

BADANIA MODELOWE PRZEBICIA DŁUGOTRWAŁEGO
W IZOLACJI POLIETYLENOWEJ

1. Wstęp

Starzenie elektryczne polimerów kablowych przeprowadza się zwykle na modelach izolacji o grubości kilku mm, z utworzoną sztuczną wtrąciną gazową lub metalowym ostrzem. Kształt wtrąciny gazowej bywa dość różny: od cylindrycznego wgłębienia np. o średnicy 1 - 5 mm i głębokości 0,2 - 2 mm, aż do ostrego stożka, utworzonego przez nakłucie izolacji igłą metalową. Do wybranego modelu izolacji doprowadza się napięcie probiercze, zwykle przemienne i mierzy się czas T do przebicia wywołanego długotrwałym działaniem pola elektrycznego E .

Wyniki pomiarów ujmuje się równaniem, zwanym krzywą życia izolacji, $TE^n = \text{const}$, które w skali logarytmicznej przedstawia prosta o współczynniku nachylenia $a = -\frac{1}{n}$.

Jeżeli w przedziale stosowanych naprężeń probierczych występuje tylko jeden rodzaj mechanizmu starzeniowego prowadzącego do przebicia, to wykładnik "n" ma stałą wartość, którą przyjmuje się jako parametr charakterystyczny dla materiału izolacyjnego modelu. W przeciwnym przypadku prosta życia izolacji wykazuje zmiany nachylenia /inne wartości n / w przedziałach E , w których są odmienne mechanizmy starzeniowe [1].

Celem niniejszej pracy jest wyjaśnienie niektórych zjawisk występujących w wybranych modelach izolacji polietylenowej starzonej w temperaturze otoczenia przy różnych naprężeniach elektrycznych.

2. Przedmiot i zakres badań

Modele izolacji zostały wykonane z odcinków kabli o izolacji polietylenowej /PE/ na napięcie 15 kV i o przekroju żyły 50 mm² Al, z których usuwano powłokę zewnętrzną, ekrany przewodzące i półprzewodzące, pozostawiając czystą powierzchnię izolacji PE.

Stosowano wtrąciny otwarte, nieprzewietrzane, uzyskiwane przez nakłucie zewnętrznej warstwy PE igłą do szycia nr 5 /r = 0,05 mm/, oraz wprowadzano w PE igły nr 5 jako ostrze metalowe. We wszystkich przypadkach starano się zachować grubość nieuszkodzonej części izolacji około 2,3 mm.

Do każdego nakłucia otwartego doprowadzano napięcie probiercze za pomocą elektrod z przewierconymi otworami, które dotykały powierzchni izolacji, ale nie zamykały wylotu nakłucia. Igły odpowiednio zabezpieczano przed wysuwaniem się z PE. Żyły kabli były uziemione.

Napięcie probiercze o częstotliwości 50 Hz i 500 Hz mierzono woltomierzem elektrostatycznym i zmieniano w zakresie 10 - 20 kV, co odpowiada średnim naprężeniom w izolacji $E_{sr} = 2,2 - 4,5$ kV/mm.

Naprężenie maksymalne E_m na wierzchołku igły obliczano z wzoru podanego w [5] :

$$E_m = \frac{2 U}{r \cdot \ln \left[1 + \frac{4d}{r} \right]}$$

gdzie r - promień ostrza [mm]

d - grubość izolacji pod nakłuciem [mm]

Ten sam wzór stosowano dla nakłucia gazowego zakładając, że przy napięciu probierczym występuje wewnątrz jonizacja gasu, wystar-

czająca do utworzenia przewodzącego ostrza gazowego.

Przebicie próbek otrzymywano przeważnie w przedziałach czasowych 1 - 20 godz., a w niektórych przypadkach 100 - 1000 godz.

Obok badań wytrzymałości elektrycznej prowadzono obserwacje mikroskopowe śladów wyładowań w próbkach PE, wyciętych z odcinka kabla, po różnych czasach ekspozycji.

