



## Wpływ drzewienia elektrycznego na prądy polaryzacyjne i depolaryzacyjne w izolacji polietylenowej

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań prądów polaryzacyjnych i depolaryzacyjnych układu ostrze – płyta uziemiona w polietylenie sieciowanym (XLPE). Zastosowano próbki XLPE z igłą o promieniu ostrza  $5\ \mu\text{m}$  symulującą typowe niejednorodności występujące w procesie wytwarzania izolacji kablowej. Analizowano przebieg prądów polaryzacyjnych i depolaryzacyjnych dla różnego stopnia starzenia próbek izolacji, charakteryzującego się inną długością drzewka elektrycznego.

**Abstract.** (*Polarisation and depolarisation currents connected with electrical treeing in polyethylene insulation*) The paper presents polarisation and depolarisation current measurements in the needle – polyethylene – plate arrangement. Each specimen was prepared by inserting needle electrode ( $5\ \mu\text{m}$  radius) into each block pieces to simulate typical voids or protrusions within cable insulation. The paper discusses research results of current measurements for different lengths of electrical tree in polymer insulation.

**Słowa kluczowe:** izolacja polietylenowa, drzewienie elektryczne, prąd polaryzacji, prąd depolaryzacji  
**Keywords:** polyethylene insulation, electrical treeing, polarisation current, depolarisation current

### Wstęp

W eksploatacji układów izolacyjnych do obowiązkowych procedur należy badanie stanu izolacji. Istnieje szereg, coraz częściej stosowanych w praktyce nieniszczących metod pozwalających na ocenę stanu izolacji podczas jej użytkowania. Należą do nich m. in. metody analizy prądów polaryzacji i depolaryzacji, rozproszenia dielektrycznego lub napięcia powrotnego [1].

Pomiar odpowiedzi prądowej izolacji na skok jednostkowy napięcia jest podstawową metodą stosowaną w energetyce do badania stanu izolacji, a szczególnie wykrywania wyraźnych wad i zawilgocenia. Cennym uzupełnieniem pomiarów polaryzacyjnych jest analiza depolaryzacji w czasie. Metrologicznie stanowi to zagadnienie trudniejsze ponieważ tylko ładunki przestrzenne w próbce są źródłem napięcia w obwodzie pomiarowym elektrometru. Przy pomiarze niewielkich sygnałów prądowych należy rozwiązać szereg problemów związanych z separacją sygnału mierzonego od niepożądanych zakłóceń.

W praktyce eksploatacyjnej pomiar wyłącznie współczynnika polaryzacji nie daje jednoznacznej informacji co do rozmiarów drzewienia. Wyniki pracy [2] wskazują, że w układzie modelowym ostrze – płyta uziemiona w polietylenie sieciowanym XLPE prawidłowa detekcja wzrostu drzewka elektrycznego jest możliwa przez obserwację ładunku maksymalnych wyładowań niepełnych mierzonych przy napięciach  $10\div 12\ \text{kV}$  oraz pomiar współczynnika stratności dielektrycznej tangens delta. Natomiast pomiary współczynnika polaryzacji przy wysokich napięciach stałych z zakresu  $8\div 12\ \text{kV}$  dają dość przypadkowe charakterystyki. Potwierdzeniem tych wniosków są doświadczenia eksploatacyjne energetyki zawodowej. W jednym z rejonów energetycznych Polski północnej poddano analizie protokoły prób odbiorczych linii kablowych YHAKX zawierające wyniki pomiarów rezystancji izolacji mierzonej przy napięciu  $2,5\ \text{kV}$  oraz prądu upływu rejestrowanego przy napięciu stałym  $40\ \text{kV}$ . Na podstawie protokołów prób można stwierdzić - pomijając przebieg charakterystyk prądu upływu  $I$  oraz rezystancji izolacji  $R$  w funkcji czasu eksploatacji linii - zasadniczą różnicę w wyliczonych wartościach rezystancji, np.  $400\ \text{M}\Omega/\text{km}$  długości linii (pomiar  $R$ ) i tylko  $100\ \text{M}\Omega/\text{km}$  przy próbie napięciowej izolacji.

