

Dr inż. Ryszard Dobroszewski  
Instytut Elektroenergetyki  
Politechnika Poznańska

## BADANIA PORÓWNAWCZE ODPORNOŚCI FOLII ELEKTROIZOLACYJNYCH NA DZIAŁANIE WYŁADÓWAN NIEZUPEŁNYCH

### 1. Wstęp

Krótkotrwałe badania wytrzymałości dielektrycznej i mechanicznej nie wystarczają do pełnej oceny jakości materiałów elektroizolacyjnych. Dopiero długotrwałe badania starzeniowe mogą dać pełny obraz zachowania się poszczególnych materiałów w eksploatacji.

Przebieg procesów starzeniowych dielektryków zależy przede wszystkim od narażeń termicznych, elektrycznych, chemicznych oraz mechanicznych, a także od wielu innych czynników technologiczno-eksploatacyjnych, jak na przykład zawilgocenia, zanieczyszczenia, obecności szczelin i wtrącin gazowych. Dlatego głównymi cechami kwalifikującymi materiały elektroizolacyjne do stosowania w konkretnych konstrukcjach izolacyjnych jest odporność termiczna oraz odporność na wyładowania niezupełne występujące w szczelinach gazowych przy odpowiednich natężeniach pola.

Badania odporności na działanie wyładowań niezupełnych rozwijane są zwłaszcza w ostatnich latach ze względu na coraz szerszą produkcję nowych, syntetycznych dielektryków polimerycznych, które mogą zastąpić materiały tradycyjne, dając jednocześnie korzyści ekonomiczne wskutek uproszczenia technologii układów izolacyjnych lub przedłużenia ich trwałości.

Jednak metody badań odporności dielektryków stałych na wyładowania niezupełne nie są dotychczas ujednocnione [7], a rozmaite kryteria oceny tej odporności często prowadzą do całkowicie sprzecznych rezultatów.

W przedstawionej pracy, na podstawie wyników przeprowadzonych badań porównawczych folii elektroizolacyjnych, przedyskutowano niektóre metody badań oraz kryteria oceny odporności na wyładowania niezupełne.

## 2. Charakterystyka badanych materiałów.

Przeprowadzono porównawcze badania odporności na wyładowania niezupełne następujących rodzajów dielektryków w postaci folii o zbliżonych grubościach:

- polietylen wysokociśnieniowy /produkcji krajowej - grubości 36  $\mu\text{m}$ /,
- polistyren /Poloren, produkcji krajowej - grubość 40  $\mu\text{m}$ /,
- poliwęgiel /Bistan Af oraz Bistan C, produkcji krajowej - grubości 40  $\mu\text{m}$ /,
- politereftalan /Estrofol, produkcji krajowej - grubości 36  $\mu\text{m}$  oraz Melinex, produkcji angielskiej - grubości 35  $\mu\text{m}$ /.

Tego typu dielektryki już obecnie znajdują zastosowanie w przemyśle elektrotechnicznym jako izolacja kabli, kondensatorów oraz maszyn elektrycznych.

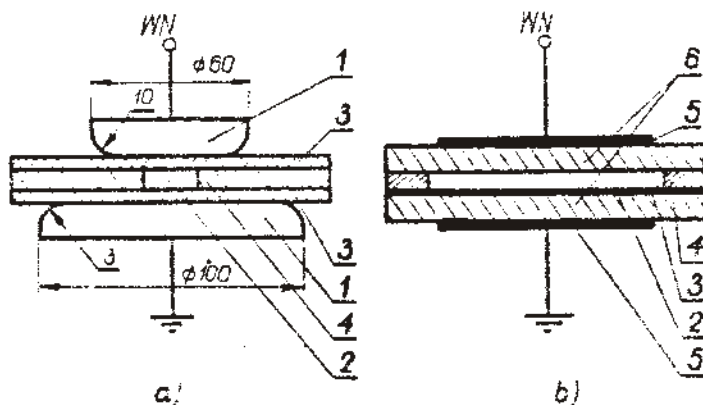
## 3. Metodyka badań

W zakres prac eksperymentalnych wchodziły badania zmian wytrzymałości mechanicznej /na rozciąganie/ i wytrzymałości dielektrycznej danej w funkcji czasu działania wyładowań niezupełnych / t.zw. czasu ekspozycji  $T$  /, badania krzywych życia oraz badania zależności czasu życia od mocy wyładowań niezupełnych.