3. Wyniki badań

Rys. 1 przedstawia uzyskane krzywe życia izolacji, które dla zakresu czasów 0,1 - 10 godz. można opisać równaniami:

dla elektrod igłowych /szpilki/

$$\text{przy 500 Hz} \quad \lg E = - 0,171 \lg T + 2,01 \quad /n = 5,8/ \quad /2/$$

$$\text{przy 50 Hz} \quad \lg E = - 0,184 \lg T + 2,07 \quad /n = 5,4/ \quad /3/$$

dla ostrza gazowego

$$\text{przy 500 Hz} \quad \lg E = - 0,104 \lg T + 2,10 \quad /n = 9,6/ \quad /4/$$

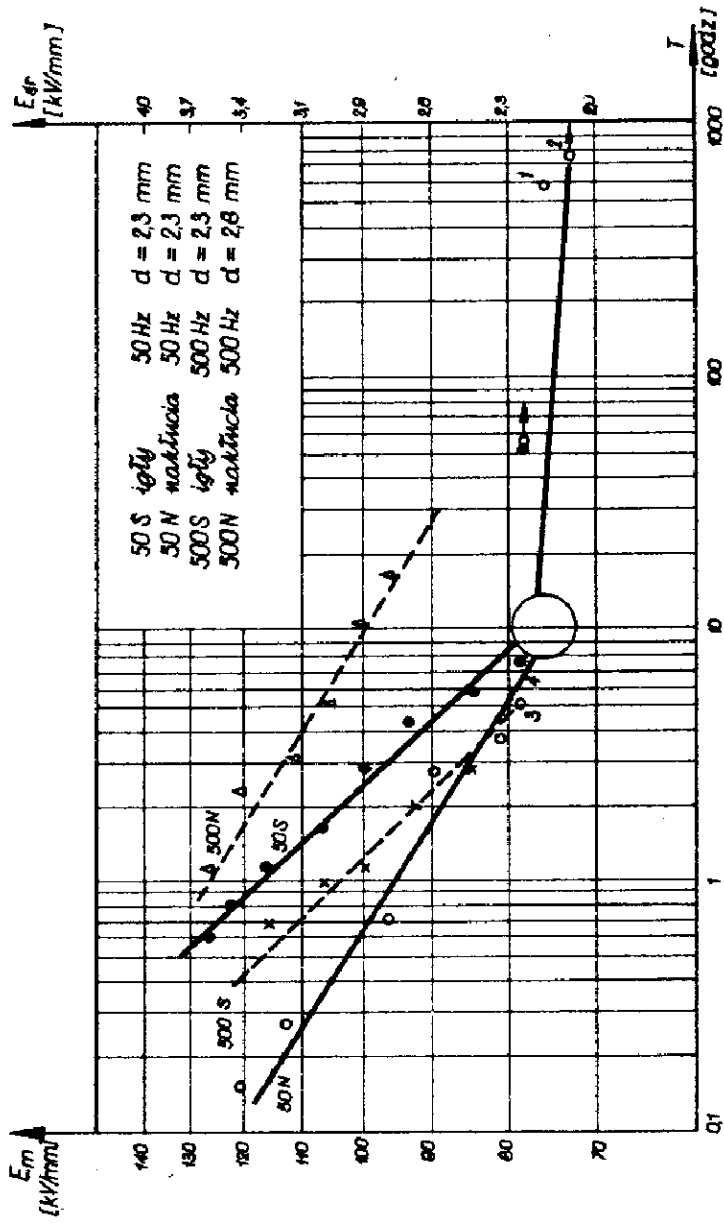
$$\text{przy 50 Hz} \quad \lg E = - 0,109 \lg T + 1,98 \quad /n = 9,2/ \quad /5/$$

Każdy punkt krzywej jest średnią arytmetyczną z 8 - 10 pomiarów. Mimo znacznego rozrzutu czasów do przebicia w poszczególnych seriach badań, punkty średnie układają się dość dobrze wzdłuż prostej analitycznej.

Proste wyznaczone dla ostrza gazowego i metalowego mają różne nachylenia. Wykładnik potęgowy dla modeli z ostrzem gazowym wynosi $n = 9,2 - 9,6$, co dobrze odpowiada wartości $n = 9$, spotykanej w literaturze [1], natomiast dla elektrod szpilkowych uzyskano wartości $n = 5,4 - 5,8$.

Proste uzyskane dla określonego rodzaju elektrod przy 50 Hz i 500 Hz są do siebie równoległe.

Obrazy mikroskopowe śladów wyładowań drzewiastych są różne przy ostrzach gazowych /rys. 2/ i metalowych /rys. 3/, ale podobne przy 50 Hz i 500 Hz.



