



Krystian Leonard CHRZAN

Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki, Zakład Wysokich Napięć

## Higroskopijne własności zabrudzeń na szkle i na kauczuku silikonowym

**Streszczenie.** Własności hydrofobowe kauczuku silikonowego i hydrofobizacja zanieczyszczeń na jego powierzchni ujawniają się przy znacznym zawilgoceniu powierzchni przez tworzenie kropli wody. Jednakże w wysokiej wilgotności powietrza, warstwa zabrudzeń na powierzchni kauczuku silikonowego absorbuje wilgoć w stopniu porównywalnym do warstwy zabrudzeń na powierzchni szkła lub porcelany. W referacie przedstawiono badania tego zjawiska, przeprowadzone na modelach izolatorów i na izolatorach kompozytowych 110 kV na Uniwersytecie w Stuttgarcie

**Abstract.** (Hygroscopic properties on glass and silicone rubber). Hygroscopic properties of silicone rubber and pollutants hydrophobisation are observed at intense wetting as droplets formation. However, the pollution layer on silicone rubber absorbs moisture at high air humidity similar to the pollutants on the glass surface or porcelain surface. This paper shows the preliminary measurements carried out on cylindrical models and on 110 kV insulators at the high voltage laboratory of Stuttgart University.

**Słowa kluczowe:** własności hydrofobowe, konduktywność powierzchniowa, prąd upływu.

**Keywords:** hydrophobic properties, surface conductivity, leakage current.

### Wstęp

Procesy nawilgacania zanieczyszczeń na izolatorach były badane już przed wielu laty głównie w aspekcie izolatorów porcelanowych i szklanych [1] [2]. Początkowe badania izolacji polimerowej dotyczyły jej degradacji przez wyładowania powierzchniowe i warunki klimatyczne. Wiele uwagi poświęcono również wyjaśnieniu hydrofobowości kauczuków silikonowych i EPDM, jej utraty, odzyskiwaniu i hydrofobizacji warstwy zabrudzeniowej na powierzchni tych materiałów. Mimo, że zachowanie się kropli wody w polu elektrycznym zbadano już w latach 1930-tych [3], to jednak nadal wiele prac dotyczy dynamiki kropli wody na hydrofobowej powierzchni w polu elektrycznym.

Absorpcja pary wodnej przez zabrudzoną szklaną powierzchnię z wilgotnego powietrza została poznana już dawno. Fizyczne podstawy tego procesu są proste, ponieważ powierzchnia szkła nie wpływa na proces absorpcji. Natomiast kauczuk silikonowy powoduje hydrofobizację zanieczyszczeń sprawiając, że hydrofilne zanieczyszczenia stają się hydrofobowe.

Czy zatem higroskopijne zanieczyszczenia na kauczuku silikonowym staną się niehigroskopijne? Czy pozostaną nadal higroskopijne? Prezentowana praca jest prawdopodobnie pierwszą próbą odpowiedzi na te pytania.

### Proces nawilgacania zanieczyszczeń na powierzchni izolatorów

Proces nawilgacania zanieczyszczeń na izolatorach może zachodzić wskutek: kondensacji, natryskiwania powierzchni kropelkami wody, higroskopijnych własności nierozpuszczalnych zanieczyszczeń lub higroskopijnych własności składników rozpuszczalnych (dyfuzji chemicznej).

Kondensacja zachodzi wówczas, gdy temperatura powierzchni izolatora jest niższa niż otaczającego powietrza. Warunki takie powstają często tuż po wschodzie słońca, które szybciej ogrzewa powietrze niż izolator. Ilość wody (kondensatu) jest proporcjonalna do różnicy gęstości nasyconych par w powietrzu i bezpośrednio przy powierzchni. Różnica temperatur powietrza i powierzchni izolatorów porcelanowych nie jest wielka i może wynosić około 2°C [4]. Nawilgacanie przez natryskiwanie zależy od wymiaru kropli i natężenia opadu oraz od ruchu powietrza. Stosując odpowiedni nadmuchiwanie w metodzie *clean fog* uzyskać można równomierne nawilgacanie dolnych i górnych powierzchni izolatora [5].

