



## Oddziaływanie napięcia na poziom ładunku w obszarze wady polietylenu sieciowanego

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki pomiarów swobodnego ładunku elektrycznego wprowadzanego w obszar drzewka elektrycznego w polietylenie sieciowanym za pomocą oddziaływania różnych rodzajów napięcia – stałego, przemiennego oraz udarów łączeniowych dodatnich lub ujemnych nakładanych na napięcie przemiennie. Na podstawie pomiaru prądów depolaryzacyjnych stwierdzono przy obu biegunowościach udarów łączeniowych występowanie w obszarze wady ładunków ujemnych.

**Abstract.** (The voltage influence on level of charges in the defect at the polyethylene insulation). The paper presented some results of free charges injected into electrical tree structure at XLPE polyethylene by using DC and AC voltages or positive/negative switching pulses superimposed on AC voltage. The depolarization current measurements in needle-polyethylene-plate arrangement showed negative charges at the defect region for both switching pulse polarity.

**Słowa kluczowe:** izolacja polietylenowa, drzewienie elektryczne, prądy depolaryzacji.

**Key words:** polyethylene insulation, electrical treeing, depolarization currents.

### Wstęp

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów swobodnego ładunku elektrycznego wprowadzanego w obszar drzewka elektrycznego w polietylenie sieciowanym za pomocą oddziaływania różnych rodzajów napięcia – stałego, przemiennego, oraz udarów łączeniowych dodatnich lub ujemnych nakładanych na napięcie przemiennie. Poziom ładunku obliczano na podstawie pomiarów prądu depolaryzacyjnego mierzonego bezpośrednio po zakończeniu procesu ładowania próbki polietylenu. Wykorzystując znaną z diagnostyki kabli elektrycznych metodę analizy prądów izotermicznego rozładowania IRC [6] dodatkowo określono czasy relaksacji oraz energię aktywacji dla powierzchni granicznych, wady w postaci kanału drzewka elektrycznego i polietylenu sieciowanego. Na podstawie wyników badań stwierdzono lepszą efektywność wprowadzania ładunku w obszar drzewka za pomocą udarów nakładanych na napięcie przemiennie niż przy napięciu przemiennym. Przy obu biegunowościach udarów łączeniowych obserwowano w obszarze wady ładunki ujemne. W związku z powyższym, w przypadku udarów dodatnich iniekcja elektronów do polimeru jest inicjowana oscylacyjnym stanem przejściowym po udarze (półfala o biegunowości ujemnej). Znaczny rozrzut wyników pomiarów dowodzi istnienia głębszych pułapek, nie aktywowanych temperaturą otoczenia, które ograniczają proces ładowania próbek w kolejnych pomiarach.

Ładunki przestrzenne lub powierzchniowe w dielektrykach gromadzą się zazwyczaj w miejscach niejednorodnego pola elektrycznego w wyniku wysokoenergetycznego promieniowania lub wyładowań niezupełnych (wnz). Pułapkowany ładunek przestrzenny, w układach izolacji wysokiego napięcia może znacząco zmienić natężenie pola elektrycznego, a nawet zapoczątkować przedwczesne uszkodzenie przy naprężeniach poniżej zaprojektowanej wartości [8].

Na podstawie pracy [6] wiadomo, że istnieją trudności w określeniu parametrów stanów pułapkowych w dielektryku na podstawie prądów izotermicznej depolaryzacji przy wykreślaniu zależności prądu od czasu procesu depolaryzacyjnego. Zaproponowana przez Simonsa i Tama metoda operowania charakterystykami iloczynu prądu  $I$  i czasu  $t$  umożliwia określenie gęstości stanów pułapkowych o energii aktywacji  $E$ . Funkcja  $I \cdot t(t)$  jest zapisem rozkładu energii stanów pułapkowych odpowiednio w górnej

części pasma zabronionego (elektrony) i dolnej (dziury). Funkcja rozkładu energii dotyczy także dyskretnych poziomów pułapkowych o energiach wyższych od 2kT. Problem wykorzystania metody [6] w praktyce polega na niemożności wydzielenia prądów generowanych przez elektrony i dziury.