Badania przeprowadzano na układach modelowych ze sztuczną szczeliną powietrzną, przedstawionych na rys.1.

W przypadku badań zmian wytrzymałości mechanicznej i wytrzymałości dielektrycznej stosowano komory badawcze o stosunkowo dużej powierzchni szczeliny gazowej /100  $\text{cm}^2$ /. Starzenia próbek polegało na

poddaniu ich bezpośredniemu działaniu wyładowań niezupełnych zachodzących w szczelinie o grubości 0,5 mm, utworzonej między płytą szklaną a badaną folią. Zastosowane napięcie przemienne 50 Hz o wartości 12 kV przekraczało ponad 3-krotnie wartość napięcia początkowego wyładowań niezupełnych.

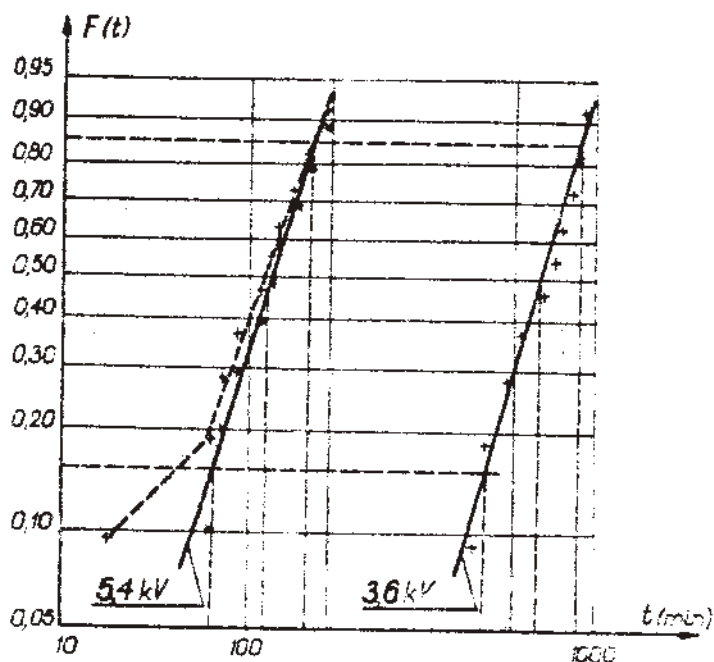


Rys.1. Układy modelowe do badania odporności folii elektroizolacyjnych na wyładowania niezupełne:  
 a/ układ do badania czasu życia  
 b/ układ do badania zmian wytrzymałości dielektrycznej i mechanicznej

- 1 - elektroda stalowa chromowana
- 2 - szczelina powietrzna
- 3 - badana folia
- 4 - podkładka dystansowa
- 5 - elektroda z koloidalnego srebra
- 6 - płytka szklana o grubości 2 mm.

Pomiary wytrzymałości mechanicznej przeprowadzano zgodnie z PN-63/C-39092 na próbkach włosełkowych o wymiarach 100x10 mm, przy szybkości rozciągania 100 mm/min. Pomiary wytrzymałości dielektrycznej łącznie przeprowadzono zgodnie z PN-63/E-044-04 przy użyciu elektrod płaskich o średnicy 6 mm /w oleju/, stosując napięcie przemienne 50 Hz. Każdorazowo dokonywano pomiarów na 15 próbkach i obliczano średnią arytmetyczną otrzymanych wyników.

W przypadku badań krzywych życia stosowano układy modelowe ze szczeliną gazową o grubości 0,24 mm i średnicy 10 mm, zawartą między dwoma arkuszami badanej folii. Pomiaru czasu do przebicia dokonywano amperomierzem samopiszzącym włączonym po stronie niskiego napięcia. Pomiaru przeprowadzono jednocześnie na 10 próbkach dla napięcia przemiennego 50 Hz w zakresie od 2,4 kV do 6,6 kV /napięcie wyładowań początkowych było równe około 1,3 kV/. Jako wartość średnią czasu życia przyjmowano medianę dystrybuanty statystycznego rozkładu Weibulla /rys.2/, który stosunkowo najlepiej odpowiada naturze zjawisk starzeniowych [2,3,6] .