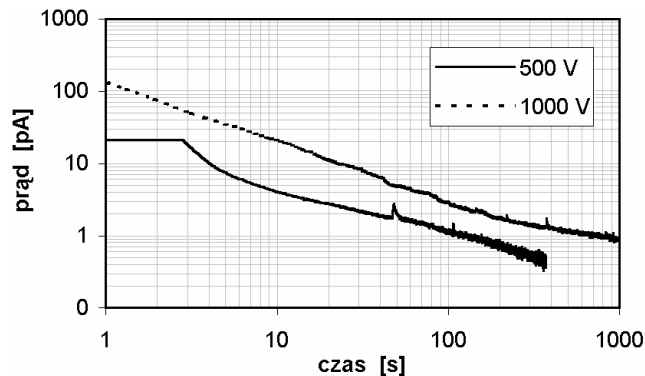
W celu sprawdzenia skuteczności wykrywania stopnia „zadrzewienia” izolacji kablowej wykonano w pracy badania prądów polaryzacyjnych i depolaryzacyjnych układu ostrze – płyta uziemiona w polietylenie. Zastosowano igły o promieniu ostrza rzędu  $5\ \mu\text{m}$  symulujące typowe niejednorodności występujące w procesie wytwarzania izolacji kablowej. W praktyce niejednorodności te są wtrącaniami gazowymi, jednakże pod wpływem pola elektrycznego łatwo dochodzi w nich do wzn. i zjonizowania gazu powodującego przejście z tzw. ostrza gazowego w przewodzące. Analizowano przebieg prądów polaryzacyjnych i depolaryzacyjnych dla różnych rozmiarów drzewka elektrycznego w izolacji. Na podstawie przebiegu prądów polaryzacyjnych próbek ładowanych napięciem stałym w różnych temperaturach określono energię aktywacji ładunków ze stanów pułapkowych.

### Odpowiedź prądowa układu ostrze – płyta uziemiona z drzewkiem elektrycznym

Próbkę polietylenu kablowego XLPE z warstwą ekranu półprzewodzącego umieszczono w komorze probierczej i wprowadzono w nią igłę o promieniu ostrza  $5\ \mu\text{m}$ , tak aby uzyskać odległość igła – płyta uziemiona  $3\ \text{mm}$ . Następnie w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  ( $293\ \text{K}$ ) lub  $70^\circ\text{C}$  ( $343\ \text{K}$ ) do próbki nie zdegradowanej lub z wytworzonym drzewkiem elektrycznym o długości z zakresu  $0,3\ \text{mm}$  do  $3\ \text{mm}$  (zwarcie elektrod) przykładano napięcie prostokątne o amplitudzie  $1000\ \text{V}$  mierzając przebieg prądu polaryzacyjnego za pomocą pikoamperomierza Keithley 6517A. Po 10 minutowym czasie polaryzacji próbki, wyłączano napięcie i po 5 sekundach przełączano pikoamperomierz na zaciski próbki rejestrując prąd depolaryzacyjny. Dodatkowo wykonano pomiary tylko prądu polaryzacji miernikiem rezystancji izolacji Megger BM 25 w celu określenia możliwości wykrywania zmian w układzie modelowym izolacji typowym przyrządem stosowanym w badaniach eksploatacyjnych.

We wstępnym próbach zmierzono charakterystyki prądu w opisanym układzie do prób igłowych w polietylenie sieciowanym, a także w folii polietylenowej umieszczonej w komorze Keithley 8009, co w pewnym sensie odwzorowuje układ kabla bez uszkodzeń wewnętrznych [3]. Odmienne przebiegi charakterystyk z rysunków 1 i 2 wskazuje na możliwość wykrywania nakułów w izolacji nawet

przy niewielkich napięciach probierczych, które powinny dawać nie tyle niską wartość rezystancji izolacji, co współczynnik polaryzacji bliski 1.



