

Ryszard Dobroszewski, Kazimierz Gałczyński, Krzysztof Siodła

BADANIE ZMIENNOŚCI WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W SZCZELINIE POWIETRZNEJ  
MIĘDZY ELEKTRODĄ METALOWĄ A POWIERZCHNIĄ DIELEKTRYCZNĄ

1. Wstęp

Nimo znacznego postępu techniki pomiarów wyładowań niezupełnych dotąd nie udało się stwierdzić jednoznacznych zależności charakterystyk wyładowań i procesów starzeniowych zachodzących pod ich wpływem w dielektrykach stałych. Ze względu na złożoność zjawisk i dużą ilość parametrów trudnych do kontrolowania, celowe jest prowadzenie badań na prostych układach modelowych. Jednym z szeroko stosowanych modeli jest układ z płaską szczeliną gazową typu otwartego, w którym wyładowania działają na stosunkowo dużą powierzchnią dielektryka [2, 5]. Taki model ułatwia badanie starzeniowych zmian własności dielektrycznych próbki oraz zmian strukturalnych.

W prezentowanej pracy omówiono wyniki badań wyładowań niezupełnych w układach metal-powietrze-polietylen prowadzonych przy zastosowaniu wielokanałowego analizatora impulsów. Pomiarową techniką wielokanałową umożliwiającą dokładne śledzenie zmian charakterystyk wyładowań w czasie [1,4,9]. Poznanie zmienności wyładowań ma istotne znaczenie przy badaniach procesów starzeniowych polimerów, a w dalszej perspektywie może ułatwić interpretację wyników badań diagnostycznych układów izolacyjnych.

---

dr inż. Ryszard Dobroszewski, mgr inż. Kazimierz Gałczyński,  
mgr inż. Krzysztof Siodła - Politechnika Poznańska

## 2. Metodyka badań

Podstawowym modelem przyjętym do badań wyładowań niezupełnych był układ ze szczeliną powietrzną, utworzoną między elektrodą płaską o średnicy 25 mm a folią polietylenową o grubości  $d = 0,22$  mm, pokrywającą drugą elektrodę płaską o średnicy 100 mm. Elektrody wykonano ze stali nierdzewnej, a szerokość szczeliny regulowano za pomocą śruby mikrometrycznej. Badania prowadzono dla małych szczelin  $/a = 0,1 - 1$  mm/, przy ciśnieniu atmosferycznym bez wymuszonego przepływu powietrza.

W celach porównawczych wykonano także pomiary wyładowań w układzie bez szczeliny  $/a = 0/$ , a więc dla typowych wyładowań ślizgowych. Ponadto w badaniach zastosowano także szczelinę w układzie ostrze - płyta pokryta folią polietylenową. Elektrodę ostrzową wykonano z molibdenu /promień ostrza  $35 \mu\text{m}$  /.

Wszystkie pomiary prowadzono przy napięciu przemiennym o częstotliwości 50 Hz. Zasadniczy element układu pomiarowego wyładowań niezupełnych stanowił wielokanałowy analizator impulsów typu AI-1024-4. Jako filtr przeciwzakłóceńowy zastosowano dławik powietrzny nąbudowany bezpośrednio na kondensatorze sprzęgającym - elementy te stanowią część typowego układu MUT-8 firmy TuR. Impedancję pomiarową /rezystor  $75 \Omega$  / włączono szeregowo z kondensatorem sprzęgającym. Skalowanie układu pomiarowego przeprowadzano za pomocą generatora impulsów prostokątnych typu PGP-5 i dobieranego kondensatora o małej pojemności. Charakterystyki metrologiczne zastosowanego układu podano w pracy [4].

Wyniki pomiarów, w postaci rozkładów ładunku  $n = f(q)$ , otrzymywano w postaci analogowej i cyfrowej za pomocą rejestratora X-Y i drukarki cyfrowej. Na podstawie zarejestrowanych rozkładów wyznaczano następujące wielkości:  $q_{\text{maks}}^+$ ,  $q_{\text{maks}}^-$  - wartości maksymalne ładunku pozornego wyładowań obu biegunowości,  $N$  - całkowita liczba wyładowań w czasie 1 s

$$N = \sum n_k^+ + \sum n_k^-$$

gdzie  $n_k$  oznacza liczbę wyładowań w danym kanale charakteryzujących się ładunkiem  $q_k$ ,