Rys.2. Dystrybuanty czasu życia folii Bistan Af przedstawione w siatce funkcyjnej rozkładu Weibulla /linią przerywaną oznaczono dystrybuantę bez odroczenia przebicia przedwczesnego/

Dystrybuantę tego rozkładu opisuje następująca funkcja

$$F(t) = 1 - e^{-Kt^\alpha}$$

gdzie:  $K$  - pewna stała,  $\alpha$  - wykładnik potęgowy /dla zjawisk starzeniowych większy od 1/.

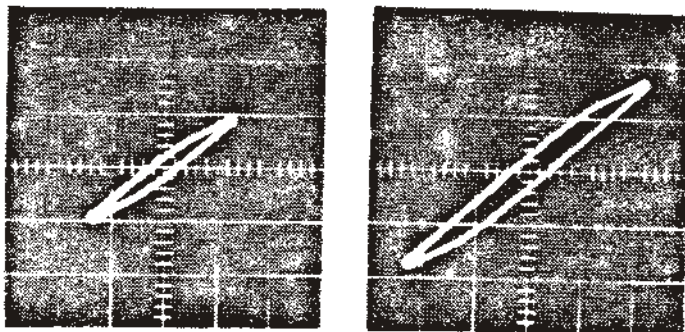
Po wprowadzeniu nowych zmiennych

$$x = \lg t, \quad y = \lg \ln \frac{1}{1-F(t)}$$

dystrybuanta rozkładu Weibulla ulega linearyzacji, zaś pojedyncze odskoki niektórych wyników pomiarowych od linii prostej wskazują na wpływ jakichś ubocznych czynników na mechanizm przebicia "/np.tzw. słabe miejsca lub silne lokalne wzrosty temperatury/. Daje to podstawę do odrzucenia tych wyników, uznając je za t.zw. przebicia przedwczesne. Z dystrybuant rozkładu Weibulla można ponadto w łatwy sposób określić przedział ufności mediany czasu życia dla przyjętego poziomu ufności /na przykład  $\beta = 0,7/$ .

Pomiary mocy wyładowań niezupełnych, uzupełniające badania krzywych życia, przeprowadzano metodą oscylograficzną [4,8] rejestrując zależność ładunku pozornego wyładowań od wartości chwilowej przyłożonego napięcia. Otrzymane oscylogramy mają kształt równoległoboków /rys.3/, których powierzchnia jest proporcjonalna do energii wyładowań traconej w jednym okresie napięcia. W zastosowanym układzie pomiarowym czułość wejścia X oraz wejścia Y oscy. były odpowiednio równe:  $G_x = 2,83 \text{ kV/cm}$ ,  $G_y = 228 \text{ nC/cm}$ . Pomiary dokonywano po czasie 5 minut od momentu przyłożenia napięcia probierczego. Dla uniknięcia wyładowań powierzchniowych układ modelowy zanurzono w oleju.

Wszystkie badania przeprowadzano w temperaturze  $18 \pm 5^\circ \text{ C}$ .



Rys.3. Typowe oscylogramy obrazujące energię wyładowań niezupełnych traconą w ciągu jednego okresu napięcia przemiennego /folia Estrofol/:  
 a/ napięcie probiercze  $U = 3,0 \text{ kV}$   
 b/ napięcie probiercze  $U = 4,8 \text{ kV}$

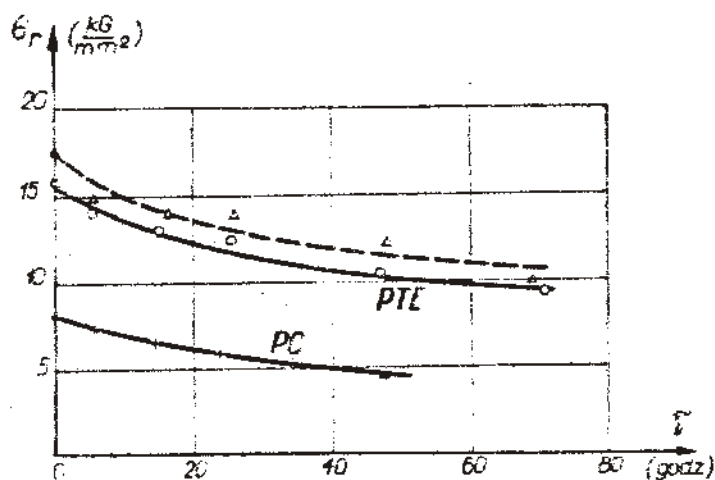
#### 4. Wyniki badań

##### 4.1. Badania zmian wytrzymałości mechanicznej oraz wytrzymałości dielektrycznej.

Wyniki badań zmian wytrzymałości mechanicznej folii poliwęglanowej /Bistan C/ i politereftalanowej /Estrofol oraz Melinex/ w funkcji czasu działania wyładowań niezupełnych przedstawiono na rys.4. Natomiast na rys.5 pokazano zmiany wytrzymałości dielektrycznej folii polietylenowej, poliwęglanowej /Bistan C/ i politereftalanowej /Estrofol oraz Melinex/.

Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że krajowa folia politereftalanowa Estrofol w stanie wyjściowym posiada nieznacznie gorszą wytrzymałość mechaniczną i dielektryczną od folii angielskiej Melinex, a wyraźnie lepszą od folii poliwęglanowej Bistan C.

Wytrzymałość dielektryczna folii polietylenowej jest prawie identyczna z wytrzymałością folii Melinex.

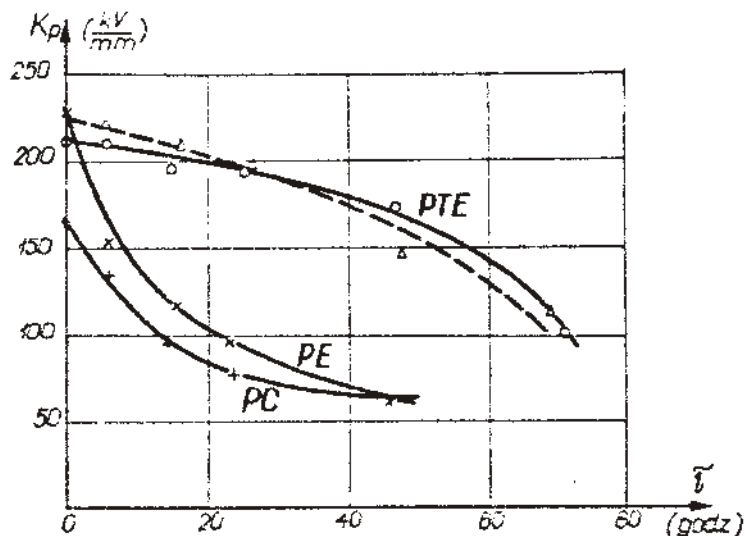


Rys.4. Zależność wytrzymałości folii na rozciąganie od czasu działania wyładowań niezupełnych: PC - folia poliwęglanowa Bistan C, PTE - folia politereftalanowa Estrofol oraz Melinex /linia przerywana/.

Początkowe własności badanych folii nie mogą jednak dać wyobrażenia o zachowaniu się ich w obecności wyładowań niezupełnych. Jako kryterium oceny odporności na wyładowanie niepełne można by przyjąć szybkość zmniejszania się wytrzymałości mechanicznej lub dielektrycznej. Z przedstawionych wykresów można na przykład określić czas, po jakim wytrzymałość mechaniczna danej folii zmniejszy się do 60 % wartości początkowej. Czas ten wynosi odpowiednio:

- dla folii Melinex      70 h,
- dla folii Estrofol     78 h,
- dla folii Bistan C    43 h.

Z kształt krzywych obrazujących zmiany wytrzymałości mechanicznej jest podobny dla trzech rodzajów badanych folii.



Rys.5. Zależność docieranej wytrzymałości dielektrycznej folii od czasu działania wyładowań niezupełnych: PC - folia poliwęglanowa Bistan C, PE - folia polietylenowa, PTE - folia politereftalana Estrofol oraz Melinex /linia przerywana/

Charakter krzywych obrazujących zmiany docieranej wytrzymałości dielektrycznej w czasie starzenia jest inny dla folii politereftalanych /krzywe wypukłe/ niż dla folii poliwęglanowej i polietylenowej /krzywe wklęsłe/. Wytrzymałość dielektryczna folii poliwęglanowej i polietylenowej szybko maleje już w początkowym okresie starzenia, podczas gdy wytrzymałość folii politereftalanych w początkowym okresie starzenia maleje tylko nieznacznie. Czas, po którym wytrzymałość dielektryczna badanych folii zmniejszy się do 50 % wartości



początkowej przedstawia się następująco:

- dla folii Melinex	67 h
- dla folii Estrofol	72 h
- dla folii Bistan C	20 h
- dla folii polietylenowej	16 h

Liczby te jeszcze wyraźniej świadczą o szybszym starzeniu folii poliwęglanowej Bistan C w porównaniu do folii politereftalanowych. Krajowa folia Estrofol ulega starzeniu nawet nieco wolniej niż angielska folia Melinex. Najszybciej spośród badanych folii ulega starzeniu pod wpływem wyładowań niezupełnych folia polietylenowa.

