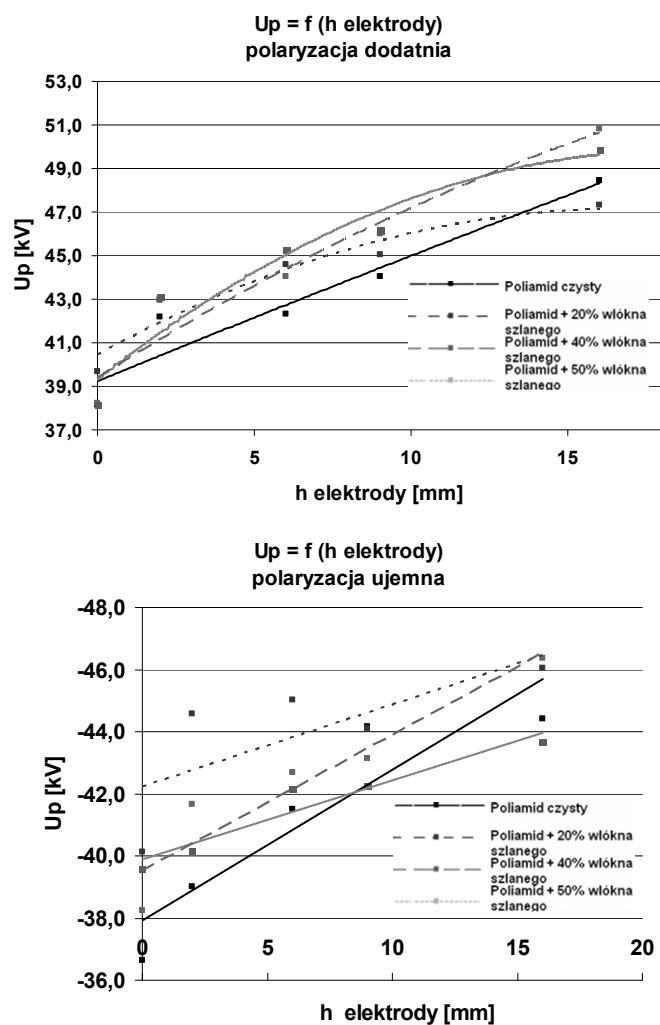
**Rys. 5. Generator Napięć Udarowych HAEFELY® 700 kV, 35 kJ [2]**

Jest to siedmiostopniowy generator w układzie Marxa. Umożliwia on uzyskanie znormalizowanych udarów, jak również udarów o znacznie większej stromości narostu napięcia. Wykresy udarów napięciowych: znormalizowanego 1,2/50  $\mu$ s oraz udaru uciętego przedstawiono na rysunku 6.



**Rys. 6. Wykresy napięć udarowych:**  
 A – udar znormalizowany, B – udar ucięty na grzbiecie

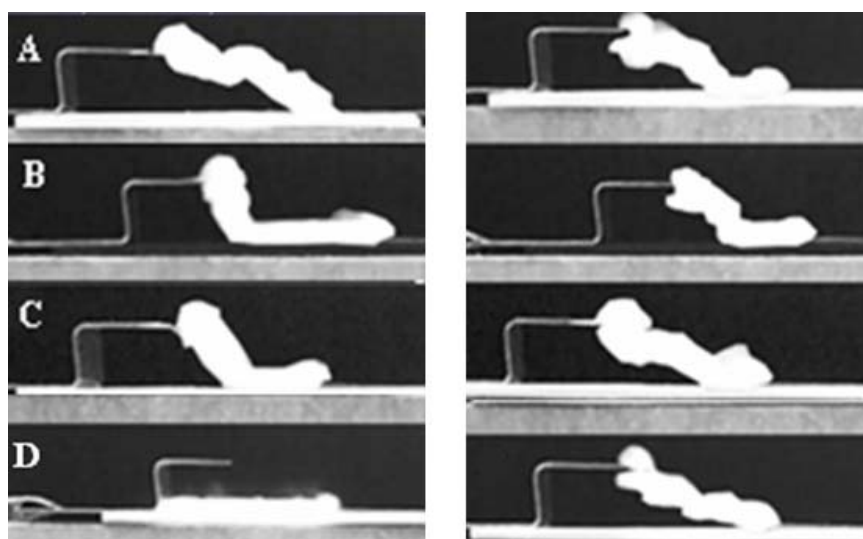
Wykonano pomiary napięć przeskoku dla różnej wysokości elektrody ostrzowej (rys. 7) oraz zarejestrowano trajektorię wyładowań (rys. 8) przy napięciu impulsowym obu biegunowości.