$I$  - średni prąd wyładowań niezupełnych

$$I = \sum n_k^+ \cdot q_k^+ + \sum n_k^- \cdot q_k^- = \sum i_k^+ + \sum i_k^-$$

W obliczeniach powyższych wielkości uwzględniano tylko te wyładowania, których częstotliwość powtarzania była równa co najmniej  $50 \text{ s}^{-1}$ . Za wyładowania dodatnie [2] przyjęto te wyładowania, które występują w ujemnym półokresie napięcia na elektrodzie wysokonapięciowej /dielektryk bombardowany elektronami/, a w przyjętym układzie pomiarowym dają dodatnie impulsy napięcia na impedancji pomiarowej.

W celu zbadania udziału wyładowań o danym ładunku w prądzie wyładowań przekształcano zarejestrowane rozkłady ładunku obliczając prądy cząstkowe  $i_k = n_k \cdot q_k$ , co pozwoliło na wykonanie wykresów  $i = f(q)$ .

Zmienność charakterystyk wyładowań balano w czasie ograniczonym do 8 h /w przypadku układu ostrze - płyta do 15 h/. Badania te są kontynuowane dla czasów dłuższych.

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Wyładowania ślizgowe

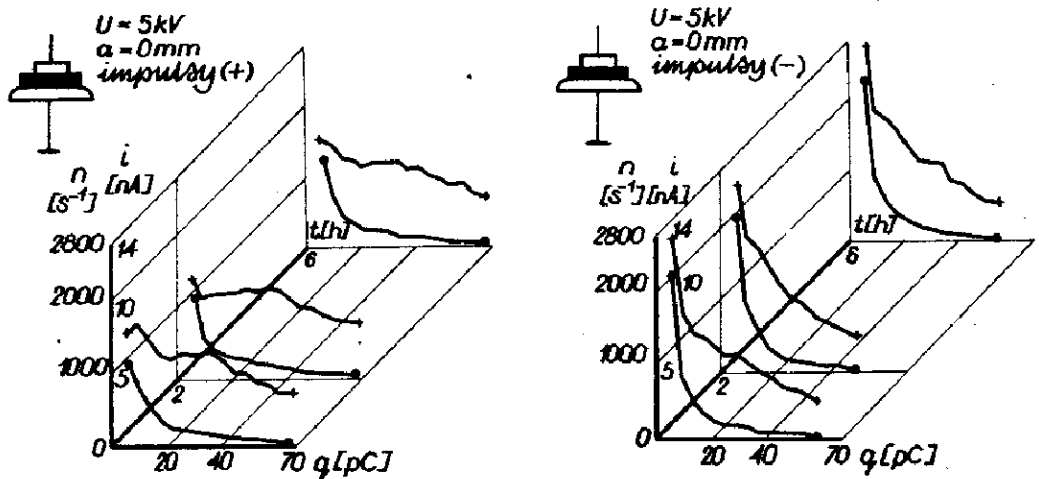
Pomiary wyładowań ślizgowych przeprowadzono w układzie z elektrodą płaską przylegającą do folii polietylenowej. Cechą charakterystyczną tych wyładowań jest stosunkowo duży rozrzut ładunku pozornego, przy czym częstość wyładowań stopniowo maleje ze wzrostem wartości ładunku.

Rozkłady tego typu wyładowań można aproksymować funkcją wykładniczą [9].

Duży rozrzut ładunku można tłumaczyć tym, że wyładowania w takim układzie rozwijają się w szczelinach o różnej szerokości między zaokrągloną krawędzią elektrody a częściami powierzchni dielektryka stałego. Poza tym przyczyną rozrzutu może być ładunek pozostawiony na powierzchni dielektryka przez każde wyładowanie, który zmieniając pole lokalne może wpływać na długość i ładunek następnego wyładowania. Wzrost napięcia przyłożonego będzie w tym przypadku powodował przede wszystkim wzrost

$q_{\text{maks}}$ .

Na rysunku 1 przedstawiono rozkłady ładunku  $n = f(q)$  oraz wykresy prądów cząstkowych  $i = f(q)$  wyładowań o biegunowości dodatniej i ujemnej. Obserwuje się przewagę częstości wyładowań dodatnich, zwłaszcza w zakresie małych i średnich ładunków. Krzywe rozkładu ładunku ulegają stosunkowo małym zmianom w czasie /do 6 h/. Podobne zachowanie się wyładowań ślizgowych, ale w czasie znacznie krótszym /do 30 min/ obserwowano w pracy [3].



