

Marek Olesz\*

## **WPŁYW TEMPERATURY NA ROZWÓJ DRZEWIENIA ELEKTRYCZNEGO PRZY UDARACH ŁĄCZENIOWYCH NAŁOŻONYCH NA NAPIĘCIE PRZEMIENNE**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki badań drzewienia elektrycznego, w początkowej fazie rozwoju w izolacji z polietylenu usieciowanego. Badania przeprowadzono w układzie ostrze–płyta uziemiona, przy napięciu skojarzonym, w temperaturach 293 K i 323 K. Rozwój wyładowania drzewiastego śledzono metodą mikroskopową z rejestracją cyfrową powstających obrazów. Obserwacja rozwoju drzewienia przy napięciu skojarzonym może być źródłem informacji dotyczących aktywności ładunku pułapkowanego w polimerze w czasie udarów łączeniowych.

**Słowa kluczowe:** skojarzone napięcie probiercze, drzewienie elektryczne, przechwytywanie wyładowań niezupełnych, ładunek pułapkowany

### **1. Wstęp**

Znane są publikacje [1, 2] rozpatrujące proces degradacji polimeru w kategorii starzenia elektrycznego nałożonego temperaturą oraz ładunkiem przestrzennym. Urazy łączeniowe nałożone na napięcie przemiennie (napięcie skojarzone) są jednym ze sposobów wprowadzania ładunku określonego znaku do polimeru, którego skutki można obserwować mierząc długość rozwijającego się z elektrody ostrzowej drzewka elektrycznego. W pracy [3] udowodniono doświadczalnie w temperaturze 293 K przechwytywanie wyładowań niezupełnych w polietylenie sieciowanym. Zjawisko to polega na inicjowaniu wyładowań niezupełnych przez przyłożenie udaru łączeniowego, które następnie mogą być podtrzymywane napięciem przemiennym o amplitudzie mniejszej

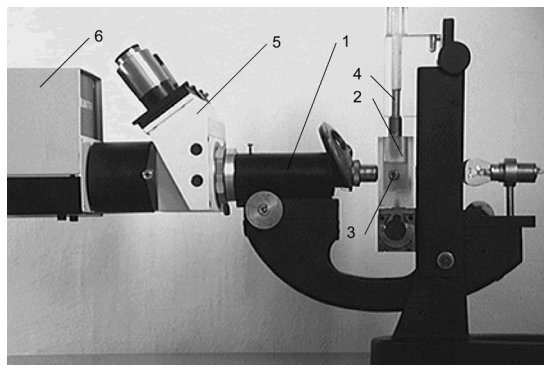
---

\* Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Wysokich Napięć, 80-952 Gdańsk, ul. Własna Strzecha 18A, email: molesz@sparc10.ely.pg.gda.pl

od napięcia progowego. Jeżeli przechwytywanie wyładowań niepełnych wiąże się z obecnością ładunku przestrzennego to podwyższona temperatura izolacji powinna skutecznie ograniczyć jego wielkość, a tym samym zmniejszyć wzrost drzewka w czasie. Temperatura intensyfikuje także procesy reakcji fizykochemicznych w polimerze prowadzące do starzenia, co może powodować przyspieszenie propagacji drzewka [4]. W celu określenia wpływu temperatury i napięcia skojarzonego na proces rozwoju drzewka elektrycznego w polietylenie sieciowanym wykonano rejestracje obrazu mikroskopowego rozwoju drzewienia elektrycznego w układzie ostrze – płyta uziemiona.

## 2. Metodyka badań

W celu określenia dynamiki rozwoju drzewka przy napięciu skojarzonym i temperaturach 293 K i 323 K wykonano w układzie ostrze–płyta obserwacje mikroskopowe pojedynczych próbek polietylenu sieciowanego XLPE wycinanych z kabla YHKXS 20 kV. Próbki polietyleny umieszczano w komorze probierczej (2) wykonanej z przezroczystego polimetakrylanu metylu znajdującej się w polu mikroskopu (1) z poziomą osią optyczną, wyposażonego w dodatkowy zestaw rejestrujący w czasie rzeczywistym rozwój drzewienia (rys. 1). W komorze probierczej znajduje się uziemiona, miedziana elektroda płaska (3) na której ustawiano w określonym położeniu prostopadłościenny blok polietyleny o grubości 3 mm, z pozostawionym ekranem półprzewodzącym eliminującym wyładowania niepełne na styku polietylen–elektroda (3). Elektrode igłową o promieniu ostrza  $5\ \mu\text{m}$  przygotowaną w sposób opisany w pracy [3], wciskano w próbkę za pomocą nakłuwacza (4) przesuwającego się prostopadle do elektrody płaskiej (3).

