

Ryszard Dobroszewski

BADANIA MECHANIZMÓW INICJACJI I ROZWOJU DRZEWIENIA
ELEKTRYCZNEGO W POLIETYLENOWEJ IZOLACJI KABLI

1. Wstęp

Rozwój rozgałęzionych kanałów przedprzebieciowych w dielektrykach stałych w obecności silnego pola elektrycznego, czyli tzw. drzewienie elektryczne, znane jest od dawna. Obok tzw. drzewienia elektrochemicznego drzewienie elektryczne uważane jest za jedną z głównych przyczyn ograniczających czas życia polietylenowej izolacji kabli.

Chociaż udoskonalenie konstrukcji i technologii kabli w ostatnich latach doprowadziło do znacznego opanowania problemów drzewienia elektrycznego, to jednak samo zjawisko nie jest jeszcze całkowicie poznane. Nadal aktualne są więc badania nad wyjaśnieniem mechanizmów zapoczątkowania i rozwoju drzewienia elektrycznego, prowadzone w celu zwiększenia odporności polietylenu na drzewienie, np. przez stosowanie różnych domieszek.

Ocenę odporności tworzyw sztucznych na drzewienie przeprowadza się w sposób porównawczy metodą tzw. próby igłowej. Jednakże warunki przeprowadzania takich prób nie są ujednolicone - stosuje się ostrza o różnym kształcie, różne sposoby wprowadzania igły w dielektryk, różne grubości izolacji pod ostrzem itd. Stosuje się też odmienne sposoby przykładania napięcia oraz wykonuje się pomiary różnych wielkości

Dr inż. Ryszard Dobroszewski - Politechnika Poznańska Instytut
Elektroenergetyki

charakteryzujących podatność materiału na drzewienie.

Badania prowadzone w Politechnice Poznańskiej od kilku lat mają na celu lepsze poznanie mechanizmów zapoczątkowania i rozwoju drzewienia elektrycznego oraz wybór optymalnych warunków przeprowadzania prób igłowych, a także wybór kryteriów oceny odporności dielektryków na drzewienie.

2. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na próbkach kabli 15 kV o izolacji polietylenowej, stosując igły o różnych promieniach krzywizny ostrza i różną grubość izolacji pod igłą. Sposób przygotowania próbek oraz igieł opisano w poprzednich publikacjach [2,3,4].

Urząd badawczy został obecnie rozbudowany przez zastosowanie mikroskopu z monitorem telewizyjnym oraz kamery filmowej 16 mm. Mikroskop z monitorem okazuje się bardzo pomocny, szczególnie do kontroli kształtu ostrza, natomiast kamera umożliwia sfilmowanie procesu rozwoju kanałów drzewiastych i dokładniejsze zbadanie szybkości ich wzrostu.

Przedstawione wyniki badań dotyczą ostrza metalowego, bez celowo utworzonej szczeliny gazowej. Przeprowadzono pomiary napięcia zapoczątkowania /inicjacji/ drzewienia U_1 przy napięciu 50 Hz, podnoszonym stopniowo o 1 kV co minutę, pomiary czasu inicjacji drzewienia t_1 oraz szybkości wzrostu kanałów drzewiastych i czasu do przebicia izolacji.

3. Zapoczątkowanie drzewienia elektrycznego

Znanych jest szereg hipotez dotyczących mechanizmu zapoczątkowania drzewienia w izolacji termoplastycznej, jak np.:

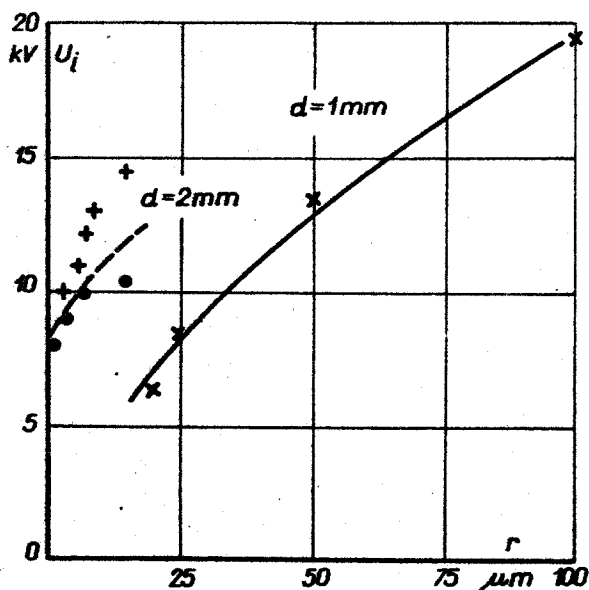
- częściowe przebicie elektryczne izolacji w bezpośrednim sąsiedztwie ostrza wskutek silnego pola lokalnego, przekraczającego wytrzymałość istotną [6,9] ;

- częściowe przebicie elektromechaniczne wskutek dużych lokalnych naprężeń ściskających, Maxwella w dielektryku elastycznym [8] ;

- zmęczeniowe mikropęknięcia dielektryku wskutek cyklicznie zmieniających się naprężeń Maxwella przy napięciu przemiennym [5,9] ;
- lokalne stopnienie się izolacji wskutek dużych strat dielektrycznych przy napięciu wysokiej częstotliwości [8,9] .

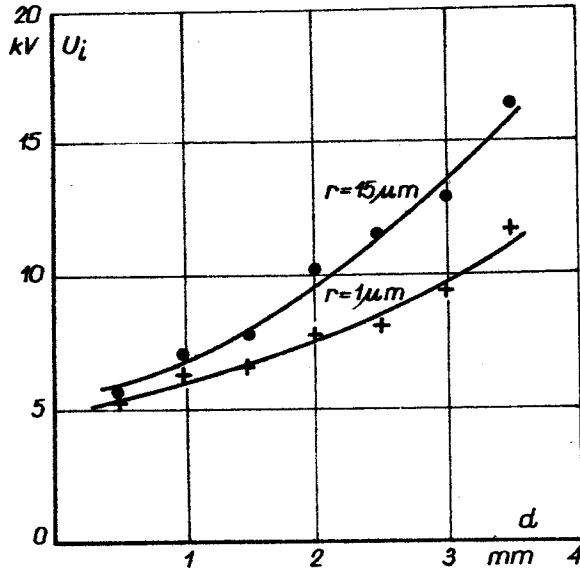
Chociaż żadna z wymienionych hipotez nie została dotąd w pełni potwierdzona na drodze eksperymentalnej, to jednak stwierdzono fakt, że na zapoczątkowanie drzewienia wpływają przede wszystkim takie czynniki, jak: promień krzywizny ostrza igły r , grubość izolacji pod ostrzem d , wartość i i częstotliwość przyłożonego napięcia przemiennego.

Wpływ promienia r i grubości izolacji d na napięcie inicjacji drzewienia U_i przedstawiono na rys.1 oraz 2. Widać, że ze wzrostem promienia ostrza napięcie inicjacji drzewienia wzrasta szybciej niż ze wzrostem grubości izolacji. Świadczy to o dużej roli maksymalnego natężenia pola elektrycznego przy ostrzu, co jednak nie oznacza jesz-



Rys.1. Zależność napięcia inicjującego drzewienie od promienia krzywizny ostrza dla dwóch różnych grubości izolacji pod ostrzem

cze, że lokalna geometria i konstrukcyjne decyduje o zapoczątkowaniu drzewienia. Należy to jeszcze wyraźniej z przebiegu zależności maksymalnego natężenia pola inicjującego drzewienie E_i od promienia krzywizny ostrza oraz grubości izolacji pod ostrzem, przedstawionych na rysunkach 2 i 4.



