

Piotr Jędrzejczak<sup>1</sup>, Hanna Mościcka-Grzesiak<sup>1</sup>, Janusz Fleszyński<sup>2</sup>

## OCENA DEGRADACJI ELASTOMERÓW SILIKONOWYCH POWODOWANEJ WYŁADOWANIAMI NIEZUPEŁNYMI Z WYKORZYSTANIEM PROFILOMETRII LASEROWEJ

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono badania odporności wybranych elastomerów silikonowych nowej generacji na działanie wyładowań niezupełnych generowanych w szczelinie powietrznej nad dielektrykiem. Jako kryteria oceny stopnia zdegradowania próbek wykorzystano parametry chropowatości i stereometrię powierzchni.

**Słowa kluczowe:** elastomery silikonowe, degradacja, chropowatość, stereometria powierzchni

### 1. Wstęp

Izolatory kompozytowe z osłonami silikonowymi są coraz częściej i chętniej stosowane w elektroenergetyce. W stosunku do izolatorów porcelanowych i szklanych posiadają wiele zalet, między innymi mniejszą masę, dużą wytrzymałość mechaniczną, hydrofobowość i łatwość montażu. Wadą izolatorów kompozytowych jest nie zawsze zadowalająca odporność na starzenie pod wpływem narażeń atmosferycznych, środowiskowych i napięciowych.

Jedno z najpoważniejszych zagrożeń wynika z możliwości wystąpienia wyładowań niezupełnych w sąsiedztwie wysokonapięciowego okucia. Przyczyną tego jest bardzo nierównomierny rozkład napięcia wzdłuż izolatora kompozytowego. W rejonie okucia i na pierwszym kłoszu występuje około 45% doprowadzonego napięcia. Po zastosowaniu pierścienia sterującego wartość tę można obniżyć w najlepszym przypadku do około 25% napięcia [1]. W tej sytuacji przy okuciu wysokonapięciowym panuje bardzo duże natężenie pola, które powoduje wyładowania niezupełne w powietrzu przy powierzchni elastomeru.

Wyładowania niezupełne bezpośrednio działają na elastomer powodując jego erozję i chropowacenie powierzchni. Wyładowania niezupełne powodują też generowanie promieniowania UV, ozonu i tlenków azotu, które w połączeniu z wodą tworzą kwas

<sup>1</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki

<sup>2</sup> Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

azotowy. Postępująca erozja materiału powoduje utratę szczelności izolatora, kwas azotowy penetruje do wnętrza, co w krótkim czasie prowadzi do awarii izolatora [2, 3].

Odporność elastomerów na wyładowania niezupełne jest różna i w dużej mierze zależy od zawartości składników podstawowych, obecności napełniaczy i stopnia ich koncentracji, użytych dodatków oraz od procesu technologicznego.

Napełniacze nieorganiczne jak  $\text{SiO}_2$  lub  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (ATH) zwiększają przewodność cieplną materiału, co powoduje wzrost odporności na łuk i wyładowania niezupełne. Jednak zbyt duża zawartość napełniacza (powyżej 200 części wagowych ATH) powoduje skutek odwrotny. Utrudniona jest wówczas migracja ciekłych silikonów na powierzchnię, ziarna napełniacza zostają odsłonięte, czego skutkiem jest szybsza erozja materiału [3].

Liczne badania eksperymentalne prowadzone były na izolatorach lub próbkach materiałów w komorze klimatycznej, w wodnych roztworach kwasu siarkowego, azotowego i chlorku sodu, pod działaniem podwyższonej temperatury, promieniowania UV, pleśni i grzybów oraz w obecności mgły solnej. Do oceny zmian starzeniowych wykorzystywano różne parametry fizyczne, elektryczne i mechaniczne [4, 5, 6, 7, 8, 9].

W pracy [10] przedstawiono wyniki badania chropowatości powierzchni elastomerów silikonowych degradowanych w warunkach środowiskowych. W pracy tej wykorzystano profilometrię stykową wymagającą wykonywania replik negatywowych. Profilometrię stykową wykorzystywano również w pracy [11], ale obiektem badań były żywice epoksydowe nie wymagające wykonywania replik.