### Higroskopijne właściwości zabrudzeń

Czas utrzymywania się mgły lub wysokiej wilgotności powietrza może często być długi i wynosić kilka, kilkanaście a nawet więcej godzin. W przypadku izolatorów narażenie zabrudzeniowe jest proporcjonalne do prądu upływu (lub konduktywności powierzchniowej). Oznacza to, że aby wywołać przeskok warstwa zabrudzeniowa musi zostać dostatecznie nawilgocona np. przez intensywną mgłę, mżawkę, kondensację lub deszcz. Proces nawilgacania musi być dostatecznie intensywny, jednakże zbyt intensywne nawilgacanie powoduje wypłukiwanie zanieczyszczeń i oczyszczanie powierzchni izolacyjnej.

Dla izolatorów polimerowych bardzo istotna jest możliwość degradacji materiału przez wyładowania elektryczne o niewielkim prądzie rzędu 1-5 mA [6]. Zapłon wyładowań niezupełnych może wystąpić już przy bardzo niskiej konduktywności powierzchniowej i jednocześnie jej nierównomiernym rozłożeniu wzdłuż drogi upływu. Szczególnie sprzyjającymi warunkami jest utworzenie się pojedynczej strefy suchej w pobliżu okucia górnego lub dolnego. Jeśli na powierzchni utworzy się strefa sucha, wówczas prąd upływu zmniejsza się, dlatego proces wysuszenia warstwy wilgotnej również ulega spowolnieniu. Ponieważ gęstość wydzielanej energii w strefie suchej jest większa niż w warstwie wilgotnej, dlatego proces ten ma tendencję do stabilizacji.

$$(1) \quad j \cdot \rho_s \cdot t > j \cdot \rho_w \cdot t$$

gdzie:  $\rho_s, \rho_w$  – rezystywność powierzchniowa w warstwie suchej i wilgotnej,  $j; t$  – gęstość prądu upływu i czas.

Degradacja izolacji polimerowej może być już powodowana przez proces nawilgacania o małej intensywności, jakim jest absorpcja wody przez warstwę zabrudzeń przy podwyższonej wilgotności powietrza.

Ciśnienie pary wodnej nad czystym (P<sub>s</sub>) jest zawsze niższe od ciśnienia pary nad rozstwą wodą (P<sub>w</sub>) i zgodnie z prawem Raoult'a jest proporcjonalne do ułamka molowego wody w atmosferze X<sub>w</sub> [7], stąd:

$$(2) \quad P_s = X_w P_w$$

Roztwór elektrolitu, w zależności od znaku różnicy ciśnień ( $P_s - P_a$ ), może albo odparowywać albo chłoniąc wodę z powietrza, w którym ciśnienie pary wodnej wynosi  $P_a$ . Absorpcja nie może zachodzić, jeśli roztwór jest nasycony (ciśnienie pary  $P_s = P_{ss}$ ). Dlatego sucha sól nie absorbuje wilgoci dopóki wilgotność powietrza nie przekroczy wartości, przy którym jest spełniony warunek  $P_a > P_{ss}$ . Z drugiej strony, jeśli wilgotność powietrza osiągnie 100%, to każdy roztwór soli będzie absorbował wilgoć, coraz bardziej się rozcieńczając. Konduktywność powierzchniowa  $\kappa_s$  warstwy zabrudzeń o grubości  $h$

$$(3) \quad \kappa_s = \kappa \cdot h = \text{ESDD } \kappa / S_e \text{ (RH)}$$

gdzie:  $\kappa$  - konduktywność roztworu,  
 $S_e$  - koncentracja soli.

Dla temperatury 20°C, w wilgotności od 77% do 98% otrzymuje się następujący wzór [7]:

$$(4) \quad \kappa_s = 100 \cdot \text{ESDD} (0,46 \text{ RH} - 31,5)$$

gdzie: konduktywność w ( $\mu\text{S}$ ), ESDD w ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ), wilgotność względna RH w %.