Rys. 1. Przebiegi odpowiedzi prądowej folii polietylenowej LDPE w układzie płaskim przy napięciu 500 V i 1 kV

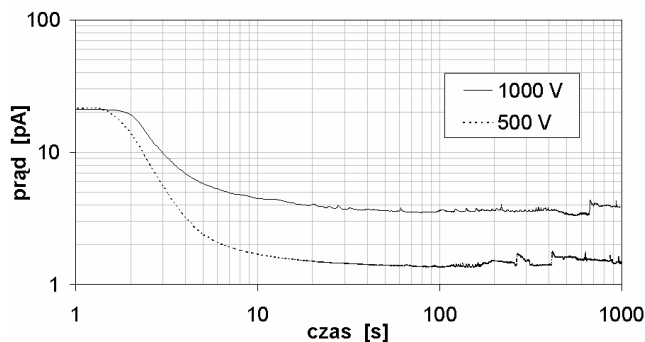
W przypadku próbki płaskiej występuje powolne zanikanie prądu (rys. 1), który przedstawia w skali podwójnie logarytmicznej prostą aproksymowaną zależnością potęgową:

$$(1) \quad I = A \cdot t^{-n}$$

gdzie:  $A$  - współczynnik zależny od temperatury,  $t$  - czas,  $n$  współczynnik zależny od procesów polaryzacyjnych [4].

Obliczona na podstawie równania (1) wartość współczynnika  $n$  wynosi 0,76 i jest zgodna z danymi literaturowymi [4].

Natomiast pomiary odpowiedzi prądowej w układzie elektrody igłowej w XLPE pokazane na rysunku 2 przedstawiają odmienny przebieg charakterystyk. W tym przypadku po około 20 s od przyłożenia napięcia stałego do izolacji obserwowano efekt utrzymywania się w przybliżeniu stałej wartości prądu, najprawdopodobniej o charakterze upływnościowym. Z tego powodu część badań związanych z określeniem energii aktywacji wykonano dla krótkich czasów polaryzacji tylko do 20 s, wykonując po trzy serie pomiarów dla każdej z badanych temperatur.



Rys. 2. Przebiegi odpowiedzi prądowej w układzie do prób igłowych polietylenu

W układzie do prób igłowych polietylenu, stosując różne głębokości wklucia igły lub pozostawiając ją w stałej odległości od elektrody płaskiej, ale wytwarzając degradację izolacji poprzez widoczne w polu mikroskopu drzewienie, uzyskuje się zaskakująco podobne przebiegi prądów polaryzacyjnych w czasie (rys. 3). Zależność taka jest słuszną dla pewnego zakresu położenia elektrody igłowej lub rozmiaru przewodzących gałęzi drzewka określającego w przybliżeniu stały poziom natężenia pola elektrycznego  $E$  w pobliżu igły, będący przyczyną

przyspieszania nośników prądu, pułpowania, a w dalszej perspektywie rozwoju drzewka elektrycznego.

Przybliżoną wartość natężenia pola  $E$  można obliczyć stosując wzór Masona, w postaci:

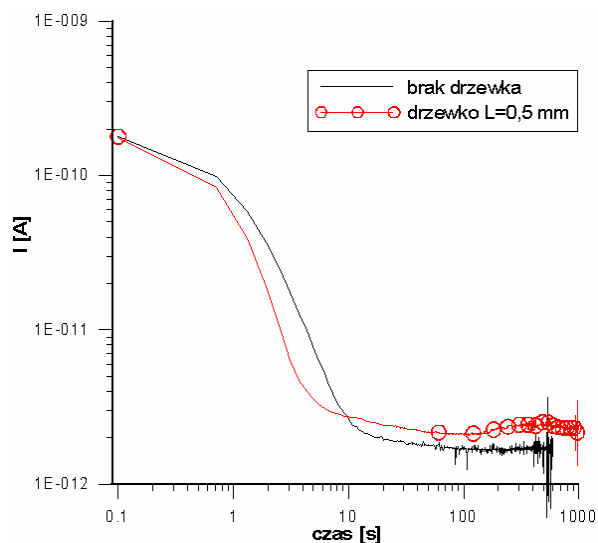
$$(2) \quad E = \frac{2U}{r \ln\left(1 + \frac{4h}{r}\right)},$$

gdzie:  $U$  - napięcie przyłożone do elektrody igłowej,  $r$  - promień ostrza igły,  $h$  - odległość ostrza igły od uziemionej elektrody.

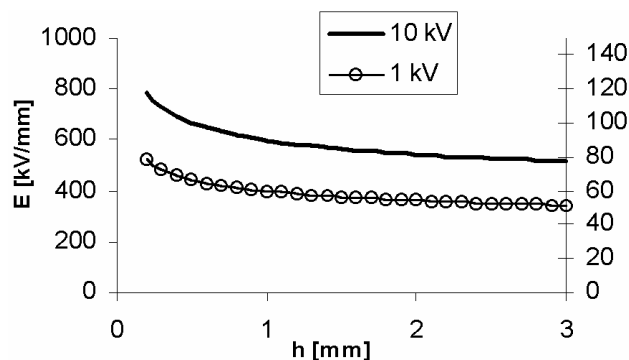
Przebieg maksymalnego natężenia pola  $E$  w układzie ostrze - płyta uziemiona pokazany na rysunku 4 wskazuje na niewielkie zmiany pola elektrycznego na końcu elektrody igłowej przy wkluciach do 2/3 grubości izolacji.

W rozważanym przypadku stosowano do inicjacji i rozwoju drzewienia napięcie przemienne  $U$  o wartości maksymalnej 10 kV przykładane do igły o promieniu  $r = 5 \mu\text{m}$ , w odległości  $h = 3 \text{ mm}$  od uziemionej elektrody. Podstawiając te wartości do wzoru (2) otrzymano wartość natężenia pola  $E$  około 600 kV/mm, wielokrotnie przewyższającą umowny poziom natężenia pola degradacji polietylenu przyjęty na poziomie 50 kV/mm.

Tak duże natężenie pola elektrycznego powodowało po czasie co najwyżej minuty inicjację, a następnie rozwój drzewka elektrycznego, który zatrzymywano na długości  $L = 0,5 \text{ mm}$ , 1 mm lub 1,8 mm, a następnie przeprowadzono pomiary odpowiedzi prądowej na skok napięcia według programu badań.



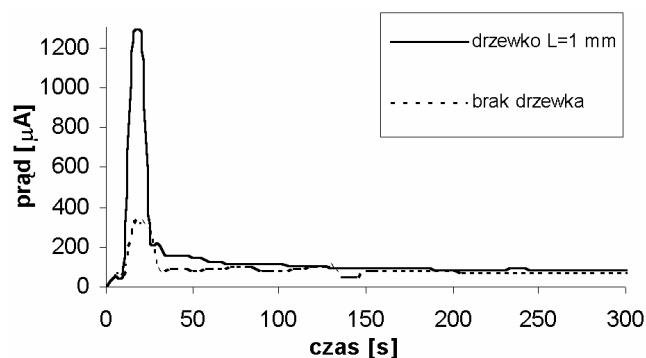
Rys. 3. Prądy polaryzacyjne w układzie badanym z drzewkiem  $L=0,5 \text{ mm}$  i bez drzewka



Rys. 4. Poziom natężenia pola elektrycznego na elektrodzie igłowej w funkcji jej odległości od elektrody uziemionej dla dwóch wartości napięcia - 1 kV (prawa skala) i 10 kV (lewa skala)