Przedmiotem niniejszej pracy jest ocena odporności wybranych elastomerów silikonowych na działanie wyładowań niezupełnych. Jako kryteria oceny postępującej degradacji wykorzystano parametry chropowatości powierzchni oraz obrazy przestrzenne zdegradowanej próbki wykonane techniką stereometrii.

## 2. Obiekty badań i układ pomiarowy

### 2.1. Obiekty badań

Do badań wybrano próbki elastomerów silikonowych otrzymywanych ze stanu ciekłego (LSR) oraz drugą generację kauczuków silikonowych wulkanizowanych w temperaturze pokojowej (RTV-2). Producentami badanych materiałów są znane firmy chemiczne: Rhone-Poulenc, Bayer, Wacker.

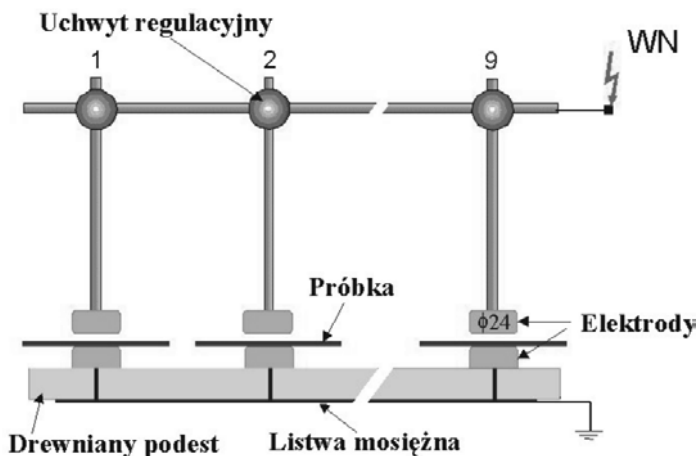
Dla oceny wpływu napełniacza na procesy degradacyjne część próbek wykonano z napełniaczami, a część bez niego. Jako napełniacza użyto uwodniony tlenek glinu ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) o symbolu ATH (alumina trihydrate) lub  $\text{SiO}_2$ .

Próbki posiadają następujące oznaczenia:

- I – Elastomer LSR, nr 1525 – z napełniaczem ATH
- II – Elastomer LSR, Silopren 2950 - z napełniaczem ATH
- IV – Elastomer LSR, Silopren 2841 - bez napełniacza
- V – Elastomer RTV-2, Powersil 600 – kompozycja składników nie jest ujawniona przez producenta, prawdopodobnie materiał zawiera napełniacz  $\text{SiO}_2$ .

Próbki były poddawane degradującemu działaniu wyładowań niezupełnych występujących w szczelinie powietrznej między elektrodą o wysokim potencjale a powierzchnią próbki. Układ, przedstawiony na rysunku 1, umożliwił jednoczesną

degradację dziewięciu próbek. Do elektrody wysokonapięciowej doprowadzano napięcie 15 kV. Ponieważ grubość próbek była różna (od 0,25 do 0,4 cm), dlatego szczelina powietrzna nad próbkami musiała mieć różną grubość (od 0,81 do 1,09 mm), aby po uwzględnieniu przenikalności materiałów zapewnić równe natężenie pola w szczelinie nad wszystkimi próbkami (8,18 kV/mm). Czas starzenia próbek wynosił 90 i 185 h.