Poziom pułapkowanego ładunku zależy od rodzaju styku (metal-dielektryk, dielektryk-dielektryk), przyłożonego napięcia, temperatury, oraz morfologii polimeru [1, 2]. Drzewko wytwarzane w podobnych warunkach elektrycznych i termicznych może charakteryzować się różnym składem chemicznym, a w następstwie przewodnością wpływającą na poziom wyładowań niezupełnych i wielkość pułapkowanego ładunku [9]. Drzewko w kształcie licznych kanałów o średnicy do 860  $\mu\text{m}$  jest otoczone powłoką zawierającą grafit. Na końcach drzewka związki czystego węgla nie są wykrywane, a w części środkowej obserwuje się frakcję polietylenową oraz węglową. Wynika stąd, iż tylko kanały naprężone wystarczająco długo polem elektrycznym, w którym powstają wnz umożliwiają uzyskanie trwałej powłoki grafitowej [9]. W podobnych optycznie drzewkach można obserwować również brak powłok grafitowych przy obecności uszkodzonych wiązań struktury polietylenowej.

W trakcie ładowania próbki płaskiej napięciem stałym powstaje heteroładunek o największych wartościach w warstwie przyelektrodowej. Natomiast w obszarze nieznacznie oddalonym od elektrod pojawiają się ładunki indukowane wytwarzające pole o kierunku przeciwnym do pola wywołującego polaryzację.

W przypadku oddziaływania napięcia probierczego przemiennego lub udarowego może się pojawić nieskompensowany ładunek przestrzenny wskutek np. wnz we wtrącinach gazowych. Sytuacja taka może mieć miejsce w czasie inkubacji, a potem w okresie rozwoju drzewienia w izolacji kablowej. Po powstaniu pierwszych gałęzi drzewka istnieje możliwość pułapkowania ładunku przez powierzchnię kanału [5]. Przykładowo przy zmianie średnicy kanału z 25  $\mu\text{m}$  do 400  $\mu\text{m}$  napięcie przebicia maleje z 13,7 kV do 10 kV. Kanał prosty długości 3 mm i średnicy 25  $\mu\text{m}$  pułapkuje ładunek 0,6 pC wytrzymując 10,3 kV, a z dodatkowym odgałęzieniem pod kątem 45° gromadzi już ładunek 1 pC przy napięciu przeskoiku 12 kV. Wyniki te wskazują na możliwość pułapkowania w temperaturze 293 K przez rozwinięte drzewko dzięki pofałdowaniu

powierzchni kanału dużej wartości ładunku, który skutecznie podnosi wytrzymałość napięciową drzewka.

W pracy [5] badano także wpływ wielkości napięcia na rozkład ładunku w sztucznym kanale. Okazuje się, że przy niewielkich napięciach ładunek kumuluje się przy elektrodzie ostrzowej, a dopiero przy pokonaniu określonego progu napięciowego jest przenoszony na koniec sztucznego kanału. Takie zachowanie tłumaczy obserwowane wyniki poziomu wnz w trakcie rozwijającego się drzewienia elektrycznego, kiedy na pewnym etapie rozwoju drzewka obserwuje się wygaszanie wnz.

### Iniekcja ładunku do polietylenu z elektrody

Zasadniczym problemem w opisie procesu starzenia z uwzględnieniem ładunku jest określenie głównego źródła pochodzenia ładunku. Wprowadzenie ładunku z elektrody do polimeru może odbywać się różnymi sposobami. Z technik wytwarzania elektretów znane są sposoby implantowania ładunku poprzez np. ładowanie wiązką niskoenergetycznych elektronów, metodę przebiciową, wyładowanie koronowe i inne. W przypadku izolacji rzeczywistej np. kablowej lub w maszynie elektrycznej można wyróżnić dwa zasadnicze mechanizmy przejścia nośników prądu z elektrody do polimeru:

- poprzez barierę potencjału opisywany wzorem Schottky'ego lub Fowlera-Nordheima,
- przez wytworzenie ładunku wskutek jonizacji cząsteczek obojętnych gazów we wtrącinach powietrznych izolacji lub poprzez wnz w miejscach niejednorodności prowadzące do pojawienia się nadmiarowego ładunku dodatniego lub ujemnego.