Rys.1. Zmiany w czasie rozkładów ładunku oraz wykresów prądów cząstkowych wyładowań ślizgowych : o -  $n=f(q)$ , + -  $i=f(q)$

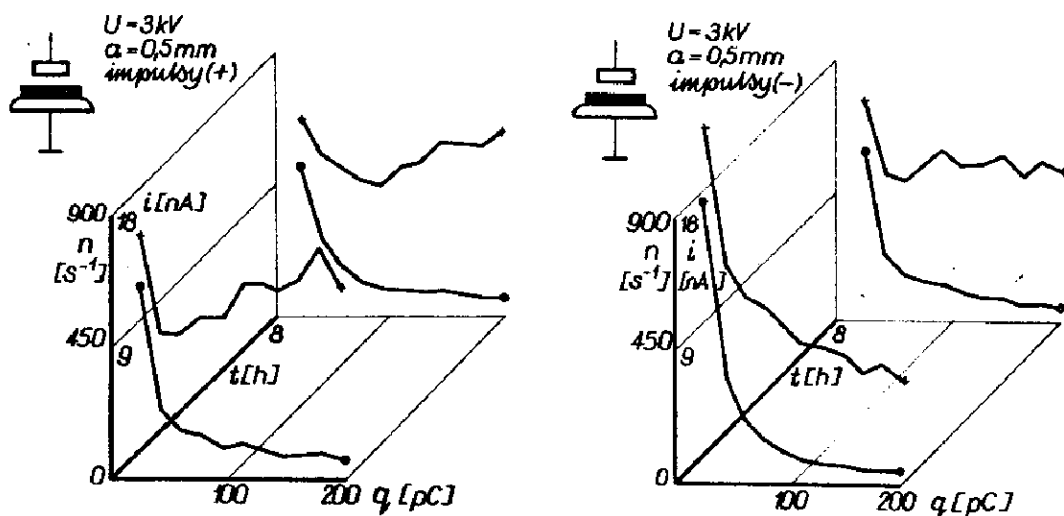
Wykresy prądów cząstkowych wyładowań  $i=f(q)$  mają różny przebieg dla obu biegunowości. Dla wyładowań ujemnych zależność ta zachowuje ten sam wykładniczy charakter jak rozkład ładunku, a wyładowania o małym ładunku mają duży udział w prądzie. Wykres dla wyładowań dodatnich jest inny - daje się zauważyć znaczny wzrost udziału wyładowań o średnim i dużym ładunku w całkowitym prądzie wyładowań.

Zależności  $i=f(q)$  dla wyładowań ślizgowych, podobnie jak krzywe rozkładu ładunku, ulegają także niewielkim zmianom w czasie.

### 3.2. Wyładowania w płaskiej szczelinie powietrznej

Wyładowania niezupełne zachodzące w szczelinie między elektrodą płaską a powierzchnią polietylenu, w przypadku małych szczelin /np.  $a=0,1$  mm/ zachowują ten sam charakter co wyładowania ślizgowe. Ze wzrostem napięcia przyłożonego rośnie ładunek maksymalny, wzrasta też częstotliwość wyładowań oraz prąd wyładowań. Zwiększenie szerokości szczeliny powoduje wzrost ładunku maksymalnego oraz zmniejszenie częstości wyładowań /przy  $U=const$ /. Prąd wyładowań w tych warunkach początkowo rośnie, a później maleje.

Na rysunku 2 przedstawiono rozkłady  $n=f(q)$  oraz zależności  $i=f(q)$  dla wyładowań dodatnich i ujemnych w szczelinie o szerokości 0,5 mm. Rozkłady ładunku zachowują nadal charakter zbliżony do wykładniczego i wykazują stosunkowo małą zmienność w czasie /do 8 h/.