Rys. 1. Układ do degradowania próbek wyładowaniami niezupełnymi

## 2.2. Układ do pomiaru chropowatości powierzchni

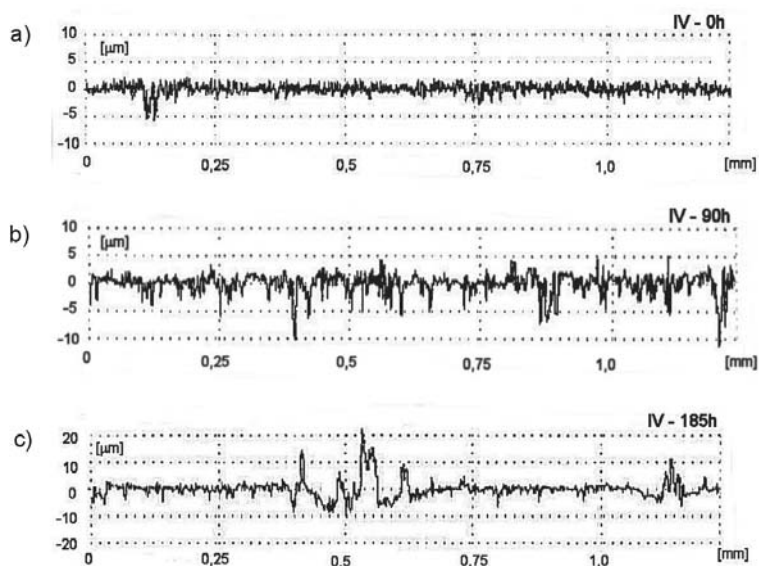
Dla wyznaczenia parametrów chropowatości wykorzystuje się wiele metod [12]. Najpopularniejszą metodą analizy chropowatości powierzchni jest profilometria stykowa. Końcówka pomiarowa przemieszczana jest po powierzchni o zadanej odległości z prędkością w przybliżeniu stałą. Technika pomiaru znacznie się komplikuje, gdy badana próbka jest materiałem elastycznym. W takiej sytuacji wykonuje się odbitki negatywowe badanych próbek, i po ich utwardzeniu wykonuje się profilogramy.

Do oceny parametrów chropowatości w niniejszej pracy wykorzystano profilometr firmy PERTHEN z końcówką laserową, który umożliwia pomiary bezpośrednio na badanej próbce elastomeru silikonowego. Układ elektroniczny profilometru umożliwia sterowanie, zbieranie danych, przeliczanie i prezentację wyników. Urządzenie jest wyposażone w oprogramowanie do numerycznego filtrowania falistości powierzchni i błędów kształtu, co jest wymagane do wyznaczania parametrów chropowatości zgodnie z normami. Obrazy nie filtrowane przedstawiają rzeczywisty kształt powierzchni.

Istnieje ponad 20 parametrów opisujących profil chropowatości. Ich wybór zależy od celu, jakiego ocena stanu powierzchni ma służyć. Do naszych celów zostały wybrane następujące parametry:  $R_a$  – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości,  $R_t$  – maksymalna wysokość chropowatości definiowana jako odległość od najwyższego do najniższego punktu profilu na długości odcinka elementarnego,  $R_v$  – maksymalna głębokość wgłębienia profilu chropowatości. Profilometr miał zaprogramowaną długość odcinka elementarnego równą 0,25 mm. Pomiarów dokonywano na długości pięciu odcinków elementarnych.

### 3. Wyniki badań i ich interpretacja

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe profilogramy powierzchni próbek elastomeru silikonowego IV w stanie wyjściowym oraz starzonych wyładowaniami niepełnymi w czasie 90 i 185 h. Wizualna ocena profilogramów pozwala stwierdzić, że w miarę upływu czasu starzenia wyraźnie rośnie chropowatość próbek oraz erozja materiału.