Miejsca takich niejednorodności są zazwyczaj zlokalizowane na granicy elektrod i polimeru wskutek innego rozkładu temperatur w fazie krystalizacji na etapie produkcji sprzyjającemu powstawaniu defektów w objętości izolacji.

Dla nieznacznie wyższej pracy wyjścia tj.  $\phi = 1$  eV w [2] podaje się zerowy poziom prądu iniekcji dla natężeń pola do 20 kV/mm. Uwzględniając równania: ciągłości prądu, transportu ładunku i Poissona otrzymuje się w symulacjach komputerowych gęstości ładunków rzędu 300 C/m<sup>3</sup> dla „tępej” igły oraz 3000 C/m<sup>3</sup> dla ostrza o promieniu zaokrąglenia 5  $\mu$ m, przy odstępnie do elektrody płaskiej  $d=2$  mm, pracy wyjścia 1eV i napięciu stałym 10kV. Stabilny ładunek o podanych powyżej wartościach powstaje już po 6  $\mu$ s i zanika w czasie 200 ms [2].

Powyższe zależności wskazują na możliwość silniejszego wprowadzania i pułapkowania ładunków w izolacji w czasie działania przebiegów udarowych, przy założeniu braku ograniczania pola elektrycznego w sąsiedztwie elektrody ostrzowej przez wprowadzony ładunek przestrzenny.

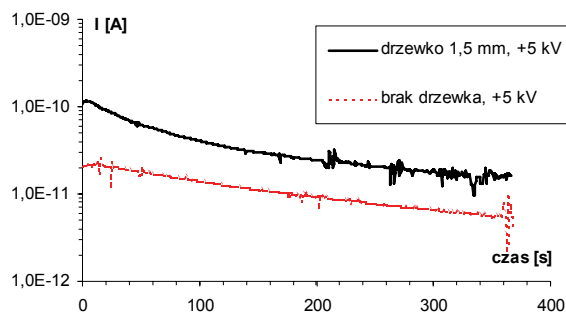
Jedną z metod określenia wartości tego ładunku może być analiza izotermicznego prądu rozładowania izolacji IRC po naładowaniu napięciem stałym, prowadząca do określenia stałych czasowych  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  i amplitud  $a_1$ ,  $a_2$ , i  $a_3$  trzech przebiegów wykładniczych prądu opisujących 3 charakterystyczne części izolacji - objętość (wskaźnik 1), powierzchnię na granicy elektrod (wskaźnik 2) i uszkodzenia np. drzewienie elektryczne i/lub wodne, wady mechaniczne (wskaźnik 3).

Praca ma na celu sprawdzenie czy inne rodzaje napięcia bardziej związane z praktyką eksploatacyjną – a więc przemienne lub przemienne z wprowadzoną składową udarową umożliwiają uzyskanie trwałego naładowania próbki dającego jednoznaczny przebieg prądów depolaryzacyjnych prowadzących do określenia poziomów pułapkowych.

Innym celem jest określenie na podstawie próbek modelowych, czy zastosowana do analizy wykonanych badań metoda izotermicznego rozładowania izolacji, pozwalająca oszacować ładunki w obszarze defektu izolacji jest wystarczająca do określenia np. stanu izolacji kabla w przypadku rozwiniętego drzewienia elektrycznego. W pracy [10] pokazano jednoznaczność zmian stałych czasowych  $\tau_1$ - $\tau_3$  w przypadku starzenia cieplnego kabla polietylenowego w zakresie temperatur 323 K ÷ 403 K. Wydłużenie czasu starzenia cieplnego daje początkowo wzrost stałej czasowej  $\tau_2$  a następnie spadek. Stała czasowa  $\tau_3$  nie zależy od czasu starzenia, wpływ ten jest dopiero widoczny przy wyższych temperaturach. O ile starzenie cieplne daje określony wpływ na poziomy prądów depolaryzacyjnych i ich stałe czasowe to w przypadku dodatkowego działania pola elektrycznego o wartości 13,1 kV/mm czas starzenia nie daje już przewidywanych wyników. W przypadku oddziaływania tylko pola elektrycznego wzrost jego wartości z 36,4 kV/mm do 45,5 kV/mm przy tym samym czasie starzenia 100 h daje wzrost stałych czasowych  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  i zmniejszenie  $\tau_3$ . Wyniki te są sprzeczne z propozycją wykorzystania metody IRC w diagnostyce izolacji kablowej [7], gdzie przy starzeniu materiału druga i trzecia stała czasowa wzrasta. Rozbieżności te wskazują na pewną przypadkowość uzyskiwanych wyników w zależności od metodyki badań i sposobu aproksymacji przebiegu prądu depolaryzacyjnego.