Warstwy naturalne zawierają wiele soli, których higroskopijność może znacznie różnić się od higroskopijności soli kuchennej stosowanej w laboratoryjnych próbach zabrudzeniowych. W temperaturze pokojowej sól kuchenna zaczyna absorbować wodę, gdy wilgotność względna przekroczy 75%. Do najbardziej higroskopijnych soli zalicza się  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , dla których graniczna wilgotność względna wynosi odpowiednio: 10%, 32%, 33% i 45%. Przeprowadzone przez autora pomiary konduktywności na płaskich płytkach szklanych zabrudzonych kaolinem i różnymi solami, (przy stałym ESDD =  $0,03 \text{ mg}/\text{cm}^2$ ) wykazały, że w wilgotności zbliżonej do 100% zmiany konduktywności powierzchniowej zależą od rodzaju użytej soli [2].

Proces wzrostu konduktywności powierzchniowej w opisywanym doświadczeniu zależy również od specyficznych własności soli. Rozpuszczanie soli może być procesem egzotermicznym (jak w przypadku  $\text{ZnCl}_2$ ) lub endotermicznym ( $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ). Procesy te przyspieszają lub opóźniają pochłanianie wilgoci z otoczenia. Konduktywność nasyconych roztworów niektórych soli jest mniejsza niż konduktywność ich roztworów o mniejszym stężeniu. Do takich soli zalicza się chlorek cynku. Pomimo znacznie większej higroskopijności niż NaCl, konduktywność modelu zabrudzonego przez  $\text{ZnCl}_2$  wzrastała wolniej niż warstwy zanieczyszczonej przez NaCl.

### Obiekty badań i procedura pomiarowa

Badania wykonano na cylindrycznych izolatorach z żywicy epoksydowej i pręcie szkło epoksydowym pokrytym 2 mm warstwą gumy silikonowej HTV, stosowanymi do produkcji izolatorów kompozytowych. Wysokość próbek wynosiła 6 cm a średnica 3 cm. Na powierzchnie czołowe próbek naniesiono elektrody z warstwy grafitu Grafit 33 firmy Kontakt Chemie GmbH.

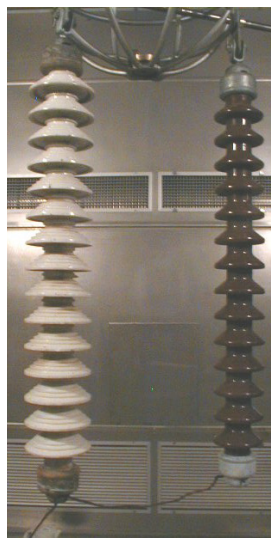
Próbki umieszczano w szklanym cylindrze o średnicy 30 cm i wysokości 50 cm pomiędzy płaskimi, galwanizowanymi elektrodami o średnicy 11 cm (rys. 1). Cylinder ustawiano w wodzie o wysokości 3 cm. Wewnątrz cylindra wilgotność względna powietrza wzrastała w ciągu godziny do ok. 97%. Wilgotność powietrza zmierzono sondą testo 625 firmy TESTO LIMITED o dokładności 3%.

Konduktywność powierzchniową określano z pomiaru prądu (za pomocą multimetru cyfrowego Agilent 34401A) po załączeniu na kilka sekund napięcia stałego z kalibratora 4708 Autocal firmy Datron Instruments.