Rys. 1. Krawce tycia izolacji

Proste 50 s i 50 N przecinają się przy $E_m \approx 70$ kV/mm, tj. przy naprężeniu, przy którym wewnątrz ostrza gazowego zaczynają się wyładowania. Można oczekiwać, że w tym obszarze wystąpią załamania prostych lub przynajmniej prostej dla ostrza gazowego, a to wskutek wygaszania lub osłabienia jonizacji gazu. W pracy [3] dla takich samych modeli izolacji badanych przy 50 Hz otrzymano przebicie po 600 godz. przy $E_m = 77$ kV/mm, a dla $E_m = 72$ kV/mm nie uzyskano przebicia do 700 godz. /p. 1 i 2 - rys. 1/. Mikroskopowe obrazy wyładowań otrzymane w tych badaniach mają kształt wyraźnie odbiegający od typowych "drzewek" /rys. 4/. Można więc stwierdzić, że dla przyjętych modeli izolacji przy długich czasach ekspozycji napięciowej występuje odmienna postać mechanizmu starzeniowego. Gdyby uwzględnić p. 1 i 2 oraz przyjął, że przecięcie prostych leży wewnątrz okręgu koła wyznaczonego przez rozrzut wyników /rys. 1/, to z nachylenia odcinka prostej łączącej wymienione punkty otrzymuje się $n \approx 30 - 40$.

Dla sprawdzenia hipotezy o różnych postaciach mechanizmu przebicia starzeniowego, występujących przy naprężeniach krytycznych / dla długich czasów/ przeprowadzono dodatkową serię badań na 4 odcinkach kabla z 16 ostrzami gazowymi i 16 ostrzami metalowymi. Do wszystkich próbek doprowadzono napięcie probiercze 10 kV, 50 Hz, co odpowiada naprężeniu maksymalnemu na wierzchołku ostrzy $E_m = 77$ kV/mm. Wyniki tej serii badań zgrupowały się w dwóch wyraźnie odrębnych obszarach czasowych: dla 9 ostrzy gazowych uzyskano przebicie w zakresie 2,6 - 6,3 godz. /średnio 4,7 godz./, a dla 8 ostrzy metalowych - w zakresie 1,8 - 13,1 godz. /średnio 7,2 godz./. Nowe punkty pomiarowe dobrze leżą na uprzednio wyznaczonych prostych 50 s i 50 N /p. 3 i 4 na rys. 1/. Dla pozostałych próbek nie uzyskano przebicia w ciągu 55 godz. tj. po 32 godz. od ostatniego przebicia.

4. Interpretacja wyników badań

Podstawowe założenie, że wewnątrz otwartego nakłucia występuje jonizacja gazu i tworzy się przewodzące ostrze gazowe, jest spełnione dla napięć powyżej 9 - 10 kV. Przy grubości izolacji kabla 4,5 mm i głębokości nakłucia około 2,2 mm otrzymuje się naprężenie wzdłuż nakłucia gazowego $E_g = 3 \text{ kV/mm}$, a więc wystarczające do jonizacji, natomiast na wierzchołku ostrza gazowego, o promieniu $r = 0,05 \text{ mm}$, naprężenie wypada $E_m = 77 \text{ kV/mm}$.

Można więc przyjąć, że po przyłożeniu określonego napięcia probierczego $U > 10 \text{ kV}$ naprężenie w izolacji modelu z igłą metalową i ostrzem gazowym będą jednakowe lub prawie jednakowe. Początkowy rozkład naprężeń w izolacji będzie się zmieniał w czasie rozwoju wyładowań w PE i to zarówno przy ostrzu gazowym jak metalowym.