### Wyniki badań

Pewne informacje dotyczące wielkości pułapkowanego ładunku można uzyskać z pokazanych na rysunkach od 1 do 3 charakterystyk  $I(t)$  prądów depolaryzacyjnych w próbkach polietylenu w układzie ostrze- płyta uziemiona w odległości 3 mm z drzewkiem elektrycznym o długości 1,5 mm. Charakterystyki te zmierzone po ładowaniu próbki napięciem stałym 1 kV lub 5 kV przez czas 10 minut przedstawiają w układzie współrzędnych logarytm  $I$  – czas  $t$  postać prostych równoległych (rys. 1). Dla krótkich czasów relaksacji obserwuje się w przypadku występowania drzewka wzrost prądu, związany najprawdopodobniej z uwalnianiem ładunków z płytkich pułapek w obszarze drzewko-polimer. Wzrost ten nie występuje przy badaniu igły bez drzewka, co świadczy o relatywnie mniejszych wartościach ładunków pułapkowanych w obszarze ostrze-polimer w czasie inkubacji drzewka [3].



Rys. 1. Prądy depolaryzacji zmierzone po 10 minutach ładowania układu ostrze-płyta w polietylenie XLPE

Na podstawie otrzymanych charakterystyk prądu depolaryzacyjnego na rysunku 1 wyliczono empiryczne współczynniki starzenia określające stan izolacji polietylenowej tj. układu elektroda-drzewko-polimer. Metoda ta wymaga aproksymowania empirycznego przebiegu prądu depolaryzacji wzorem (1) przez wyznaczenie stałych  $a_i$  oraz stałych czasowych relaksacji ładunków  $\tau_i$  sumy

funkcji wykładniczych. Sposób ten daje poprawne wyniki wykrywania drzewienia wodnego i elektrycznego w kablach XLPE [7].

$$(1) \quad I(t) = I_0 + \sum_{i=1}^3 a_i \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$

Po usunięciu pola elektrycznego, w polimerze dokonują się rozłożone w czasie procesy odwrotne do polaryzacji związane z uwalnianiem i wyrównywaniem nośników ładunku, które wywołują prąd relaksacji izotermicznej (IRC). Teoria Simonsa i Tamma [6] umożliwia określenie podstawowych energii aktywacji ze stanów pułapkowych na podstawie opisu prądu izotermicznej depolaryzacji wzorem (1). Zastosowanie do analizy dodatkowej funkcji równej iloczynowi prądu  $i(t)$  oraz czasu  $t$  pozwala na wyznaczenie dynamiki relaksacji nośników ładunku ze stanów o określonej energii aktywacji [6, 7].

W pracach [6,7] zaadaptowano teorię IRC do diagnostyki kabli XLPE, uzyskując dobre narzędzie dla śledzenia procesu degradacji izolacji polietylenowej. Do oceny izolacji stosuje się tzw. współczynnik zesterzenia  $A$  (przy założeniu, że  $\tau_3 > 3 \tau_2$ ,  $\tau_2 > 3 \tau_1$ ) określony stosunkiem ładunku w defektach izolacji do ładunku zgromadzonego w pułapkach na granicy faz (4).

$$(2) \quad Q(\tau_2) = a_1 \tau_1 \left(1 - e^{-\frac{\tau_2}{\tau_1}}\right) + a_2 \tau_2 \left(1 - \frac{1}{e}\right) + a_3 \tau_3 \left(1 - e^{-\frac{\tau_2}{\tau_3}}\right)$$

$$(3) \quad Q(\tau_3) = a_1 \tau_1 \left(1 - e^{-\frac{\tau_3}{\tau_1}}\right) + a_2 \tau_2 \left(1 - e^{-\frac{\tau_3}{\tau_2}}\right) + a_3 \tau_3 \left(1 - \frac{1}{e}\right)$$