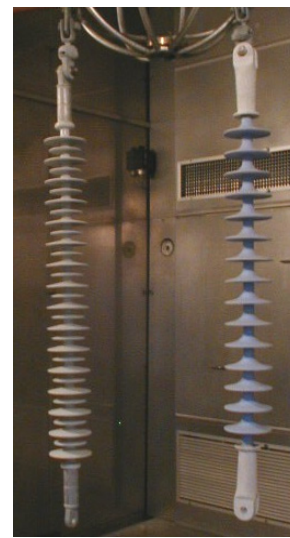


Rys. 1. Izolator cylindryczny w higroscacie

Wykonano również pomiary konduktywności na porcelanowych, zabrudzonych izolatorach długopniowych LPZs 75/15, VKL 75/14 oraz na silikonowych izolatorach kompozytowych firmy Hoechst HCT 86 (HTV SIR, 15 kloszy o średnicy 13,3 cm) i firmy IEL Międzyzlesie (RTV SIR, 16 + 15 kloszy o średnicy 13 i 9,7 cm). Pomiar konduktywności wykonano za pomocą pomiaru prądu, mierząc oscyloskopem spadek napięcia na rezystorze 100  $\Omega$ . Do zabrudzenia zastosowano suspensje kieselguhru, bentonitu i solankę o konduktywności 100 mS/cm. W celu usunięcia hydrofobowości izolatorów polimerowych, izolatory pokrywano suspensją kieselguhu o zawartości 150 g/l, po wysuszeniu wyierano suche zabrudzenie a następnie polewano izolatory suspensją bentonitu 60 g/l o konduktywności 10 mS/cm. Izolatory umieszczono w komorze klimatycznej o wymiarach 305 x 320 x 420 cm w celu pomiaru konduktywności i obserwacji wyładowań elektrycznych (rys. 2, rys. 3).



Rys. 2. Izolatory porcelanowe



Rys. 3. Izolatory kompozytowe

### Wyniki pomiarów cylindrycznych próbek w higroscacie

Sucha warstwa zabrudzeniowa na izolatorze epoksydowym zabrudzonym suspensją bentonitu lub suspensją kieselguhu jest hydrofilna. Kropla wody zostaje zaabsorbowana tworząc wilgotną plamę (rys. 4). Natomiast kropla wody na tak samo zabrudzonym izolatorze silikonowym nie zostaje zaabsorbowana (rys. 5) wskutek hydrofobizacji warstwy przez niskomolekularne składniki silikonowe.

Zdjęcie na rys. 5 przedstawia znaną, korzystną własność gumy silikonowej, której nie posiada żywica epoksydowa i szklawiona porcelana. Doświadczenia te wykazały również, że pomiędzy kieselgurem a bentonitem nie ma praktycznie żadnych różnic.

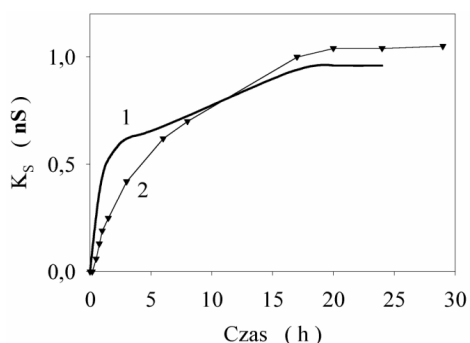


Rys. 4. Ślad po kropli wody na warstwie Bentonitu na izolatorze epoksydowym

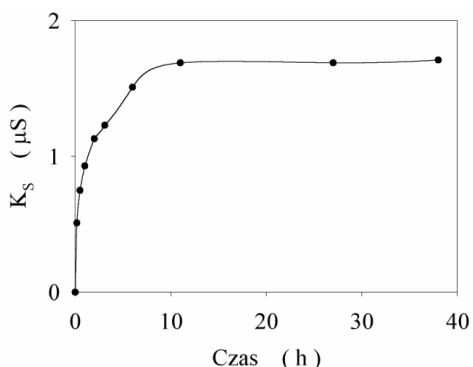


Rys. 5. Kropla wody na hydrofobowej warstwie na kuczuku silikonowym

Materiały wykazują podobne właściwości hydrofilne na powierzchni epoksydowej a hydrofobowe na powierzchni gumy silikonowej. Jednakże w atmosferze o wysokiej wilgotności kieselgur zachowuje się odmiennie od bentonitu. Warstwa kieselguru praktycznie nie absorbuje wilgoci, dlatego konduktywność powierzchniowa na izolatorze epoksydowym z takim zabrudzeniem (rys. 6, krzywa 2) jest około 700 razy mniejsza niż na izolatorze epoksydowym zabrudzonym bentonitem o takim samym ESDD (rys. 7). Suspensja Kieselguru naniesiona na powierzchnię izolatora tworzy prawdopodobnie po wyschnięciu żel, który jest słabo rozpuszczalny w wodzie i który praktycznie nie chłonie wilgoci z powietrza.