#### 4.2. Badania czasu życia.

Końcowym rezultatem starzenia dielektryków stałych poddanych działaniu wyładowań niezupełnych jest całkowite zniszczenie ich własności izolacyjnych, t.j. przebicie. Czas do przebicia jest silnie uzależniony od wartości przyłożonego napięcia określającej natężenie pola elektrycznego oraz od częstotliwości. Zależność tę, zwaną krzywą życia, można opisać za pomocą następującej funkcji potęgowej [1,2,3,4,5] :

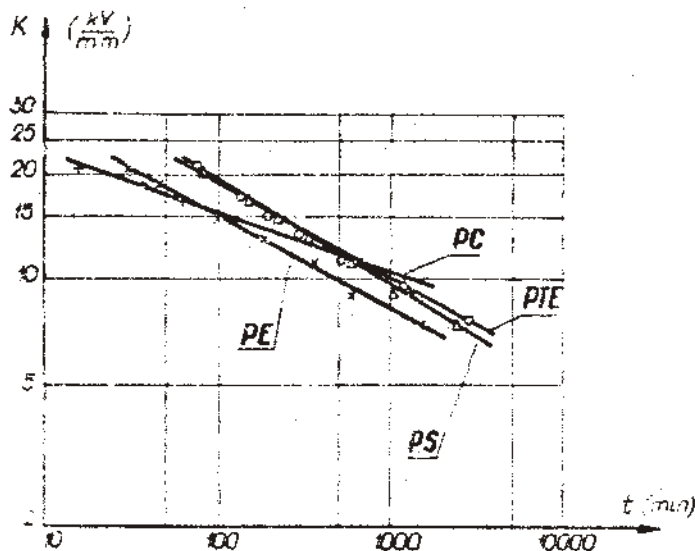
$$t = \frac{A}{f \cdot U^n}$$

gdzie:  $t$  - średni czas życia /na przykład mediana/,  $U$  - wartość przyłożonego napięcia,  $f$  - częstotliwość,  $A$  oraz  $n$  - pewne stałe zależne od rodzaju dielektryku oraz od zastosowanego układu elektrod.

Krzywa życia przy danej częstotliwości może więc być przedstawiona w postaci linii prostej we współrzędnych logarytmicznych. Powyższa zależność jest jednak słuszna tylko w określonych granicach napięcia i częstotliwości [1,2,3,4], w których występuje erozyjny mechanizm starzenia na skutek działania wyładowań niezupełnych.

Na rys.6. przedstawiono krzywe życia czterech rodzajów folii

produkcji krajowej. Porównując otrzymane wyniki można stwierdzić, że najdłuższymi czasami życia charakteryzuje się folia Estrofol oraz folia Poloren. Folia Bistan Af dla dużych wartości natężenia pola posiada najkrótsze czasy życia, jednakże nachylenie krzywej życia tej folii jest małe i dla małych napiężeń elektrycznych można spodziewać się długich czasów życia. Jednak wymaga to jeszcze dokładnego sprawdzenia eksperymentalnego ze względu na bardzo duże rozrzuty wyników.



Rys.6. Krzywe życia folii elektroizolacyjnych: PC - folia poliwęglanowa Bistan Af, PE - folia polietylenowa, PS - folia polistyrenowa Poloren, PTE - folia politereftalanowa Estrofol.

Uzupełniając badania krzywych życia dokonano pomiarów mocy wyładowań niezupełnych. Na rys.7 przedstawiono zależność czasu życia

od mocy wyładowań dla trzech rodzajów folii produkcji krajowej. Wydaje się, że ten nowy sposób przedstawienia krzywych życia dostarcza dokładniejszych informacji o odporności na wyładowania niezupełne [1,2,3,4]. Wyniki pomiarów wskazują na znacznie lepszą odporność na wyładowania folii politeraftalanowej niż folii polistylenowej.