$$(4) \quad A = \frac{Q(\tau_3)}{Q(\tau_2)}$$

W obu przypadkach są rozważane płytkie stany pułapkowe, jeśli pomiary wykonywano w temperaturach pokojowych np. 293 K. Nośniki ładunku o stałych czasowych  $\tau_i$  (kilka – kilkaset sekund) są uwalniane z pułapek o energii aktywacji zawartej w granicach od 0,66 do 0,8 eV. Wartości typowych stałych czasowych oraz odpowiadające im głębokości pułapek zawarte w pracach [6, 7] zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Czasy relaksacji i poziomy pułapkowania w XLPE

Źródło nośników	Czas relaksacji $\tau$ [s]	Poziom pułapkowania $W$ [eV]
1-Objętość izolacji	3 do 6	0,66 do 0,68
2-Powierzchnie graniczne	12 do 80	0,70 do 0,76
3-Uszkodzenia	150 do 250	0,77 do 0,80

Na podstawie wzorów (1)-(4) w tabeli 2 przedstawiono obliczone wielkości charakterystyczne stałych czasowych, składowych prądów relaksacyjnych i współczynnika  $A$  dla przebiegu prądu depolaryzacji z rysunku 1.

Dodatkowo wyliczono na podstawie zależności (2) i (3) poziomy ładunku pułapkowanego w obszarach granicznych  $Q(\tau_2)$  oraz uszkodzeń  $Q(\tau_3)$ . Ładunki te w przypadku ładowania próbki z drzewkiem napięciem stałym 5 kV wynoszą około 4000 pC w obszarze granicznym i 8700 pC w obszarze uszkodzeń. Wartości te w analogicznych pomiarach na innym drzewku o podobnej długości dają podobny charakter prądów depolaryzacyjnych [4], ale

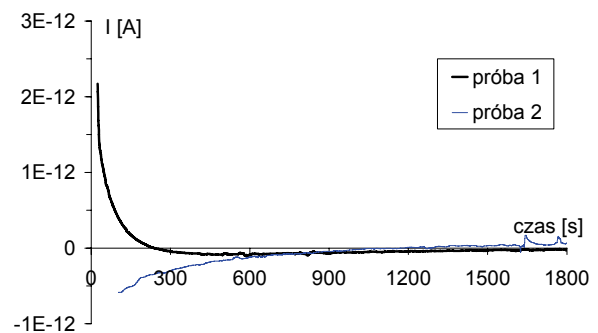
otrzymane wartości są o rząd wielkości większe. Otrzymane wówczas poziomy ładunku dla ostrza dodatniego wynosiły 160 pC na granicy elektroda-polimer oraz 500 pC dla zadrzewionej części izolacji. Świadczy to o dużej zmienności parametrów drzewka opisywanych w pracy [9].

Tabela 2. Obliczone czasy relaksacji ładunków z układu elektrod ostrze – płyta w XLPE ładowanym przy napięciu stałym

Napięcie ładowania próbki $t_{\text{polaryzacji}}=10$ minut	brak drzewka		drzewko $L=1,5$ mm	
	$\tau_i$ [s]	$a_i$ [pA]	$\tau_i$ [s]	$a_i$ [pA]
<b>1 kV</b>				
objętość izolacji	16,6	1,2	2,7	41
powierzchnie graniczne	52	3,4	12,8	16
defekty	242,5	7,1	155	7
współczynnik zesterzenia $A$	3,26		3,07	
<b>5 kV</b>				
objętość izolacji	18	1	24	16
powierzchnie graniczne	109	13	50	64
defekty	962	16	230	36
współczynnik zesterzenia $A$	4,36		2,2	