Rys. 6. Konduktywność powierzchniowa na izolatorach epoksydowym i silikonowym zabrudzonych kieselgurem

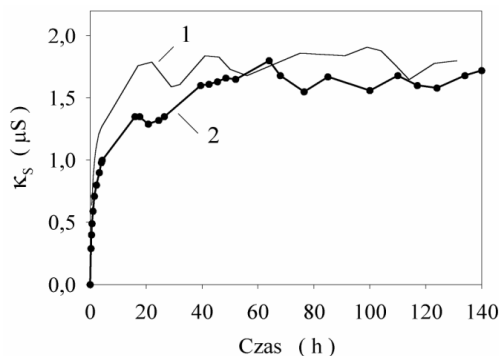


Rys. 7. Konduktywność powierzchniowa na izolatorze epoksydowym zabrudzonym Bentonitem

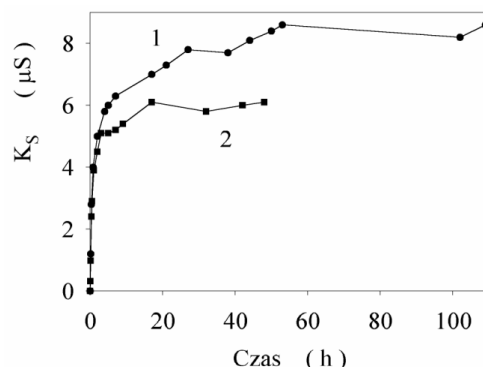
Konduktywność powierzchniowa na gumie silikonowej zabrudzonej kieselgurem jest tak samo niezmiernie mała jak na powierzchni epoksydowej (rys. 6).

Okazuje się, że konduktywność powierzchniowa gumy silikonowej zabrudzonej przez Bentonit jest taka sama jak konduktywność powierzchniowa na zabrudzonej powierzchni epoksydowej zabrudzonej również Bentonitem o takim

samym ESDD (rys. 8 i rys. 6). Rysunek 8 przedstawia pomiary wykonane na świeżo zabrudzonej próbce (krzywa 2) i na próbce, która była zabrudzona 6 dni przed rozpoczęciem pomiaru w higroście (krzywa 1). Po sześciu dniach warstwa była hydrofobowa, pomimo tego, absorbuje ona wilgoć tak samo jak warstwa, która nie została jeszcze hydrofobizowana przez niskomolekularne cząsteczki silikonowe. Aby zwiększyć wiarygodność uzyskanego wyniku, pomiar powtórzono z warstwą o znacznie większym ESDD, stosując suspensje Bentonitu o konduktywności 10 mS/cm na izolatorze silikonowym i epoksydowym. Wartości konduktywności na hydrofobowej powierzchni silikonowej i na powierzchni epoksydowej (krzywe 1 i 2 na rys. 9) nie różnią się istotnie. Małe różnice wynikają z niewielkich różnic ESDD a nie z innych materiałów podłoża.



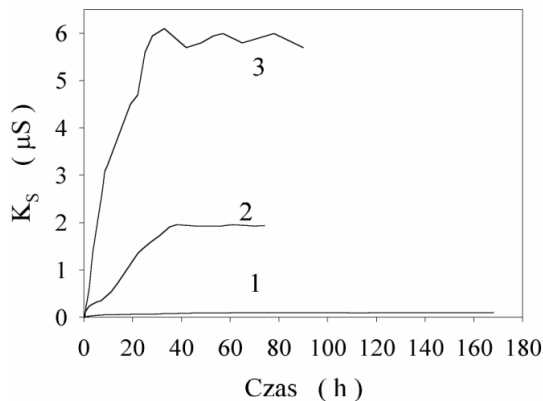
Rys. 8. Konduktywność powierzchniowa na gumie silikonowej zabrudzonej Bentonitem



Rys. 9. Konduktywność powierzchniowa na gumie silikonowej i żywicy epoksydowej zabrudzonych Bentonitem

Przeprowadzone pomiary wykazały, że hydrofobowa warstwa na gumie silikonowej absorbuje wilgoć tak samo jak warstwa hydrofilna na powierzchni epoksydowej. Konduktywność powierzchniowa na zabrudzonych izolatorach silikonowych osiąga takie same wartości jak na izolatorach szklanych, czy porcelanowych. Wysoka wilgotność powietrza, częsta zwłaszcza w warunkach tropikalnych, stanowi więc poważne narażenie dla izolatorów silikonowych.