**Rys. 7. Napięcie przeskoku w funkcji wysokości elektrody ostrzowej**

Na podstawie pomiarów napięcia przeskoku można stwierdzić, że dodatek włókna szklanego powoduje zwiększenie wytrzymałości powierzchniowej poliamidowych próbek. Napięcie przeskoku przy polaryzacji dodatniej jest o ok. 10% wyższe dla próbek z 40% zawartością włókna szklanego, niż dla próbek z czystego poliamidu. W przypadku polaryzacji ujemnej można stwierdzić zwiększenie wytrzymałości elektrycznej również o ok. 10% dla próbek z 20% oraz 40% zawartością włókna szklanego.

Trajektorię wyładowań podczas prób napięciem impulsowym przedstawiono na rysunku 8.



**Rys. 8. Obrazy wyładowań na próbkach w układzie z elektrodą ostrzową uniesioną nad próbką na 16 mm, po lewej polaryzacja ujemna, po prawej polaryzacja dodatnia:**

A – poliamid czysty, B – poliamid z 20 % włókna szklanego, C – poliamid z 40% włókna szklanego, D – poliamid z 50% włókna szklanego

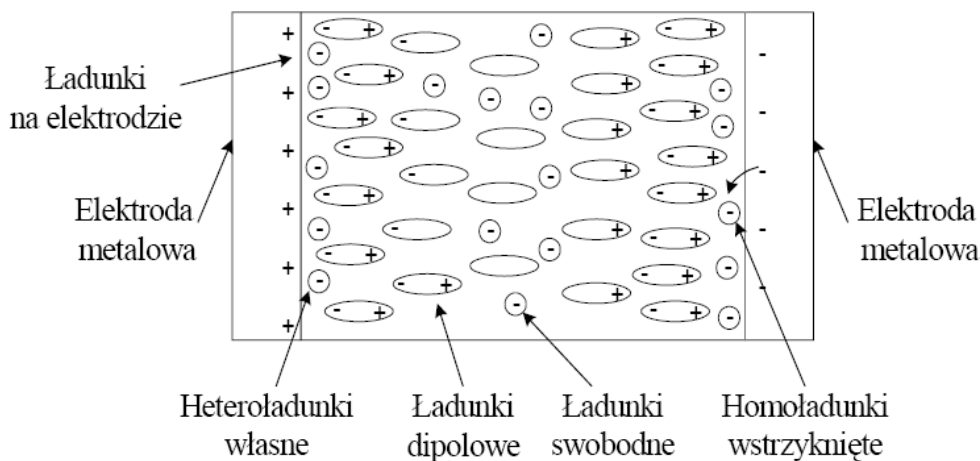
Rozwój wyładowań powierzchniowych bardzo silnie związany jest z materiałem, po którego powierzchni mają one przebiegać [4, 5]. Jak widać na rysunku 8, wyładowania podczas prób napięciem impulsowym mogą mieć różną trajektorię, na której kształt mają wpływ czynniki, takie jak: ładunek powierzchniowy, ładunek przestrzenny, przewodnictwo materiału, rozkłady ładunków różnoimiennych i jednoimiennych na powierzchni izolatora. W pobliżu rozwijającej się lawiny powierzchnia dielektryka narażona jest na bombardowanie elektronami, jonami i kwantami promieniowania emitowanego przez pobudzone atomy. Pod wpływem tych narażeń materiał dielektryka pokrywa się ładunkiem, którego gęstość i znak zależą od rodzaju materiału i narażeń elektrycznych [6], w związku z czym ładunek generowany na powierzchni będzie uczestniczył w rozwoju wyładowania. Ładunek powierzchniowy będzie powodował odpychanie bądź też przyciąganie czoła rozwijającej się lawiny. Ten drugi przypadek