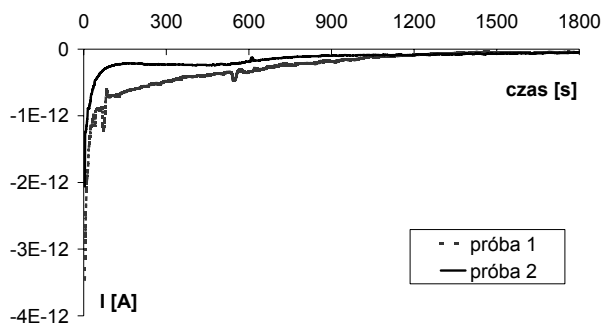
Kolejny etap badań polegał na ładowaniu drzewka napięciem skojarzonym tzn. udarami dodatnimi lub ujemnymi o kształcie 600/3500  $\mu$ s nakładanymi na napięcie stałe przez 60 s. Przyjęto wartość szczytową napięcia udarowego 11 kV i stosunkowo krótki, bo 200 ms odstęp między udarami (300 udarów w czasie 1 minuty ładowania). Dla porównania efektywności ładowania dokonano również starzenia tej samej próbki napięciem przemiennym o wartości skutecznej 8 kV (wartość szczytowa 11,2 kV<sub>max</sub>). Ze względu na niewielką pojemność próbki nie usuwano ładunków powierzchniowych poprzez krótkotrwałe zwarcie próbki.

Rysunek 2 przedstawia prądy depolaryzacyjne po ładowaniu drzewka napięciem przemiennym. Otrzymano przynajmniej rząd wielkości mniejsze i szybko zanikające w czasie prądy rozładowania w porównaniu do wyników depolaryzacji próbek ładowanych napięciami skojarzonymi (rys. 3 i 4).

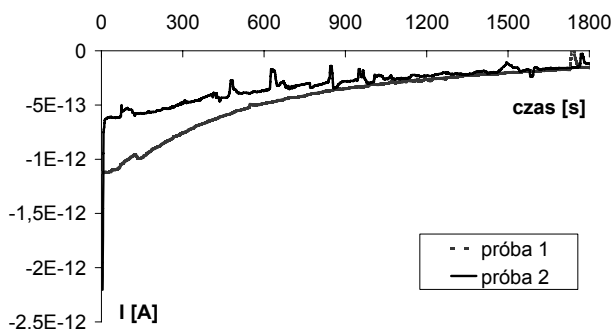


Rys. 2. Prądy depolaryzacji zmierzone po 1 minucie ładowania napięciem przemiennym 8 kV drzewka elektrycznego o długości 1,5 mm w układzie ostrze-płyta w polietylenie XLPE

Analizując przebiegi przedstawione na rysunkach 3 i 4 otrzymano większą wartość oraz dłuższą stałą czasową prądu depolaryzacji po ładowaniu udarami ujemnymi. Powyższa zależność świadczy o większej ilości ładunku ujemnego pułapkowanego w obszarze wady izolacji. Dla udarów dodatnich również otrzymano ujemną biegunowość prądu depolaryzacyjnego (rys. 4, tabela 3), co wskazuje na znacznie większą efektywność penetrowania przez elektrony stanów pułapkowych w objętości izolacji.



Rys. 3. Prądy depolaryzacji zmierzone po 1 minucie ładowania napięciem skojarzonym 11 kV o biegunowości ujemnej drzewka o długości 1,5 mm w polietylenie XLPE



Rys. 4. Prądy depolaryzacji zmierzone po 1 minucie ładowania napięciem skojarzonym 11 kV o biegunowości dodatniej drzewka o długości 1,5 mm w polietylenie XLPE

Ponieważ podczas nakładania ударов występuje stan oscylacyjny, a w czasie przejściowym po udarze występuje wyższy poziom składowej przemiennej o ujemnej biegunowości może występować skuteczne ładowanie elektronami i jonami ujemnymi obszaru drzewka w próbce. Obliczony poziom ładunku w stanach powierzchniowych i defektach izolacji wynosi około 230 pC i jest niższy od wartości otrzymanych podczas ładowania napięciem stałym przy niższym poziomie napięcia (5 kV), ale w znacznie dłuższym czasie.