Guma silikonowa wykazuje swe doskonale właściwości w wysokiej wilgotności powietrza wówczas, gdy jest zabrudzona tylko solą bez składników nierozpuszczalnych tzn., gdy NSDD = 0 (*non soluble deposit density*). Rysunek 10 przedstawia konduktywność na tak samo zanieczyszczonych dwóch izolatorach silikonowych i na izolatorze epoksydowym. Na powierzchnię próbek naniesiono solankę o konduktywności 100 mS/cm. Krzywa 2 przedstawia konduktywność na izolatorze silikonowym, który poddany został pomiarowi w higroście natychmiast po wysuszeniu. Krzywa 1 wskazuje wartości konduktywności na izolatorze silikonowym, na którym pomiar konduktywności wykonano po tygodniu a krzywa 3 – na izolatorze epoksydowym.

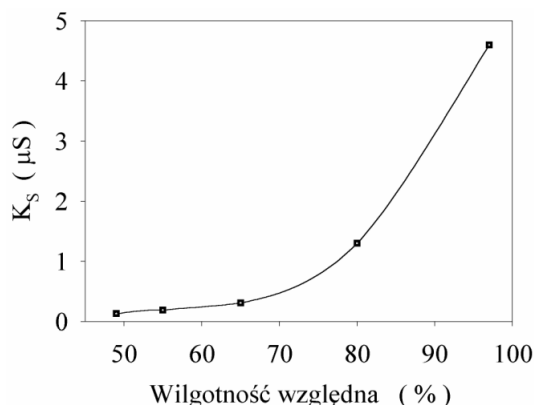


Rys. 10. Konduktywność powierzchniowa na izolatorach silikonowych i na izolatorze epoksydowym zabrudzonych solanką

### Wyniki pomiarów i obserwacje wyładowań izolatorów długopniowych w komorze klimatycznej

Pomiary konduktywności na izolatorze VKL 75/14 w zależności od wilgotności powietrza przedstawia rysunek 11.

Konduktywność powierzchniowa wykazuje niewielki wzrost już po przekroczeniu wilgotności względnej 50%. Wzrost ten spowodowany jest przez higroskopijne sole zawarte w Bentonicie, wodzie wodociągowej lub zanieczyszczenia w soli kuchennej. Konduktywność stosowanej wody wodociągowej wynosiła 270 μS/cm a wody wodociągowej z zawartością Bentonitu 100 g/l - około 315 μS/cm. Czysta sól kuchenna absorbuje bowiem wodę w wilgotności względnej większej od 75%. Wzrost konduktywności powierzchniowej na zanieczyszczonej bentonitem powierzchni porcelany w wilgotności większej od 50% zaobserwowano również w publikacji [8].



Rys. 11 Konduktywność powierzchniowa na izolatorze VKL 75/14 zabrudzonym warstwą bentonitu i NaCl w zależności od wilgotności względnej powietrza

Po załączeniu napięcia przemiennego na izolatory znajdujące się w wilgotności ok. 95% na ich powierzchni tworzą się skoncentrowane wyładowania elektryczne. Na izolatorach porcelanowych wyładowania te są bardzo wyraźne. Natomiast na izolatorach kompozytowych są znacznie słabsze, ponieważ wyładowania pojawiały się w kilku miejscach na pniu. Na izolatorze firmy Hoechst drobne wyładowania powstawały na złączach kłosz-pień. Prawdopodobnie w tych miejscach zachowana została hydrofobowość izolatora i warstwa zabrudzeniowa w tych miejscach jest nieciągła. Należy zatem zwrócić szczególną uwagę te miejsca podczas dehydrofobizacji i nakładania warstwy zabrudzeniowej.