powoduje jednocześnie uszkodzenie powierzchni materiału. W niektórych przypadkach zauważa się tzw. efekt pośredni. W początkowej fazie wyładowanie rozwija się w gazie, a następnie kierowane jest do powierzchni dielektryku (rys. 8A – polaryzacja dodatnia).

Interesującym przypadkiem jest wyładowanie, które rozwijało się bezpośrednio po powierzchni próbki od krawędzi elektrody umieszczonej na próbce do elektrody uziemionej (rys. 8D – polaryzacja ujemna), pomimo, że większa niejednorodność pola elektrycznego występuje przy ostrzu elektrody napięciowej. Ładunek powierzchniowy na próbce w bardziej znaczący sposób uczestniczy w rozwoju wyładowania, niż ładunek przestrzenny wokół elektrody ostrzowej.

## 1. 2. Pomiar prądu termicznie stymulowanego (TSD)

Pomiary prądu TSD pozwalają określić rodzaje relaksacji i wyodrębnić relaksację od ładunku przestrzennego [3]. Rys. 9 ilustruje spolaryzowaną próbkę dielektryczną z ładunkami dipolowymi i swobodnymi własnymi oraz wstrzykniętymi, w tym heteroładunkiem, homoładunkiem oraz swobodnym ładunkiem wyindukowanym na elektrodach [7].



**Rys. 9. Model spolaryzowanego dielektryka [7]**

W miarę wzrostu temperatury dipole i ładunki zwiększają swoją ruchliwość. Dipole ulegają depolaryzacji, a ładunki swobodne dryfują w polu elektrycznym. Wskutek przewodnictwa elektrycznego zanikają. Z tymi procesami związane są zmiany ładunków swobodnych na elektrodach. Wskutek przejścia ładunków z jednej elektrody do drugiej, za pomocą elektrometru mierzy się prąd TSD [7].

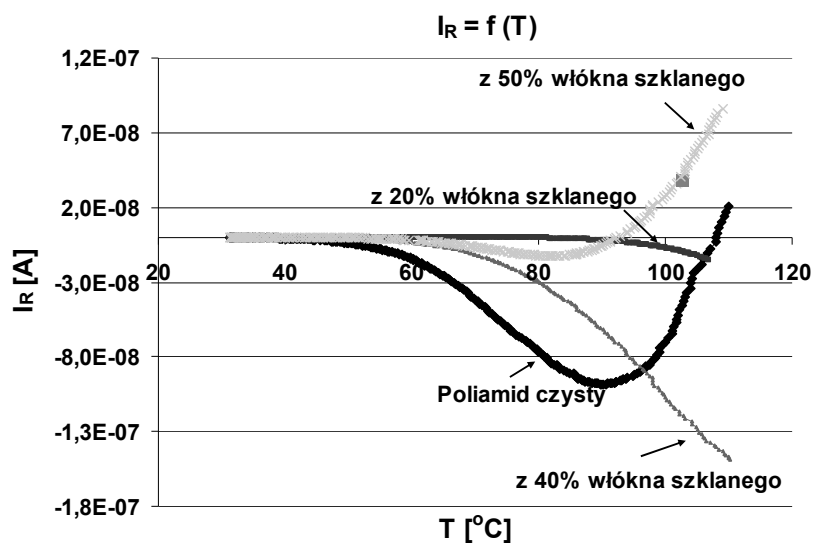
Do pomiaru prądów TSD został użyty trójelektrodowy układ pomiarowy znajdujący się w komorze Bindera, w której podnoszono temperaturę podczas polaryzacji próbek, jak i samego pomiaru, wykorzystano również elektrometr mierzący prąd oraz komputerowy program rejestrujący i analizujący wyniki (rys. 10).