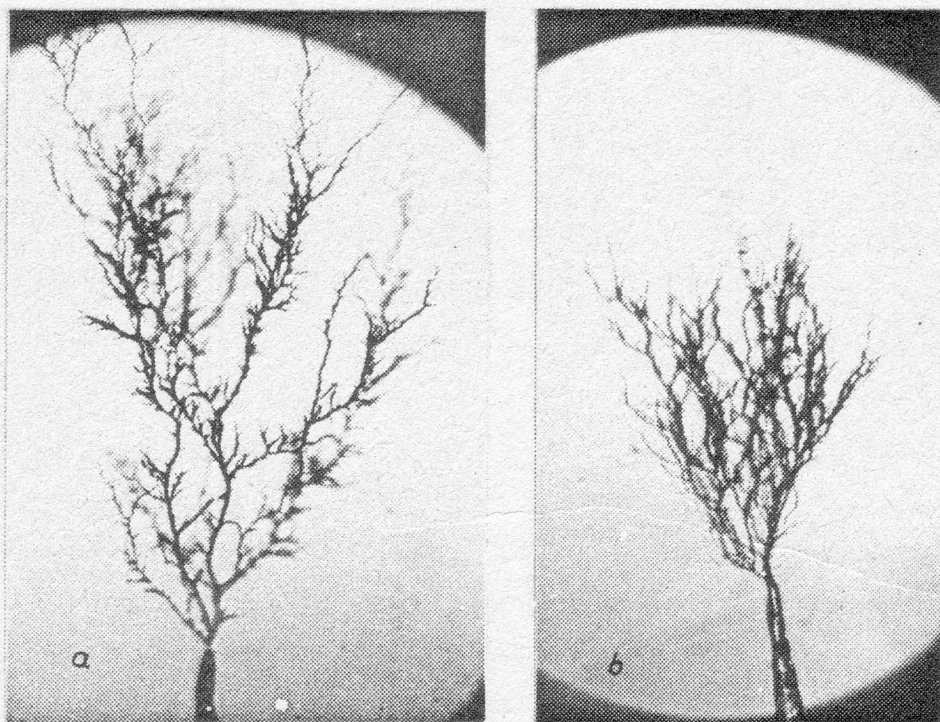
Przy ostrzu gazowym destrukcja PE może się rozpocząć bądź wskutek działania silnego pola E_m w izolacji, bądź wskutek współdziałania plazmy wyładowania gazowego z powierzchnią PE. Wydaje się jednak, że skutki destrukcji powierzchniowej występują po dłuższym czasie niż zjawiska objętościowe w PE przy wierzchołku ostrza.

Efektom działania silnego pola elektrycznego jest przerwanie wiązań w łańcuchach PE połączone z wydzielaniem gazów /wodór i węglowodory/ i wolnego węgla. Na wierzchołku ostrza, w miejscu gdzie jest największe lokalne natężenie pola, tworzy się pojedynczy kanalik gazowy, na którego ściankach jest osadzony węgiel, zwiększający przewodność powierzchniową.

Przy otwartym ostrzu wydzielające się gazy nie powodują znacznego wzrostu ciśnienia wewnątrz ostrza i nie ma zjawiska wygaszania wyładowania.

Wskutek zwiększonej przewodności zarówno powierzchniowej jak i objętościowej nowopostąpił kanalik gazowy zmienia początkowy rozkład pola przy ostrzu w taki sposób, że największe E_m występuje na końcu kanalika, a nie na wierzchołku ostrza.

Dalszy rozwój kanałiku prowadzi do rozgałęzionego układu przestrzennego kanałów tworzących typowe "drzewko" /przedstawione na rys. 2/, które po dojściu do drugiej elektrody daje przebicie.

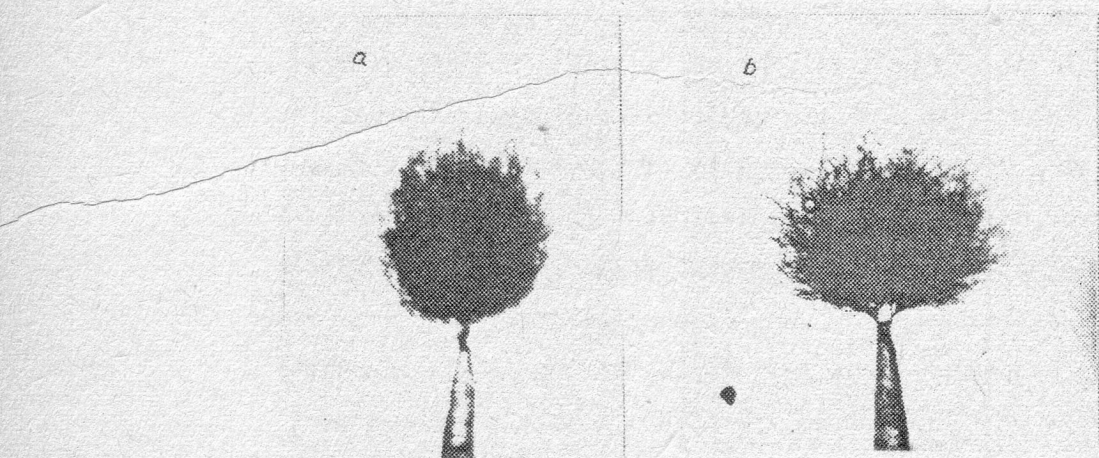


Rys. 2 Obrazy mikroskopowe typowych wyładowań w P.E z ostrzy gazowych
 a - przy 50 Hz, 15 kV po 0,25 godz.
 b - przy 500 Hz, 15 kV po 2,6 godz.