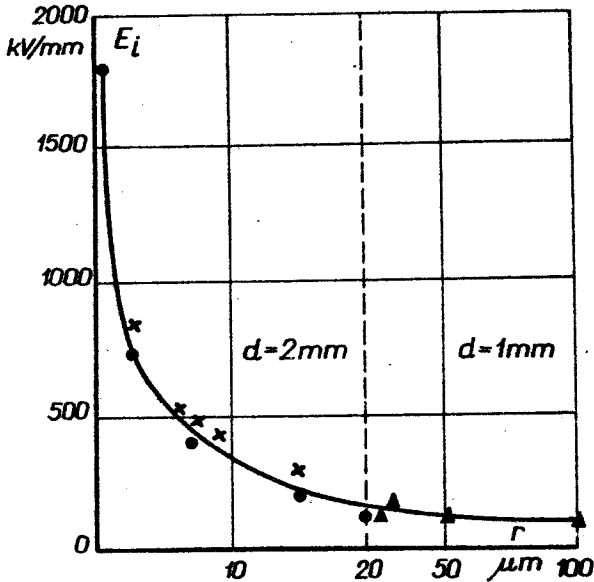
Rys. 2. Zależność napięcia inicjującego drzewienie od grubości izolacji pod ostrzem dla dwóch różnych promieni ostrza

Maksymalną wartość natężenia pola przy ostrzu obliczano według wzoru Masona [1,6], zakładając hiperboloidalny kształt ostrza

$$E_i = \frac{2 U_i}{r \ln(4d/r + 1)} \quad (1)$$

Okazuje się, że natężenie pola inicjującego drzewienie nie ma stałej wartości, lecz zmienia się i zależy przede wszystkim od promienia ostrza oraz - w mniejszym stopniu - od grubości izolacji pod ostrzem. Dla bardzo małych promieni r , rzędu kilku mikrometrów, wartości pola E_i zawierają się w granicach od kilkuset kV/mm do kilku MV/mm, tzn. są

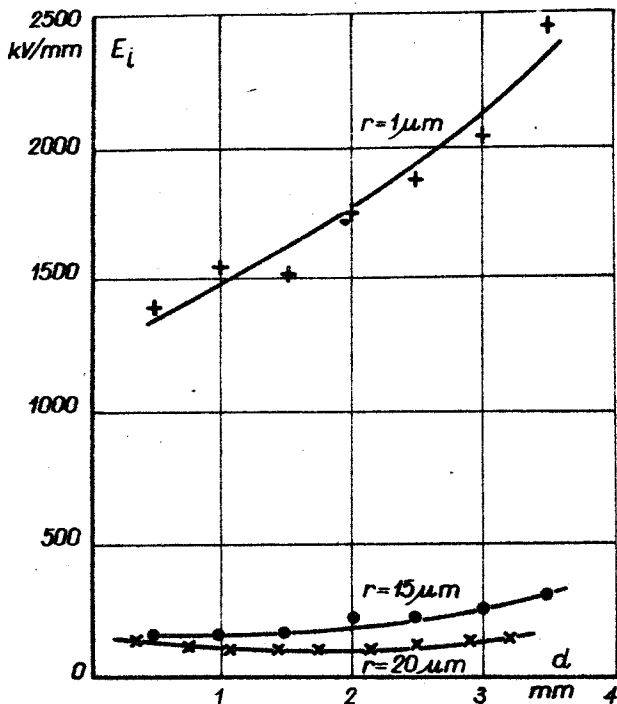
prawie o rząd niższe od wytrzymałości istotnej polietylenu w polu niejednorodnym [1]. Dla ostrzy o promieniu krzywizny rzędu dziesiątek mikrometrów wartości E_1 są jeszcze mniejsze /zbliżają się do 100 kV/mm/ i praktycznie niewiele zależą od promienia r i grubości izolacji d w zakresie 1 - 3 mm.



Rys.3. Zależność maksymalnego natężenia pola inicjującego drzewienie od promienia krzywizny ostrza

Wynika stąd praktyczny wniosek, że do prób igłowych korzystne jest stosowanie igieł o stosunkowo dużym promieniu krzywizny ostrza, np. około $20 \mu\text{m}$. Dla takich igieł odchyłki grubości izolacji d oraz promienia ostrza r nie powodują dużych błędów w ocenie wartości E_1 . Stosowanie igieł o jeszcze większych promieniach ostrza, np. $50 \mu\text{m}$ i więcej [10], powoduje znaczne podwyższenie napięcia inicjacji drzewienia.