Rys. 10. Układ wykorzystany do pomiarów prądu TSD

Do pomiarów przygotowano próbki w formie krążków. Polaryzacja próbek przed pomiarem: 100 V, temperatura 60°C. Podczas pomiaru temperaturę zwiększono od temperatury otoczenia do 120°C.

Wykresy prądu depolaryzacji w funkcji temperatury dla próbek z czystym poliamidem oraz z zawartością włókna szklanego przedstawiono na rysunku 11.

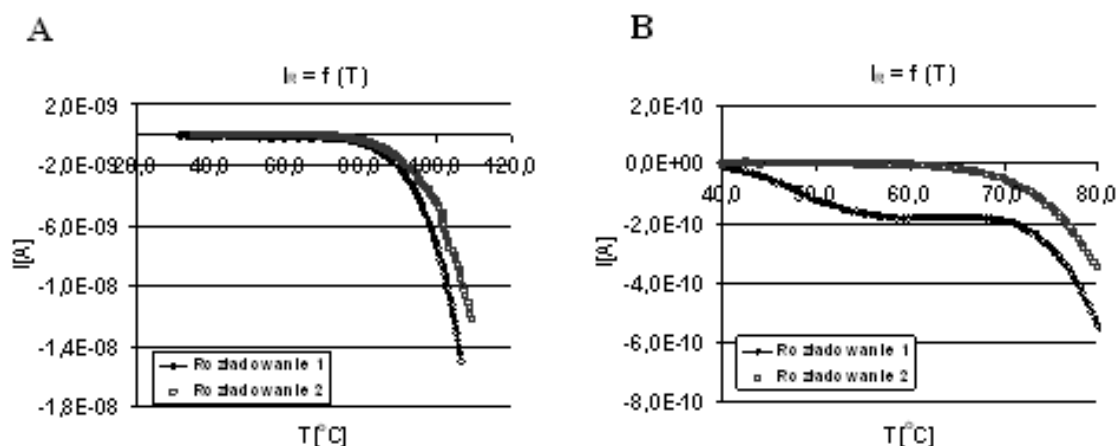


Rys. 11. Wykresy prądów depolaryzacji w funkcji temperatury



Pomiary prądów termicznie stymulowanych (TSD) są trudne, a analiza wyników skomplikowana. Wykonuje się pomiar dwufazowy (dwukrotne rozładowanie), przez co uzyskane wyniki nie są obarczone znacznym błędem pomiarowym.

Istotnym punktem na wykresie (rys. 11) jest temperatura ok. 90°C. Występuje tam wyraźny pik prądu rozładowania dla próbki czystego poliamidu. Energia dostarczona do próbki powoduje uwolnienie ładunku swobodnego w próbce i przepływ prądu depolaryzacji. Dla próbek z włóknem szklanym wartość piku jest mniejsza lub pik przesunięty jest w stronę wyższych temperatur; oznacza to, że aby uwolnić „spułapkowany” ładunek swobody w próbce, trzeba dostarczyć większą energię. Mniejszy prąd TSD wynikający z lepszego unieruchomienia ładunków jest zjawiskiem korzystnym, gdyż powoduje, że ładunek swobodny, który może znaleźć się przy powierzchni próbki, nie uczestniczy w rozwoju wyładowań podczas działania ogranicznika przepięć.