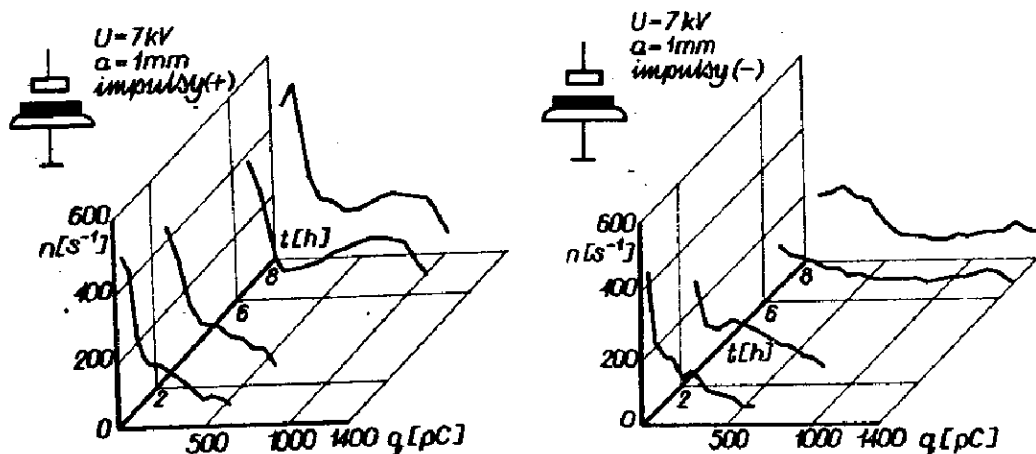


Rys.2. Zmiany w czasie rozkładów ładunku oraz wykresów prądów cząstkowych wyładowań w szczelinie powietrznej  $a=0,5$  mm ;  
o -  $n=f(q)$ , + -  $i=f(q)$

Jest jednak widoczna wyraźna zmiana zależności  $i=f(q)$  w stosunku do wyładowań ślizgowych - udział w prądzie jest prawie jednakowy dla całego zakresu ładunku /szczególnie dla wyładowań dodatnich/. Zmiany tych zależności w czasie są niewielkie /nieco większe dla wyładowań ujemnych/.

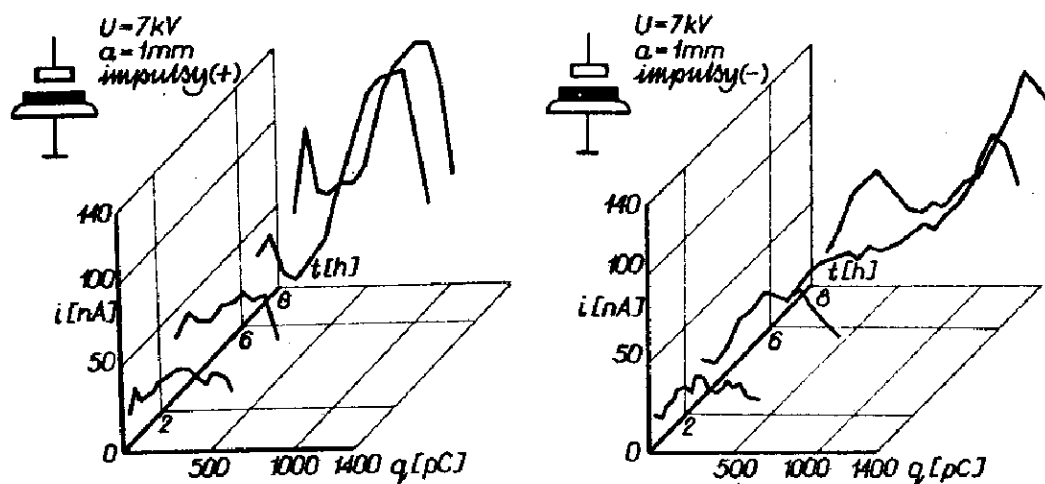
Zwiększenie szerokości szczeliny do 1 mm powoduje powstanie nowego typu rozkładu  $n=f(q)$ , w którym można wyróżnić maksimum częstotliwości odpowiadające pewnej wartości ładunku /rys. 3/, nałożone na krzywą typu wykładniczego. Maksimum to pojawia się jednak z reguły dopiero po pewnym czasie, np. 100-300 minut dla wyładowań o biegunowości dodatniej. Przy ujemnej biegunowości maksimum rozkładu było trudne do określenia. W czasie do kilku godzin następuje wzrost ładunku maksymalnego, a później zaczyna się tendencja jego stabilizacji. Całkowita liczba wyładowań początkowo maleje /w czasie do ok. 3 h/, a później wzrasta, natomiast średni prąd wyładowań z reguły rośnie w czasie.