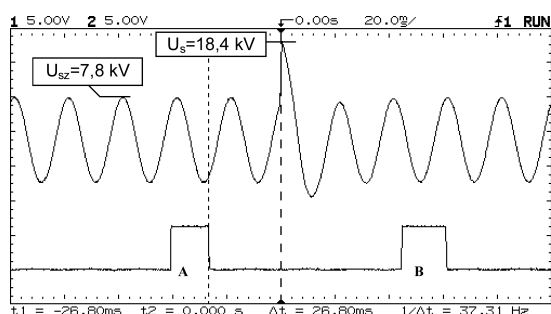


**Rys. 1.** Zestaw optyczny do komputerowej rejestracji drzewienia w próbce izolacji umieszczonej w komorze probierczej

Dokładne wprowadzenie igły na odległość znamionową tj. 3 mm od warstwy półprzewodzącej z wykluczeniem inkluzji gazowych, było możliwe dzięki ciągłej obserwacji optycznej igły na ekranie monitora. W celu zmniejszenia wyładowań powierzchniowych przy napięciu probierczym igłę wraz z próbką umieszczano w oleju silikonowym.

W przypadku pomiarów rozwoju drzewienia w podwyższonej temperaturze utrzymywano stałą temperaturę oleju silikonowego na poziomie 323 K.

Obraz mikroskopowy fotografowano cyfrowo za pomocą nasadki tryniokularowej (5) i kamery wideo (6) sprzężonej z komputerem w momentach czasowych „A” (40 ms przed udarem) i „B” (44 ms po udarze łączeniowym) pokazanych na rys. 2. Rejestracja obrazu degradacji pięciu próbek polietylenu w ściśle określonych momentach czasowych pozwoliła na stwierdzenie wpływu rodzaju składowej napięcia (udarowej lub przemiennego) na dynamikę rozwoju drzewienia w izolacji. Sposób synchronizacji zdjęć z przebiegiem napięcia roboczego przedstawiono w pracy [3]. Analizę zdjęć polegającą na pomiarze podstawowych wymiarów geometrycznych drzewka takich jak: długość, pole powierzchni, kąty rozwidlenia kanału drzewiastego wykonywano w programie IMAGE TOOL do obróbki zdjęć mikroskopowych.



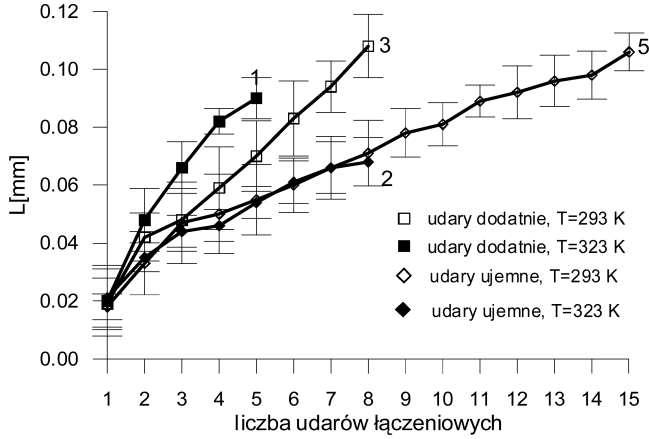
**Rys. 2.** Oscylogram napięcia probierczego i impulsów sterujących wykonywaniem zdjęć polatkowych

Do próbki polietylenu w komorze probierczej, za pośrednictwem elektrody igłowej doprowadzano napięcie skojarzone dodatnie o kształcie pokazanym na rys. 2 o stałej wartości szczytowej  $U_s = 18,4 \text{ kV}$  i różnych amplitudach składowej przemiennego  $U_{sz}$ , tj. 7,8 kV, 11,7 kV. Oba poziomy napięcia przemiennego przekraczają napięcie progowe badanej izolacji określone na poziomie 7,1 kV. Badania przeprowadzono także przy napięciu skojarzonym ujemnym, kiedy udary ujemne nakładano na ujemną półfalę sinusoidy. W obu przypadkach wytwarzano impulsy łączeniowe  $600 \mu\text{s}/3500 \mu\text{s}$  w 2 s odstępach czasowych, nakładanych synchronicznie na napięcie przemiennie po 3 ms od chwili przejścia sinusoidy przez zero. Na podstawie rejestracji komputerowych obrazu drzewienia elektrycznego obliczano średnią długość drzewka  $L$  i odchylenie standardowe począwszy od momentu inicjacji oraz sumaryczną liczbę zaobserwowanych wyraźnych wzrostów drzewka w czasie trwania udaru łączeniowego.