Wyniki pomiarów mają bardzo duże znaczenie dla izolatorów silikonowych. Izolatory te stosowane są coraz częściej również w strefie klimatu tropikalnego, o bardzo

wysokiej wilgotności powietrza i wysokiej temperaturze [9]. W tym klimacie wysoka wilgotność ok. 90% utrzymuje się przez całe miesiące [10], wilgotność 100% może utrzymywać się przez cały dzień [11]. W takich warunkach wyładowania mogą palić się nie tylko na izolatorach kołpakowych porcelanowych w pobliżu trzonka [2], ale również na izolatorach długopniowych. Potwierdzają to zdjęcia wykonane w warunkach polowych [6] na izolatorach porcelanowych i na izolatorach kompozytowych. Niniejsza praca podaje uzasadnienie tego zjawiska.

### Wnioski

Hydrofobowa warstwa zabrudzeń na gumie silikonowej absorbuje wodę w wysokiej wilgotności powietrza podobnie jak warstwa hydrofilowa na powierzchni szklawionej lub epoksydowej

Zjawisko skoncentrowanych wyładowań może wskutek tego powstawać na izolatorach silikonowych podobnie jak na izolatorach porcelanowych. Ma to duże znaczenie dla starzenia izolatorów kompozytowych i powinno być uwzględnione w proponowanych testach dla izolatorów kompozytowych.

Kieselgur tworzy żel o prawie zerowej absorpcji wody w wysokiej wilgotności powietrza. Dlatego ich stosowanie dla prób starzeniowych izolatorów kompozytowych lub do prób metoda warstwy stałej jest bardzo dyskusyjne.

Celem dalszych prac powinno być zbadanie innych materiałów stosowanych do sztucznych warstw zabrudzeniowych, np. kaolin, Tonoko a także innych naturalnych zabrudzeń

### LITERATURA

- [1] Leclerc M., Wetting processes on a contaminated insulators surfaces, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, No. 5 1982, 1005-1011
- [2] Chrzan K., Hygroscopic properties of pollutants on HV insulators, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Feb. 1989, 107-112
- [3] Macky W.A., Some investigations on the deformation and breaking of water drops in strong electric fields, *Proc. Royal Society A*, vol. 133, 1931, 565-579
- [4] Rizk F., Laboratory and field experiences with EHV transmission line insulators in the desert, *IEEE Trans. on PAS*, no. 5, 1975, 1770-1776
- [5] Karady G., The effect of fog parameters on the testing of artificially contaminated insulators in a fog chamber, *IEEE Trans. on PAS*, no. 2 1975, 378-387
- [6] Chrzan K.L., Concentrated discharges and dry bands on polluted potdoor insulators, *13<sup>th</sup> ISH Delft 2003*, pp. 227
- [7] Riquel G., Spangenberg E., Mirabel P.C., Wetting processes of pollution layer on HV glass insulators, *9<sup>th</sup> Int. Symp. on HV Engineering ISH Graz 1995*, paper 3190
- [8] Richards C.S., Benner C.L., Buttler-Purpy K.L., Electrical behavior of contaminated distribution insulators exposed to natural wetting, *IEEE Transactions on Power Delivery*, April 2003, 551-558
- [9] Kimball E.W., Desert storm environmental effects, *IEEE Annual Symp. on Reliability and Maintainability 1992*, 249-252
- [10] Holzhausen J.P., Potgieter O.C.T., Smith J.M., The on site leakage current performance of insulators of various designs and materials as a function of weather data, *7<sup>th</sup> ISH Dresden 1991*, paper 44.15
- [11] Holzhausen J.P., Vosloo W., Leakage current performance under severe coastal pollution conditions of identically shaped insulators made of different materials, *ISH Bangalore 2001*, 691-694

Autor dziękuje Prof. K. Feser'owi za możliwość wykonania pomiarów na Uniwersytecie w Stuttgarcie

Autor: dr inż. Krystian Chrzan, Politechnika Wroclawska, Instytut Postaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Wyb. Wyspiańskiego 27, E-mail: [krystian.chrzan@pwr.wroc.pl](mailto:krystian.chrzan@pwr.wroc.pl)