Kształty drzewek uzyskanych dla ostrzy gazowych przy 50 Hz i 500 Hz są podobne.

Przy ostrzu metalowym, umieszczonym w izolacji, destrukcja PE może się zacząć tylko wskutek zjawisk elektronowych przy ostrzu. W wytworzonym kanałiku gazowym, zamkniętym szczelnie metalową elektrodą ostrzową, rosnące ciśnienie gazu powoduje znaczne osłabienie lub zanik wyładowania. Lekko przewodzące ścianki kanałiku wyrównują

lokalny rozkład pola przy ostrzu, tak że ponowny zapłon wyładowania w tym samym kanalikach i jego sukcesywne wydłużenie mogą być trudniejsze, niż utworzenie w najbliższym sąsiedztwie nowych kanalików. Na końcu ostrza metalowego powstaje gęsta sieć kanałów, tworzących w przestrzeni prawie regularną kulę, która zmniejsza pierwotne pole E_m na ostrzu i utrudnia dalszy rozwój wyładowania w kierunku drugiej elektrody. Rys. 3 przedstawia typowe ślady wyładowań z igły metalowej uzyskane przy 50 Hz i 500 Hz. Wpływ "kuli" na rozkład pola przy ostrzu metalowym można prześledzić na podstawie śladów niektórych wyładowań, rozwijających się przy ostrzu w kierunku prawie prostopadłym do linii pola.



Rys. 3 Obrazy mikroskopowe typowych wyładowań w P.E. z ostrzy metalowych
 a - przy 50 Hz, 15 kV po 0,8 godz.
 b - przy 500 Hz, 15 kV po 0,68 godz.

Dalszy rozwój wyładowania może ułatwić dyfuzja gazów, co wymaga określonego czasu.

Efektom tych zjawisk jest kilkakrotnie dłuższy czas do przebicia

uzyskiwany dla izolacji z elektrodami ostrzowymi metalowymi, w porównaniu do elektrod ostrzowych gazowych, przy tym samym napięciu i tej samej grubości izolacji /p. rys. 2 krzywe 50 s i 50 N/. Jeżeli czas próby napięciowej jest jednakowy dla obu rodzajów uszkodzeń, to napięcie przebicia izolacji z nakłuciem ostrzowym otwartym będzie znacznie mniejsze od napięcia przebicia przy takim samym ostrzu metalowym.

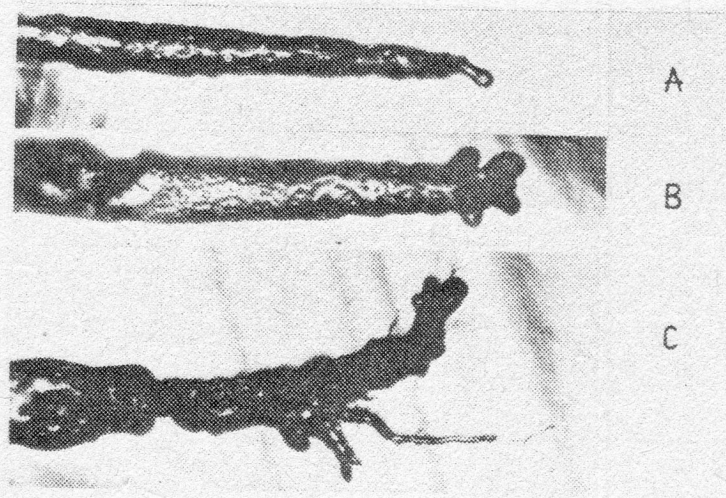
Większą stromość prostych, uzyskanych dla ostrzy metalowych, można uzasadnić tym, że przy większych naprężeniach E_m odkształcenie pola jest silniejsze - łatwiej tworzy się wyładowanie "kulowe", blokujące dalszy rozwój kanału przebicia.