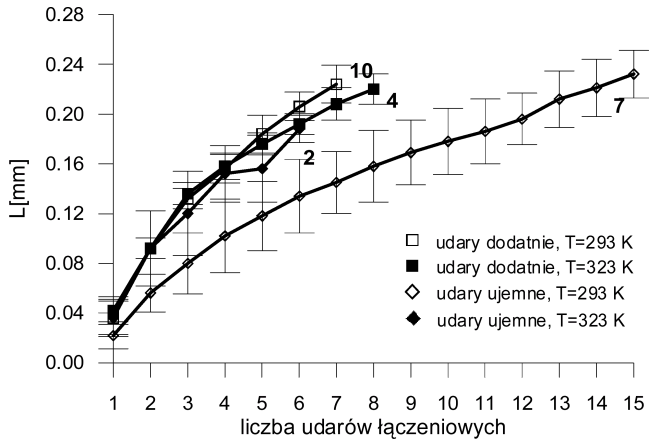
### 3. Wyniki badań

Na rysunkach 3 i 4 podano przy wykresach długości drzewka liczbę udarów przy których występował zauważalny przyrost długości drzewka w 84 ms otoczeniu czasowym udaru napięciowego. Jest ich niewiele, a podwyższona temperatura radykalnie

zmniejsza ich liczbę, szczególnie przy znacznej amplitudzie napięcia przemiennego tj. 11,7 kV. Fakt ten potwierdza związek wielkości ładunku przestrzennego w polimerze ze wzrostem drzewka. W każdej z obserwowanych próbek zasadniczy wzrost drzewka (do 30–50  $\mu\text{m}$ ) występował w czasie działania napięcia przemiennego. Dynamiczny proces przyrostu długości drzewka w czasie składowej przemiennej wynika prawdopodobnie z utworzenia przez uderzenie łączeniowy niewidoczny pod mikroskopem cienkiego kanału drzewka, który ulega pogrubieniu przez napięcie przemiennie współdziałające z wprowadzonym w czasie uderzenia ładunkiem przestrzennym.



**Rys. 3.** Długość drzewka w funkcji liczby udarów łączeniowych nakładanych na napięcie przemiennie o amplitudzie 7,8 kV, liczonych od momentu inicjacji



**Rys. 4.** Długość drzewka w funkcji liczby udarów łączeniowych nakładanych na napięcie przemiennie o amplitudzie 11,7 kV, liczonych od momentu inicjacji

Na rys. 3 pokazano zależność długości drzewka  $L$  w funkcji przyłożonej liczby udarów łączeniowych na tle napięcia przemiennego o amplitudzie 7,8 kV nieznacznie większej od napięcia progowego izolacji  $U_{ou} = 7,1$  kV określonego na podstawie badań opisanych w pracy [3]. Ze względu na niewielki poziom składowej przemiennnej wstrzykiwanie i formowanie ładunku przestrzennego ma miejsce przy udarach łączeniowych. Powstały ładunek oddziałuje z napięciem przemiennym przyczyniając się do starzenia polimeru. Obowiązuje przy tym zasada: biegunowość dodatnia i podwyższona temperatura intensyfikują proces rozwoju drzewka na każdym jego etapie — również inkubacji i zaawansowanego drzewienia [3].

Analizując długość drzewka w funkcji liczby przyłożonych udarów nałożonych na napięcie przemiennie w odstępach 2 s, stwierdzono, że przy napięciu nieznacznie wyższym od progowego dla temperatur 293 K i 312 K otrzymujemy podobną dynamikę przy ujemnej biegunowości udaru. Fakt ten można wytłumaczyć likwidacją powstałego, niewielkiego ładunku ujemnego przez wzrost temperatury polimeru. Na podstawie badań innych autorów rozkładu ładunku w polietylenie sieciowanym [5] wiadomo, że przyrost temperatury o 30 K z 293 K do 323 K powoduje zmniejszenie ładunku w obszarze przyelektrodowym o około 30%. Podwyższona temperatura izolacji kablowej w czasie obciążenia prądowego żyły roboczej skutecznie zmniejsza ładunek pułapkowy w polimerze i ogranicza poziom wyładowań wstecznych z obszarów znacznego ładunku do miejsc będących źródłem iniekcji ładunku, którymi mogą być wtrąciny i nierówności powierzchni ekranów półprzewodzących.

Z kolei przy dość wysokim napięciu przemiennym 11,7 kV (rys. 4), kiedy zachodzi silne wstrzykiwanie ładunku również przy napięciu przemiennym, podwyższona temperatura nie jest w stanie całkowicie zlikwidować ładunku przestrzennego, co powoduje większy wzrost aktywności starzenia w podwyższonej temperaturze dla udarów ujemnych, a mniejszy przy biegunowości dodatniej.