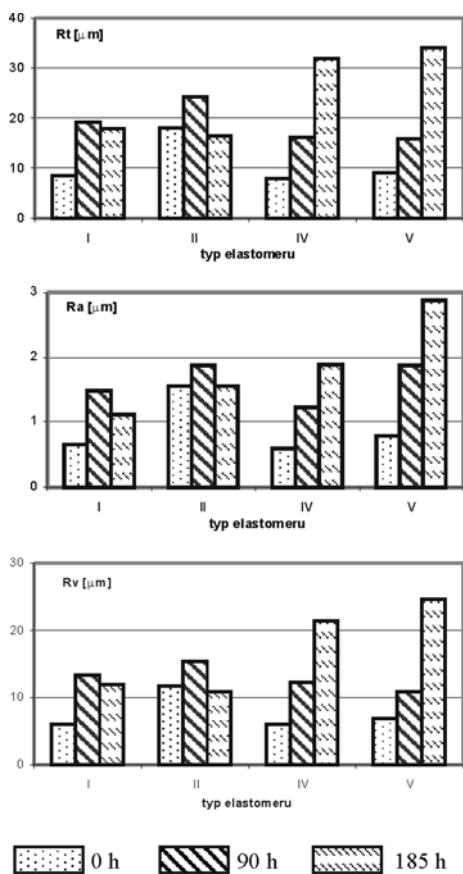


**Rys. 2.** Profilogramy powierzchni próbek elastomeru IV; próbka nowa (a) oraz próbki starzone wyładowaniami niepełnymi w czasie 90 h (b) i 185 h (c)

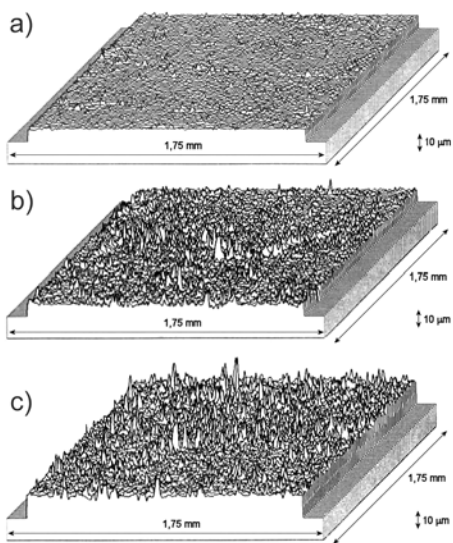
Do oceny ilościowej stopnia degradacji wykorzystano wybrane parametry chropowatości. Na rysunku 3 przedstawiono histogramy parametrów  $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_v$  dla różnych typów elastomerów i czasów starzenia próbek. Na podstawie analizy histogramów można zauważyć, że materiały LSR z napełniaczem ATH (I i II) w początkowej fazie starzenia wykazują nieznaczny wzrost parametrów chropowatości, zaś w dalszej fazie starzenia chropowatość się stabilizuje, a nawet nieznacznie maleje. Materiał LSR bez napełniacza (IV) oraz elastomer RTV-2 prawdopodobnie z napełniaczem  $\text{SiO}_2$  (V) wykazują wyraźną tendencję ciągłego wzrostu parametrów chropowatości. Szczególnie mocno pogłębiają się krater (parametr  $R_v$ ).

Na rysunku 4 przedstawiono reprezentatywne obrazy stereometryczne negatywowe powierzchni próbek elastomeru IV w stanie wyjściowym oraz starzonych wyładowaniami niepełnymi przez 90 i 185 h. Zastosowano w tym przypadku filtrację falistości powierzchni.

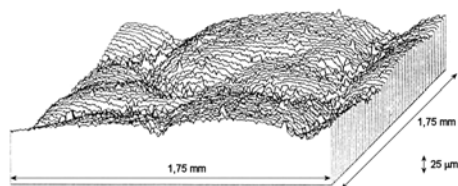
Stan powierzchni w skali makro lepiej ilustrują obrazy stereometryczne nie filtrowane. Przykład taki dla materiału V pokazano na rysunku 5. Oprócz rosnącej chropowatości powierzchni widać głębokie bruzdy w odległości około 0,5 mm. Tak dużą falistość powierzchni wykazywał tylko materiał V.



Rys. 3. Parametry  $R_{\alpha}$ ,  $R_r$ ,  $R_v$  próbek elastomerów nowych oraz starzonych przez 90 h i 185 h



Rys. 4. Przykładowe obrazy stereometryczne negatywowe powierzchni próbek elastomeru IV nowego (a) oraz po starzeniu przez 90 h (b)



Rys. 5. Przykładowy obraz stereometryczny nie filtrowany powierzchni próbki elastomeru V po starzeniu przez 185h

#### 4. Ostateczne wnioski

Badane elastomery otrzymywane ze stanu ciekłego LSR dwóch różnych wytwórców zawierające napełniacz ATH (I i II) wykazywały znacząco odporność na wyładowania niezupełne. Początkowo, w pierwszym etapie starzenia (do 90 h), parametry charakteryzujące chropowatość rosły, a następnie wraz z upływem czasu starzenia (do 185 h) następowała stabilizacja wartości, a nawet nieznaczne zmniejszenie chropowatości.