**Rys. 12. Wykres prądu depolaryzacji dla próbki poliamidu z 20% zawartością włókna szklanego:** A – analiza dla większych wartości prądu, B – dokładniejsza analiza z wyraźnym pikiem prądowym wynikającym z depolaryzacji dipoli

W przypadku pomiaru dla próbki z 20% zawartością włókna szklanego, na wykresie nie widać piku prądowego (rys. 12 A), natomiast przy dokładniejszej analizie (rys. 12 B) można zauważyć pik prądowy wynikający z depolaryzacji dipoli w materiale. Można tak wnioskować, gdyż ładunki swobodne uwalniane są dopiero w wyższych temperaturach, natomiast proces relaksacji dipolowej występuje dla temperatur niższych – w granicach temperatury zeszklenia materiału.

### 1. 3. Wytrzymałość mechaniczna próbek

Na podstawie reprezentatywnych danych podanych przez producentów stwierdzono, że dodawanie włókna szklanego znacznie podnosi jego wytrzymałość mechaniczną (rozciąganie i zginanie). Wartości prób na rozciąganie wykonanych według norm ISO 527 oraz ISO 178 zestawiono w tabeli 1.

**TABELA 1**

Wytrzymałość mechaniczna czystego poliamidu oraz poliamidu z włóknem szklanym

	Poliamid czysty	Poliamid z 20% zawartością włókna szklanego	Poliamid z 40% zawartością włókna szklanego	Poliamid z 50% zawartością włókna szklanego
Napężenie zrywające, 5 mm/min, [MPa]	78	81	165	220
Wydłużenie przy zerwaniu, 5 mm/min, [%]	5,0	2,8	4,0	3,0
Moduł sprężystości przy rozciąganiu, 1 mm/min, [MPa]	2800	5 600	14 000	16 000
Napężenie zginające, 2 mm/min, [MPa]	82	130	240	320
Moduł sprężystości przy zginaniu, 2 mm/min, [MPa]	2400	5 000	12 000	14 000

Należy jednak zwrócić uwagę na technologię wykonywania osłon ograniczników, tak, aby wypełnienie materiału włóknem szklanym było równomierne i zwiększało wytrzymałość mechaniczną nie tylko lokalnie, ale w całej objętości próbki.

## 2. WNIOSKI

Wyładowania powierzchniowe powstające podczas prób napięciem impulsowym mogą powodować uszkodzenia ograniczników przepięć. Wyłado-

wania te mogą powstawać na granicy faz warystor – materiał izolacyjny, jak również na powierzchni stosu warystorowego. Podczas kolejnych pomiarów stwierdzono wystąpienie rozszczelnień powodujących osłabienie wytrzymałości elektrycznej, jak i mechanicznej układu.

W artykule skoncentrowano uwagę na mechanizmie wyładowań powierzchniowych osłon izolacyjnych ograniczników przepięć. W tym celu określono wpływ ładunku powierzchniowego i przestrzennego na rozwój wyładowań powierzchniowych.

Na podstawie pomiarów elektrycznych i mechanicznych stwierdzono, że dodanie ok. 20% włókna szklanego do poliamidowej osłony zwiększa jej wytrzymałość mechaniczną oraz elektryczną, podnosi napięcie przeskoku, jak również powoduje skuteczniejsze unieruchomienie ładunku swobodnego w materiale, co potwierdzają wyniki pomiarów TSD. Bardzo istotne znaczenie na właściwości osłon ma technologia ich produkcji i równomierne rozprowadzenie włókna szklanego.