W obszarze naprężeń krytycznych, przy których wyładowania w otwartym ostrzu gazowym są mało intensywne, ze względu na znaczny spadek napięcia nie można traktować ostrza gazowego jako ostrze przewodzące. Destrukcja PE następuje teraz głównie wskutek współdziałania słabo zjonizowanej plazmy z powierzchnią wewnętrzną nakłucia. Jak wskazuje rys. 4, proces destrukcji odbywa się na całej powierzchni nakłucia i prowadzi do zwiększenia promienia krzywizny ostrza. W ten sposób zmniejsza się jeszcze bardziej natężenie pola wewnątrz PE i maleją szanse na dość szybkie przebicie drzewiaste. Przy destrukcji powierzchniowej wydłużenie kanału następuje dość wolno, stąd długie czasy do przebicia. Niekiedy przypadkowo może się wytworzyć na czole kanału lokalne ostrze gazowe, w którym wzmocnienie pola będzie wystarczające do utworzenia "pseudodrzewka" i do przyspieszenia przebicia /rys. 4c/. Mechanizm taki jest dość prawdopodobny po wydrążeniu przez kanał znacznej drogi w izolacji.

Jeżeli w próbce zdąży się wytworzyć drzewko, zanim rozwinie się destrukcja powierzchniowa stępująca ostrze, wówczas taka próbka ulegnie przebiciu w znacznie krótszym czasie.

Ślady wyładowań podobne do przedstawionych na rys. 4a zostały zaobserwowane przez Lawsona i Vahlstroma [2] w próbkach izolacji

PE wyciętych z kabli 15 kV i 22 kV pochodzących z eksploatacji. Ten kształt śladów wyładowań nazwano "broccoli" /rodzaj kalafiora/, a ich występowanie wiąże się z określoną konstrukcją kabla, /ekran na żyłę wykonany z taśmy półprzewodzącej/.



Rys. 4 Obrazy mikroskopowe destrukcji powierzchni nakłucia otwartego w P.E przy 50 Hz, 10 kV po 700 godzinach
A, B, C - różne fazy rozwoju

Wpływ częstotliwości napięcia probierczego na mechanizm przebiecia długotrwałego nie jest dostatecznie jasny, mimo prawie równoległego przebiegu prostych dla 50 Hz i 500 Hz i mimo podobieństwa śladów wyładowań.

Pozostaje niewyjaśnionym fakt tylko dwukrotnego skrócenia czasu życia izolacji z elektrodami igłowymi przy 10-krotnym wzroście częstotliwości.

Prostą 500 N otrzymano dla modeli z izolacją o większej grubości /2,8 mm/, co tylko częściowo uzasadnia jej przebieg w stosunku do prostej 50 N /rys. 1/. Wyniki wyrywkowych prób na modelach z jedna-

kową grubością izolacji nie wyjaśniły tej anomalii.

Fakty te wskazują na silne wygaszanie wyładowań przy 500 Hz i są przedmiotem dalszych badań.

5. Wnioski

Z przeprowadzonych badań można wyciągnąć kilka wniosków ogólnych, o znaczeniu praktycznym:

1. Rozwój wyładowania niezupełnego w PE zaczyna się od ostrza gazowego lub metalowego w miejscu, w którym lokalne natężenie pola jest największe. Wyładowanie zmienia początkowy rozkład pola przy ostrzu w sposób decydujący dla dalszego rozwoju.
2. W modelu izolacji z otwartym nakłuciem ostrzowym mogą występować dwie formy mechanizmu starzenia elektrycznego PE: powolna degradacja powierzchniowa /100 - 1000 godz./ i prowadząca do drzewienia w bardzo szerokim zakresie czasów / μ s godz./ degradacja objętościowa. O wyborze danej formy degradacji i o prędkości rozwoju wyładowania decyduje głównie natężenie pola elektrycznego w PE.
3. Dla różnych modeli izolacji otrzymuje się różne wartości wykładnika potęgowego "n" w równaniu $TE_m^n = \text{const.}$, w którym E_m jest maksymalnym natężeniem pola elektrycznego w momencie początkowym badań długotrwałych.
4. Nakłucia ostrzowe otwarte stwarzają większe zagrożenie dla izolacji kablowej niż ostrza metalowe zamykające wylot kanalików gazowych w PE. Z tego względu kable z wytłaczanymi ekranami półprzewodnikowymi mogą mieć lepsze charakterystyki niż kable z ekranami taśmowymi.

Literatura

1. Kojkow S.N., Cikin A.N. - Elektrischeskoje starenije twierdych dielektrikow, Energia 1968.
2. Lawson J.H., Vahlstrom W. - P.A.S. 1972 p. 824.
3. Komor K. - Praca dyplomowa - Wydz. Elektryczny Pol. Gdańskiej, 1973.
4. Godlewska J. - Praca dyplomowa - Wydz. Elektryczny Pol. Gdańskiej, 1974.
5. Bahder G., Dakin T.W., Lawson L.W. - CIGRE 1974, ref. 15 - 05.