Zależności prądów cząstkowych  $i=f(q)$  wyładowań dodatnich i ujemnych dla szczeliny  $a=1$  mm przedstawiono na rysunku 4. Początkowo zależności te charakteryzują się dość wyraźnym maksimum /np. dla  $q \approx 300$  pC/, ale z upływem czasu ulegają dużym zmianom - pojawia się drugie maksimum



Rys.3. Zmiany w czasie rozkładów ładunku wyładowań w szczelinie powietrznej  $a=1$  mm

w zakresie ładunków większych. Występowanie zarówno maksimum rozkładu  $n=f(q)$ , jak i maksimum zależności  $i=f(q)$ , wiąże się najprawdopodobniej z lokalizacją wyładowań w pewnych miejscach próbki, co w tych warunkach często prowadzi do szybkiego jej przebicia /np. po kilku godzinach/.



Rys.4. Zmiany w czasie wykresów prądów cząstek wyładowań w szczelinie powietrznej  $a=1$  mm

Na podstawie omówionych wyników dokonano wyboru szczeliny o szerokości 0,5 mm do badań starzeniowych polietyleniu prowadzonych metodą spektrofotometrii w podczerwieni [5].

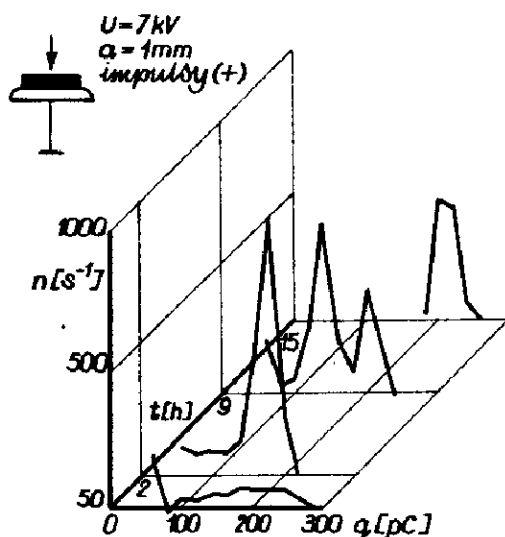
### 3.3. Wyładowania w szczelinie między elektrodą ostrzową a powierzchnią polietyleniu

Dalsze badania przeprowadzono w układzie ostrze - płyta pokryta folią polietylenową, w którym z powodu silnej koncentracji pola elektrycznego wyładowania są zlokalizowane na małej części powierzchni próbki. Podobne układy, np. ostrze - czasza [6], bywają stosowane jako wzorce wyładowań o znanym ładunku. W tego typu szczelinach obserwuje się wyraźny wpływ biegunowości na charakter wyładowań [3, 7].

Przy ujemnej biegunowości ostrza powstają wyładowania o prawie identycznym ładunku, powtarzające się ze stosunkowo dużą częstością, rosnącą ze wzrostem wartości napięcia. Wyładowania te mają charakter impulsów Trichela, typowych dla ulotu w powietrzu. Przy biegunowości przeciwnej wyładowania powtarzają się z mniejszą częstością i charakteryzują się większymi wartościami ładunku przy znacznym rozrzucie. Wstutek tego rozkład ładunku wyładowań dodatnich cechuje się bardzo wyraźnym wąskim maksimum, a w rozkładzie wyładowań ujemnych także występuje maksimum, lecz rozkład ten jest znacznie szerszy.

Badania rozkładów ładunku przeprowadzono dla szerokości szczeliny zmienianej w zakresie od 0,2 mm do 7 mm. Stwierdzono, że dla małych szczelin /do  $a \approx 0,7$  mm/ wyładowania mają charakter wyładowań ślizgowych o wykładniczym rozkładzie ładunku. Dla większych szczelin wyładowania mają charakter podobny do ulotu, lecz wskutek obecności dielektryka stałego rozkłady ulegają zmianom w czasie.

Dla przykładu na rysunku 5 pokazano typowe zmiany rozkładu ładunku wyładowań dodatnich w szczelinie o szerokości 1 mm. W ciągu pierwszych minut po przyłożeniu napięcia rozkład często jest dosyć płaski i nieregularny, lecz później obserwuje się powstanie wyraźnego maksimum, jak w przypadku impulsów Trichela. W czasie do kilku godzin maksimum rozkładu objawia tendencję do przesuwania się w kierunku nieco mniejszych ładunków, lecz po dłuższym czasie powstaje drugie maksimum w zakresie ładunków większych. Po kilkunastu godzinach to drugie maksimum zwykle rośnie, podczas gdy pierwsze maleje. W podobny sposób zachowuje się zależność prądów cząstkowych  $i=f(q)$ .