Elastomer LSR bez napełniacza oraz RTV-2 prawdopodobnie z napełniaczem  $\text{SiO}_2$  wykazywały dużo mniejszą odporność na wyładowania niezupełne niż elastomery z napełniaczem ATH. Parametry chropowatości stale rosły wraz z czasem starzenia.

W celu poprawnego wyliczenia parametrów chropowatości ( $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_v$ ) należy stosować filtrowanie eliminujące falistość powierzchni, natomiast obrazy stereometryczne powierzchni nie filtrowane lepiej charakteryzują rzeczywisty stan powierzchni.

### Literatura

- [1] **Gielniak J., Mościcka-Grzesiak H.**, *Rozkład napięcia wzdłuż wybranych izolatorów liniowych wyznaczany metodą symulacji komputerowej i pomiarów laboratoryjnych*, V Ogólnopolskie Sympozjum „Inżynieria Wysokich Napięć”, Poznań-Kiekrz, 2000.
- [2] **Pohl Z.**, *Rozwiązania konstrukcyjne i zastosowanie izolatorów kompozytowych w elektroenergetyce*, W: Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce pod red. H. Mościckiej-Grzesiak, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1996, t.1, s.48-53.
- [3] **Subocz J.**, *Problemy starzeniowe izolatorów kompozytowych*, W: Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce pod red. H. Mościckiej-Grzesiak, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1996, t.1, s.53-63.
- [4] **Fleszyński J.**, *Elektroenergetyczne izolatory kompozytowe*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2/2001, s.29-33.
- [5] **Fleszyński J., Sojda E., Żyłka P.**, *Laboratoryjne badania zabrudzeniowe silikonowych izolatorów kompozytowych*, IV Konferencja naukowa „Postępy w elektrotechnologii”, Jamrozowa Polana, wrzesień 2000, s.59-62.
- [6] **Tymań A.**, *Badania własności wybranych kauczuków silikonowych stosowanych do produkcji wysokonapięciowych izolatorów energetycznych*, VII Sympozjum „Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia” EUI'99, Zakopane, 1999, s.473-479.
- [7] **Tymań A.**, *Prądy upływu na materiałach silikonowych w warunkach mgły solnej*, V Ogólnopolskie Sympozjum „Inżynieria Wysokich Napięć”, Poznań-Kiekrz, 2000.
- [8] **Reynders S. M., Hendey J., Reynders J.P.**, *Thermally accelerated corona ageing of silicone rubber surface insulation*, 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, 1997, s. 121-124.
- [9] **Riquell G., Formigue J.M., Noel M., de Decker D., Parraud R.**, *Natural and artificial ageing of non-ceramic insulators evaluation of diagnostic techniques*, 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, 1995, subject 3, s. 3188-1.
- [10] **Jerzmański D., Prociów K.**, *Pomiary degradacji elastomerowych osłon izolatorów za pomocą negatywnych odbitek powierzchni*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 3/2000, s.79-82.
- [11] **Łaś T., Słowikowska H., Słowikowski J., Klimczak T., Dukaczewski A.**, *Przyczynek do studiów nad współzależnością rozwoju wyladowań niezupełnych i zmianami właściwości powierzchniowych żywic i kompozytów epoksydowych*, Konferencja naukowa „Postępy w elektrotechnologii”, Szklarska Poręba, 1994, s. 161-166.
- [12] **Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J.**, *Charakterystyka chropowatości powierzchni – przewodnik*, Politechnika Poznańska, Poznań, 1996.

### LASER PROFILOGRAM ANALYSIS OF SILICONE ELASTOMER DEGRADATION RESULTING FROM PARTIAL DISCHARGES

The paper presents ageing studies of samples of some selected new generation silicone elastomers. The research included ageing of material samples under the influence of partial discharges in an air gap over a dielectric. Roughness parameters and stereometry of the surface were used as criteria to evaluate degradation of the samples.