Wyniki pomiarów czasu inicjacji drzewienia t_1 w zależności od maksymalnego natężenia pola elektrycznego E , przedstawione na rysunku 5,

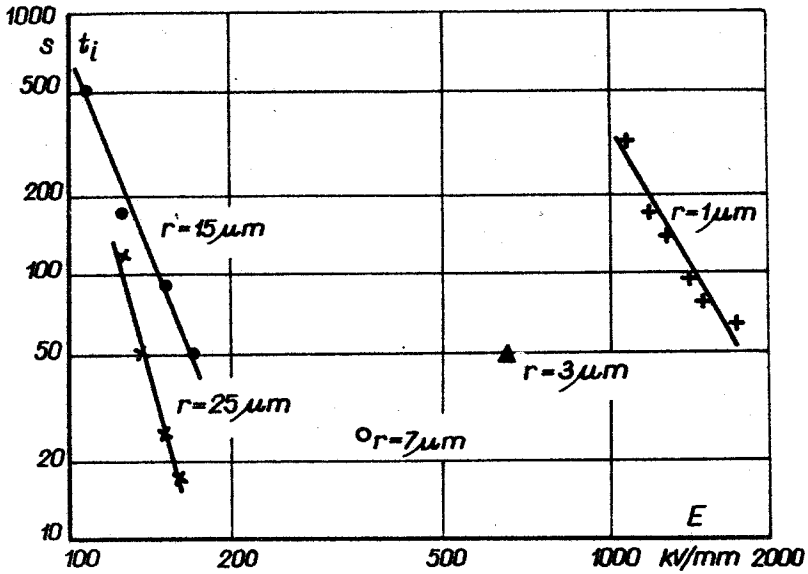


Rys.4. Zależność maksymalnego natężenia pola inicjującego drzewienie od grubości izolacji pod ostrzem dla trzech różnych promieni krzywizny ostrza

świadczą na korzyść zmęczeniowego mechanizmu elektromechanicznego zapoczątkowania drzewienia. Czas inicjacji szybko maleje ze wzrostem natężenia pola przy ostrzu. Zależność tę opisywano funkcją wykładniczą [5] lub funkcją potęgową, podobnie jak dla krzywej życia [10]. Przedstawione na rysunku 5 wyniki, jak się okazało, lepiej jest aproksymować funkcją potęgową typu

$$t_1 = AB^{-m} \quad (2)$$

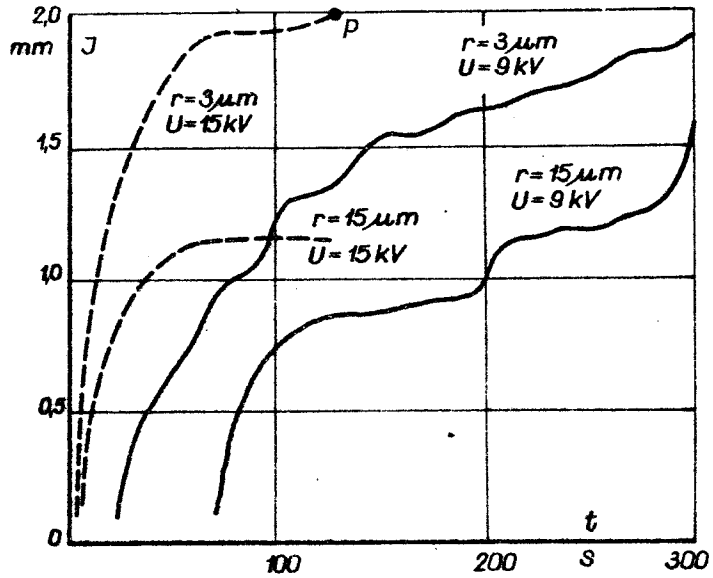
Wartości współczynnika A oraz wykładnika m zależą jednak nie tylko od rodzaju dielektryku, ale także od promienia krzywizny ostrza i innych warunków próby, np. od temperatury [5].