Tabela 3. Obliczone czasy relaksacji ładunków z układu elektrod ostrze – płyta w XLPE ładowanym napięciem przemiennym i skojarzonym

Napięcie ładowania próbki	11 kV udar dodatni		11 kV udar ujemny		8 kV przemiennie	
	$\tau_i$ [s]	$a_i$ [pA]	$\tau_i$ [s]	$a_i$ [pA]	$\tau_i$ [s]	$a_i$ [pA]
$t_{\text{polaryzacji}} = 1 \text{ minuta}$						
objętość izolacji	572	1,45	385	8,51	0,37	0,15
powierzchnie graniczne	701	-6,07	474	25,13	31	2,19
defekty	760,8	5,13	530	17,32	43	3,05
współczynnik A	0,979		0,905		1,22	

## Wnioski

Prądy depolaryzacyjne rejestrowane przy obecności drzewka osiągają wyższe wartości, a ich początkowy przebieg odbiega od zależności wykładniczej. Zastosowanie wyższych napięć stałych do polaryzacji próbki pozwala skutecznie wykrywać drzewienie elektryczne i ładunek przestrzenny w próbce.

Wielkości ładunku przy napięciu stałym 5 kV wynoszą odpowiednio około 500-4000 pC i 1300-9000 pC w przestrzeniach granicznych i defektach dla ostrza dodatniego. Otrzymane wartości są zależne również od struktury i parametrów elektrycznych drzewka np. rezystywności kanałów, a nie tylko od jego długości.

Ładowanie próbki napięciem skojarzonym ujemnym wymusza nieznacznie wyższe wartości prądu depolaryzacyjnego i ładunku w stosunku do napięć skojarzonych dodatnich. Poziom ładunku w obszarze granicznym i wady można oszacować na poziomie 200 pC. Przy ładowaniu próbki napięciem skojarzonym dodatnim i ujemnym obserwuje się w każdym przypadku ładunki ujemne, co świadczy większościowym charakterze elektronów w procesach wymiany ładunku w obszarze wady izolacji.

## LITERATURA

- [1] Aida F., Wang S., Fujita M., Tanimoto G., Fujiwara Y., Study of the mechanism of space charge formation in polyethylene, *Journal of Electrostatics* 42, (1997), 3 – 15
- [2] Hare R. W., Hill R. M, Budd C. J., Modelling charge injection and motion in solid dielectrics under high electric field, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 26, (1993), 1084-1093
- [3] Olesz M., Wpływ drzewienia elektrycznego na prądy polaryzacyjne i depolaryzacyjne w izolacji polietylenowej, X Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia, EU1 '05, Krynica 27-30.09.2005 r., Przegląd Elektrotechniczny, Konferencje, (2005), 193-196,
- [4] Olesz M., Wpływ drzewienia elektrycznego na poziom ładunku w obszarze przyelektrodowym izolacji polietylenowej, Przegląd Elektrotechniczny 1/2006, Materiały VIII Ogólnopolskiego Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć - IW 2006, Poznań-Będlewo, 08-10.05.2006 r., (2006), 182-185
- [5] Aucland D., Kabir S., Varlow B., Space-charge and Breakdown in Artificial Tree Channels, VI Intern. Conf. on DMMA, (1992), 197-200
- [6] Simons J. G., Tamm M. C., Theory of Isothermal Currents and Direct Determination of Trap Parameters in Semiconductors and Insulators Containing Arbitrary Trap Distributions, *Physical Rev.*, vol. 7, No 8, (1973)
- [7] Hofmann R., Kranz H. G., IRC – Analysis: Destruction Free Dielectric Diagnosis of Mechanical and Service Aged Polymeric Insulation, ISH High Voltage Eng. Symposium, *IEE Conference Publication No 467*, vol. 4, (1999)
- [8] Fukuzawa M., Iwamoto M., TSC Measurement of Space Charge in Low-density PE under a Needle-plane Electrode System, *IEEE Trans. on DEI*, vol. 6, no. 6, (1999), 858-863
- [9] Vaughan A. S., Dodd S. J., Sutton S. J., Electrical Tree Growth in Polyethylene: Complementary Chemical and Structural Characterisation, *2004 International Conf. On Solid Dielectrics*, Toulouse, France, July 5-9, (2004)
- [10] Reuter M., Gockenbach E., Borsi H., Impact of Multistress Aging on the Dielectrics Relaxation Behaviour of XLPE Cable Insulation, *2004 International Conf. on Solid Dielectrics*, Toulouse, France, July 5-9, (2004)

Autor: dr inż. Marek Olesz, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych, ul. Własna Strzecha 18A, 80-952 Gdańsk, e-mail: [molesz@elv.pg.gda.pl](mailto:molesz@elv.pg.gda.pl)