*Autorzy dziękują dr inż. Leszkowi Moroniowi za pomoc w przeprowadzeniu pomiarów prądów termicznie stymulowanych (TSD).*

## LITERATURA

1. European Standard EN-60099-4/A2 Metal oxide surge arresters without gaps for a. c. systems.
2. Kogut K., Kasprzyk K., Mazurek B., Wnukiewicz B.: Factors affecting the mechanism of flashover in metal oxide surge arrester, zgłoszony do publikacji – Archives of Metallurgy and Materials. 11th Conference under auspices of E-MRS, Composites and ceramic materials- technology, application and testing, 18-19.05.2009 Konstancin Jeziorna.
3. Shengtao Li, Jianying Li, Chen G., Davis A. E.: Interfacial space charge between ZnO varistor ceramics and coating materials. IEEE 2002, 2002 Annual Report Conference on Electrical insulation and Dielectric Phenomena, 478-481.
4. Abdel-Salam M., Weiss P.: Discharges In air from point electrodes in the presence of dielectric plates – theoretical analysis. IEEE Trans. On El. Insul., Vol. 27, No. 2, April 1992, 320-333.
5. Abdel-Salam M., Weiss P.: Discharges In air from point electrodes in the presence of dielectric plates – experimental results. IEEE Trans. On El. Insul., Vol. 27, No.2, April 1992, 309-319.
6. Staroń J.: Wytrzymałość powierzchniowa dielektryków w atmosferze czynników roboczych rur cieplnych. Rozprawa doktorska (28.06.1999), Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Wrocław.
7. Krause T.: Rozkład ładunków swobodnych i wolnorelaksacyjnej polaryzacji w materiałach aktywnych. Rozprawa doktorska (2006), Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Wrocław.

*Rękopis dostarczono dnia 15.09.2009 r.*

**Opiniował: Prof. dr hab. inż. Marian Pasko**

## INFLUENCE OF THE GLASS FIBER CONTENT ON ELECTRICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE POLYAMIDE INSULATING HOUSING OF THE SURGE ARRESTERS

K. KOGUT, K. KASPRZYK

**ABSTRACT** *In this paper the mechanisms of the surface discharges on the samples of the polyamide and polyamide with glass fiber used as insulating housing of the surge arrester, were introduced.*

*Damage of the surge arresters while high impulse voltage tests, are results of the surface discharges. The surface flashovers lead to stratification between insulating housing and varistors pile. To define the impact of the insulating material of the surge arrester housing on development of the surface discharge, flashover voltage were measured. The role of a surface charge in the development of surface discharge was shown. To define the role of the interfacial space charge in the material for insulating housing, thermal stimulated current (TSD) were measured. On the basis of the parameters given by the manufacturer the mechanical strength of the samples were compared.*



**Mgr inż. Krzysztof KOGUT** w roku 2007 ukończył studia o kierunku Inżynieria Elektryczna na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Pracę magisterską napisał na temat „Wpływu kształtu izolatorów długopniowych na napięcie przeskoku zabrudzeniowego”. Od października 2007 roku pracuje we wrocławskim Oddziale Instytutu Elektrotechniki w Pracowni Materiałów Ceramicznych i Biotworzyw. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z wyładowaniami powierzchniowymi, ogranicznikami przepięć, izolatorami ceramicznymi oraz materiałami ceramicznymi stosowanymi w medycynie. Jest członkiem Koła nr 1 Stowarzyszenia Elektryków Polskich. Od lipca 2009 roku pracuje na stanowisku asystenta.



**Dr inż. Krzysztof KASPRZYK** w roku 2002 ukończył studia magisterskie na Wydziale Mechaniczno – Energetycznym Politechniki Wrocławskiej. W październiku 2002 roku rozpoczął studia doktoranckie na Wydziale Mechaniczno – Energetycznym Politechniki Wrocławskiej w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów. Zajął się tematyką zagospodarowania popiołów lotnych powstających ze spalania polskich węgla w szczególności tematem „Retencji metali ciężkich w popiołach lotnych z zastosowaniem wityfikacji”. Stopień doktora nauk technicznych otrzymał w listopadzie 2007 r. Obecnie pracuje we wrocławskim Oddziale Instytutu Elektrotechniki w Pracowni Materiałów Ceramicznych i Biotworzyw na stanowisku adiunkta. Jest członkiem Koła nr 1 Stowarzyszenia Elektryków Polskich.