Rys. 5. Zależność czasu inicjacji drzewienia od maksymalnego natężenia pola elektrycznego dla różnych promieni krzywizny ostrza

4. Rozwój kanałów drzewiastych

Po zapoczątkowaniu drzewienia elektrycznego następuje dalszy jego rozwój, polegający na wydłużaniu się kanałów, powstawaniu wielu rozgałęzień i nowych kanałów. W przypadku ostrza metalowego wprowadzonego do dielektryku bez utworzenia szczeliny gazowej rozgałęzione kanały tworzą formę podobną do gęstego krzewu [2-5,9]. Szybkość wydłużania się kanałów w kierunku osi igły jest początkowo duża, a następnie ulega pewnym zahamowaniom, zależnie od promienia ostrza i wartości przyłożonego napięcia. Widać to wyraźnie na wykresach /rys.6/ sporządzonych na podstawie analizy zdjęć filmowych. Jak wynika z poprzednich badań [2-4], wzrostowi drzewienia towarzyszą wyładowania niezupełne, których intensywność ulega podobnym zmianom, jak wydłużanie się kanałów, co świadczy o związku wyładowań z rozwojem drzewienia.



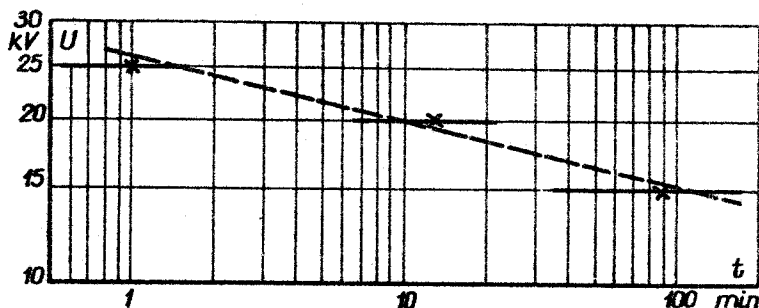
Rys.6. Wydłużenie się kanałów drzewiastych przy różnych wartościach przyłożonego napięcia dla różnych promieni krzywizny ostrza /P - przebicie izolacji/

Wiele danych [2-5,7] świadczy o tym, że wydłużenie się kanałów drzewiastych jest spowodowane niszczącym działaniem wyładowań niezupełnych. Działanie to może polegać albo na częściowym przebiciu [5] dielektryka wskutek wzmocnienia pola przy końcu zjonizowanego kanału i osłabienia wytrzymałości elektrycznej przez wnikające do dielektryka elektrony, albo na erozji ścianek kanału wskutek bombardowania jonami gazowymi. Niewątpliwie znaczny wpływ na rozwój kanałów drzewiastych mogą mieć ładunki przestrzenne w dielektryku, zmieniające rozkład pola elektrycznego.

Obserwowane częściowe wygaszanie wyładowań niezupełnych i hamowanie szybkości wydłużania się kanałów tłumaczy się wzrostem ciśnienia w kanałach wskutek rozkładu dielektryku [2,4,5,7]. Mogą wtedy powstawać

nowe kanały, tworzące kształt krzewu. Dyfuzja gazów umożliwia ponowny rozwój wyładowań niezupełnych i dalsze wydłużanie się kanałów drzewiastych, co w końcu prowadzi do całkowitego przebicia izolacji.

Czas do przebicia starannie wykonanych modeli do prób igłowych wykazuje stosunkowo duży rozrzut, ale zgadza się z rozkładem Weibulla [2,4,10]. Zależność czasu do przebicia t od przyłożonego napięcia U /rys.7/ dobrze opisuje funkcja potęgowa, podobnie jak dla typowej krzywej życia izolacji bez sztucznych defektów w postaci igły.



Rys.7. Zależność czasu do przebicia izolacji kabla przy próbach igłowych od wartości przyłożonego napięcia

Czas do przebicia w próbie igłowej może być jednym z kryteriów oceny odporności dielektryków na drzewienie elektryczne. Wybór optymalnego kryterium wymaga jednak dalszych badań.

5. Wnioski

1. Zmodyfikowany układ optyczny, zawierający mikroskop z monitorem telewizyjnym oraz kamerę filmową, daje lepsze możliwości badań mechanizmów zapoczątkowania i rozwoju drzewienia elektrycznego w polimerach przezroczystych.