Proces degradacji materiałów polimerowych może być zdefiniowany poprzez energię aktywacji  $W$ , konieczną do wystąpienia reakcji chemicznej pomiędzy cząsteczkami kompleksu aktywnego. Temperatura  $T$  i ładunek elektryczny  $q$  przyspieszają degradację izolacji w obecności pola elektrycznego zmniejszając poziom energii aktywacji odpowiednio o  $\Delta W_T$  i  $\Delta W_Q$ . Załóżmy, że przy temperaturze  $T$  i napięciu skojarzonym określonym składowymi: przemienną  $U_{sz}$  i udarową  $U_s$  następuje wprowadzenie ładunku przestrzennego  $q$  obniżającego energię aktywacji procesu starzenia polimeru o wielkość  $W_Q$ . Podwyższenie temperatury do wartości, przy której występuje ta sama dynamika wzrostu drzewka sugeruje zlikwidowanie ładunku przestrzennego  $q$  i obniżenie bariery potencjalnej o  $\Delta W_Q$ . W związku z tym można określić za pomocą energii cieplnej molekuly  $\Delta W_T$ , wkład ładunku w degradację polimeru  $\Delta W_Q$ .

Na podstawie zbliżonych przebiegów długości drzewka w czasie dla różnego rodzaju napięć skojarzonych obliczono energię cieplną  $\Delta W_T$  molekul dwuatomowych [4] ze wzoru (1):

$$\Delta W_T = 2kT \quad (1)$$

gdzie:  $k$  — stała Boltzmana w eV/K ( $k = 8,617 \cdot 10^{-5}$  eV/K),  $T$  — temperatura bezwzględna w [K]

Dla temperatury 323 K wielkość  $2kT$  osiąga wartość 0,048 eV o którą zmniejszy się energia aktywacji  $W$  dla udarów dodatnich przy składowej przemiennnej 11,7 kV

i dla uderów ujemnych przy 7,8 kV. Uzyskanie przy uderach ujemnych i mniejszej amplitudzie składowej przemiennnej tej samej wartości  $\Delta W_Q$  co przy uderach dodatnich i wyższej amplitudzie  $U_{sz}$  potwierdza tezę o łatwiejszym tworzeniu się ujemnego ładunku przestrzennego i jego wiodącej roli w starzeniu izolacji.

#### 4. Podsumowanie

1. W temperaturach 293 K i 323 K zasadniczy wzrost drzewka występuje w trakcie napięcia przemiennego. Tylko w nielicznych przypadkach obserwowano wyraźny wzrost w czasie działania składowej udarowej. Podwyższona temperatura silnie ogranicza aktywność drzewienia powodowaną przyłożeniem udaru łączeniowego, co nie wyklucza wstrzykiwania ładunku, tworzenia się ładunku przestrzennego i jego oddziaływania z napięciem przemiennym.
2. Uderzy dodatnie, podwyższona temperatura i poziom składowej przemiennnej intensyfikują wzrost drzewka w początkowej fazie jego rozwoju.
3. Podwyższenie temperatury izolacji zmniejsza ilość ładunku elektrycznego w obszarze przyelektrodowym, co ogranicza dynamikę wzrostu drzewka elektrycznego.
4. Uzyskane wyniki pozwoliły oszacować zmniejszenie energii aktywacji procesu starzenia izolacji wskutek oddziaływania ładunku przestrzennego o  $\Delta W_Q$ , która zależy od poziomu składowej przemiennnej i biegunowości przykładowych uderów.

#### Literatura

- [1] **Dissado L. A.** i inni: *The role of trapped space charges in the electrical aging of insulating materials*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 5, October 1997
- [2] **Ishibashi A.** i inni: *A study of treeing phenomena in the development of insulation for 500 kV XLPE cables*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 5, October 1998
- [3] **Olesz M.**: *Wpływ uderów łączeniowych na wytrzymałość długotrwałą izolacji polimerowej*, Rozprawa doktorska, Gdańsk 1998
- [4] **Wasilenko E.**: *Model degradacji izolacji polimerowej w układach wysokiego napięcia*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka nr 68, 1991
- [5] **Wang X.** i inni: *Space charge in XLPE Power Cable under dc electrical stress and heat treatment*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 3, June 1995

#### INFLUENCE OF TEMPERATURE AND SWITCHING IMPULSES SUPERIMPOSED ON AC VOLTAGE ON PROPAGATION OF ELECTRICAL TREE

The paper discussed the growth of electrical trees in their first stage in crosslinked polyethylene insulation (XLPE) at temperature 293 K and 323 K. The experiments were conducted on XLPE specimens in point to plane arrangements, subjected to impulse voltage superimposed on AC voltage. Electrical treeing degradation was investigated by optical microscope with digital image processing technique. Propagation of electrical trees gives some information about activity of homospace charge formed near the electrode tip under switching voltage.