Rys.5. Zmiana w czasie rozkładu ładunku wyładowań w układzie ostrze - płyta dla odległości  $a=1$  mm

#### 4. Podsumowanie

Wyładowania w szczelinach powietrznych typu otwartego, między ostrzową elektrodą metalową a powierzchnią polietylenu charakteryzują się dwoma podstawowymi typami rozkładów ładunku :

- dla szczelin o małej szerokości /ułamki milimetra/ rozkład wykładniczy, typowy dla wyładowań ślizgowych,
- dla szczelin szerszych rozkład z wyraźnym maksimum, zbliżony do rozkładu wyładowań ulotowych.

Wyładowania w szczelinach płaskich o małej szerokości zachowują cechy wyładowań ślizgowych, lecz dla szczelin większych w rozkładzie ładunku pojawia się maksimum odpowiadające stosunkowo dużym ładunkom, nałożone na krzywą wykładniczą. Może to oznaczać, że w ostatnim przypadku zachodzą także wyładowania o charakterze zbliżonym do ulotowego [7]. Zjawisko to jest szczególnie widoczne po dłuższym czasie działania wyładowań niezupełnych /rzędu godzin/. Również w szczelinie ostrze metalowe-



dielektryk stały po dłuższym czasie obserwuje się powstanie drugiego maksimum rozkładu w zakresie większych ładunków.

Pojawienie się maksimum powoduje znaczne zwiększenie udziału wyładowań o dużym ładunku w całkowitym prądzie wyładowań. Jest to szczególnie widoczne dla wyładowań dodatnich, to znaczy gdy powierzchnia dielektryka jest bombardowana przez elektrony, co może mieć wpływ na mechanizm przebiccia dielektryka stałego.

Obserwowane zmiany długotrwałe rozkładów świadczą o zmianach mechanizmu wyładowań, na który niewątpliwie wpływają zmiany powierzchniowe polietylenu. Zbadanie tych zjawisk może być przyczynkiem do lepszego poznania procesów starzeniowych polimerów powodowanych przez wyładowania niezupełne.

### Literatura

1. Bartnikas R. : Note on Multichannel Corona Pulse-Height Analysis. IEEE Trans.Elec.Insul., vol.EI-8, No 1, 1973.
2. Bui-Ai : Contribution à l'étude de la dégradation des isolants en feuilles sous l'action des décharges partielles. Thèse d'Etat, Université de Toulouse, 1966.
3. De Vre R., Couvreur M. : Study of Simple Models of Partial Discharges, IEEE Conf.Record of 1976 Int.Symp.Elec.Insul., Montreal, 1976.
4. Dobroszewski R., Gałczyński K., Siodła K. : Zastosowanie wielokanałowego analizatora impulsów AI-1024-4 do badań charakterystyk wyładowań niezupełnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej "Elektryka" /w druku/.
5. Dobroszewski R., Olsztyńska J. : Badanie procesu utleniania polietylenu poddanego działaniu wyładowań niezupełnych. Materiały IV Sympozjum "Problemy wyładowań niezupełnych w układach elektroizolacyjnych", AGH. Kraków 1983.
6. Hogg W.K., Walley C.A. : An Assessment of The Point-Hemisphere Gap as A Partial Discharge Reference. Journ.Sci.Inst., vol.43, No 1, 1966.
7. Mayoux C., Goldman M. : Partial Discharges in Solid Dielectrics and Corona Discharge Phenomena. Journ. Appl.Phys., vol.44, No 9, 1973.
8. Reynders J.P. : Measurement of The Effects of Partial Discharge Activity Polyethylene. IRE Int.Conf.on Diel.Mat., Meas. and Appl., Birmingham 1979.
9. Włodek R., Florowska B., Gacek R., Prochownik A. : Opracowanie podstaw zastosowania techniki detekcji i analizy wyładowań niezupełnych do rozwoju konstrukcji i technologii układów elektroizolacyjnych. Opracowanie w ramach problemu resortowego R.I.13, AGH-IMISUE, 1984.