2. Mechanizm zapoczątkowania drzewienia elektrycznego w polietylenowej izolacji kabli przy napięciu przemiennym 50 Hz wydaje się polegać na powstawaniu mikropeknięć wskutek zmęczenia elektromechanicznego dielektryku.

3. Mechanizm rozwoju kanałów drzewiastych jest związany ze zjawiskiem wyładowań niezupełnych oraz oddziaływaniem ładunku przestrzennego.

4. Próby igłowe dla oceny odporności izolacji kabli na drzewienie elektryczne wydaje się korzystniej przeprowadzać przy użyciu igieł o niezbyt małym promieniu krzywizny ostrza /np. ok. 20 μm przy grubości izolacji pod ostrzem 1-2 mm/.

5. Wybór optymalnych kryteriów oceny odporności dielektryków na drzewienie oraz warunków przeprowadzania próby igłowej, jak np. temperatura, sposób podnoszenia napięcia itp., wymaga dalszych badań.

LITERATURA

1. Birks J.B., Schulman J.H.: Progress in Dielectrics. London 1959, Heywood and Company Ltd.
2. Grzybowski S., Dobroszewski R.: Influence of Partial Discharges on the Development of Electrical Treeing on Polyethylene Insulated Cables. Conference Record of 1978 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, IEEE, Philadelphia 1978.
3. Grzybowski S., Dobroszewski R.: Mechanizmy rozwoju kanałów drzewiastych w kablach o izolacji polietylenowej. Przegląd Elektrotechn. nr.9 1977.
4. Grzybowski S., Dobroszewski R.: Wpływ wyładowań niezupełnych na rozwój kanałów drzewiastych elektrycznych w polietylenowej izolacji kabli. Konferencja Naukowo-Techniczna "Doświadczenia w zakresie budowy i eksploatacji kabli i linii kablowych średnich i wysokich napięć", SEP i Bydgoska Fabryka Kabli. Bydgoszcz 1978.
5. Jeda M., Nawata M.: A Consideration of Treeing in Polymers. 1972 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Nat.Acad.Sc., /1973/, Washington.
6. Mason J.H.: Discharge Channel Initiation and Propagation through Polymers. 1972 Annu.Rep.Conf.Elec.Insul.Dielectr.Phenom., Nat.Acad. Sci., /1973/ Washington.

7. McMahon E.J., Perkins J.R.: Techniques for Studying Volume Discharges and Treeing in Organic Insulating Compounds. 1972 Annu. Rep. Conf. Elec. Insul. Dielectr. Phenom., Nat. Acad. Sci., /1973/, Washington.
8. Noto F., Yoshimura N.: Initiation and Growth of Trees in Polymeric Dielectric Materials. 1973 Annu. Rep. Conf. Elec., Insul. Dielectr. Phenom., Nat. Acad. Sci., /1974/, Washington.
9. Noto F., Yoshimura N.: Voltage and Frequency Dependence of Tree Growth in Polyethylene. 1974 Annu. Rep. Conf. Elec. Insul. Dielectr. Phenom., Nat. Acad. Sci., /1975/, Washington.
10. Wasilenko E.: Przydatność próby igłowej do oceny polietylenu. Konf. Nauk.-Techn. "Doświadczenia w zakresie budowy i eksploatacji kabli i linii kablowych średnich i wysokich napięć. SEP i Bydgoska Fabryka Kabli, Bydgoszcz 1978.

Summary

INVESTIGATION OF THE INCEPTION AND DEVELOPMENT MECHANISMS OF ELECTRICAL TREEING IN POLYETHYLENE INSULATED CABLES

The modified optical system, with microscope and cinecamera, for studying of the electrical treeing in polyethylene insulated cables is described. On the base of test results presented, the effect of the maximum electric field intensity on the treeing inception is discussed. A further development of tree channels is connected to the action of partial discharges. Possibilities of the optimal conditions choice for needle tests and choice of a resistance to treeing criterion are pointed out.