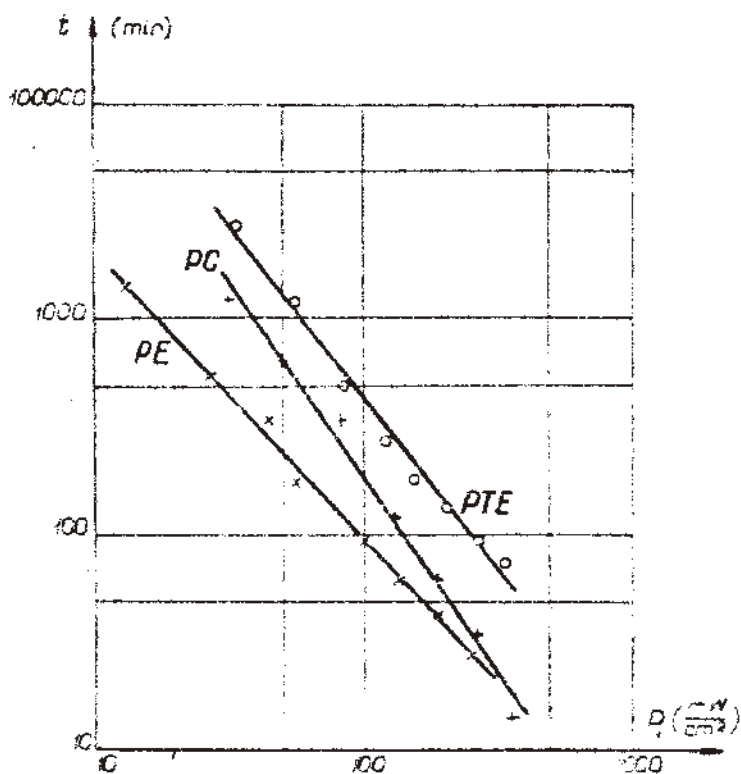


Fig. 7. Zależność czasu życia folii elektroizolacyjnych od mocy wyładowań niezupełnych działających na  $1 \text{ cm}^2$  powierzchni szczeliny: PC - folia poliwęglanowa Bistan Af, PE - folia polistylenowa, PTE - folia politeraftalanowa Estrofol.

Dla dokładniejszego ustalenia odporności na wyładowania folii poliwęglanowej należałoby jeszcze przeprowadzić badania przy małych wartościach natężenia pola /ok. 5 kV/mm/, przy których można oczekiwać mocy wyładowań poniżej 10 mW/cm<sup>2</sup>.

### 5. Wnioski.

1. Odmiennie kryteria przyjmowane do oceny odporności dielektryków na wyładowania niezupełne mogą prowadzić do sprzecznych wyników.
2. Jako syntetyczne kryterium odporności dielektryków na wyładowania niezupełne, ujmujące całościowo wszystkie fizyko-chemiczne zmiany degradacyjne w złożonym procesie starzenia, może być uważany czas życia w określonych warunkach pracy.
3. Dla prawidłowego określenia odporności dielektryków na wyładowania niezupełne wydaje się lepiej odnosić czas życia do mocy /lub energii/ wyładowań niż do wartości natężenia pola.
4. Spośród badanych folii elektroizolacyjnych stosunkowo wysoką odpornością na wyładowania niezupełne cechują się folie politereftalanowe Estrofol oraz Melinex. Dla określenia odporności na wyładowania folii poliwęglanowych należy przeprowadzić jeszcze badania przy mniejszych wartościach natężenia pola.

### Literatura

1. Bui - Ai, Guyetand A., Lacoste R., Pham Van Vui - Przegląd Elektrotechniczny 1969/1
2. Dobroszewski R. - Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska 1970r
3. Dobroszewski R. - Materiały VI Konferencji naukowo-technicznej Politechnika Poznańska, SEP, Poznań 1972
4. Kojkow S.N., Cikin A.N. - Elektrieszeskoje starenije twiordych

dielektrikow i nadiożnośť dielektriczeskich dietalej.  
Izd.Energija, Leningrad 1968.

5. Kreuger F.H. - Rev.Gén. de l'Electr. 1968/5.
6. Oudin G.M.,Rercille Y.,Thévenon H. - Rev.Gén.de l'Electr. 1968/4.
7. I E C. T C. 15 B Secretariat 19, June 1967 - Tests to compare the resistance of insulating materials to breakdown by internal discharges.
8. FN-70/E-04066 - Wyladowania niezupewne w izolacji przy napięciu przemiennym. Metody badań.