Z analizy przebiegów krzywych z rysunku 3 wynika, że zastosowana w badaniach metoda odpowiedzi prądowej w układzie ostrze – płyta wykazuje nieznaczne różnice pomiędzy próbką nieuszkodzoną a próbką, w której wystąpiło drzewienie elektryczne. W stanie ustalonym wartość prądu z drzewkiem elektrycznym jest zaledwie o 1÷2 pA wyższa niż w próbce nieuszkodzonej. Wynika to z faktu, iż przy wzroście drzewka nawet do 2/3 grubości izolacji przy napięciu 1 kV przy potraktowaniu końca prowadzącej gałęzi drzewka jako przewodzącej igły powstaje niewiele większe natężenie pola elektrycznego powodujące przepływ nieznacznie większego prądu (rys. 4).

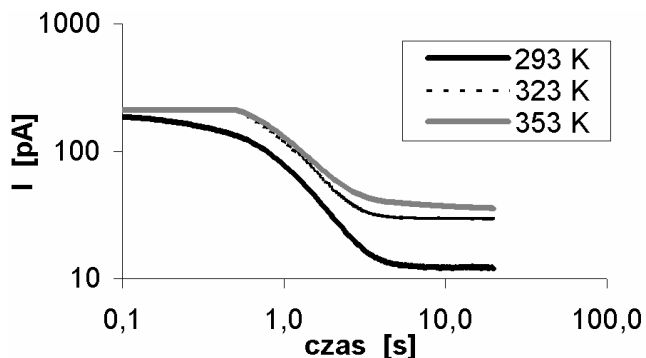
Dla porównania podano wyniki pomiarów przyrządem eksploatacyjnym Megger BM 25 otrzymane przy napięciu 5 kV. Napięcie ma w pomiarach rezystancji izolacji istotne znaczenie, ponieważ jego odpowiednia wielkość może aktywować pewne wady izolacji. Pokazane na rysunku 5 przebiegi prądu polaryzacyjnego przy 5 kV wskazują na wyraźną różnicę pomiędzy próbką z drzewkiem i bez drzewka tylko podczas przepływu składowej pojemnościowej i absorpcyjnej prądu próbki.



Rys. 5. Przebieg odpowiedzi prądowej próbki igłowej na przyłożenie napięcia 5 kV uzyskany za pomocą miernika rezystancji izolacji Megger BM25 w trybie pomiaru prądu

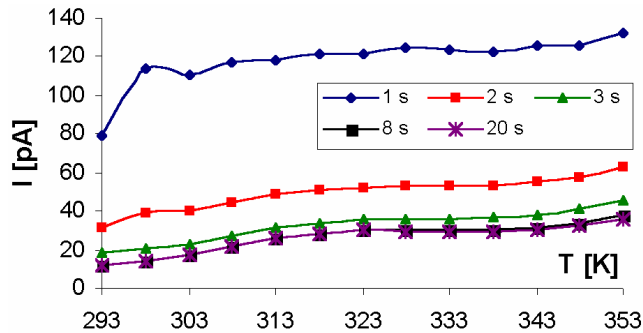
### Energia aktywacji

W celu stwierdzenia, w jakim stopniu zmiana temperatury polietylenu sieciowanego wpływa na przebieg odpowiedzi prądowej wykonano pomiary przy drzewku o długości  $L = 0,5$  mm w zakresie od 293 K do 353 K, co 5 K [8]. Wyniki pomiarów prądów polaryzacji dla trzech wybranych temperatur pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Porównanie odpowiedzi prądowych próbki z drzewkiem o długości  $L=0,5$  mm w trzech różnych temperaturach (średnie z trzech pomiarów)

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów sporządzono przebiegi prezentujące zależności wartości prądów po 1, 2, 3, 8 oraz 20 sekundach w funkcji temperatury (rys. 7, 8).

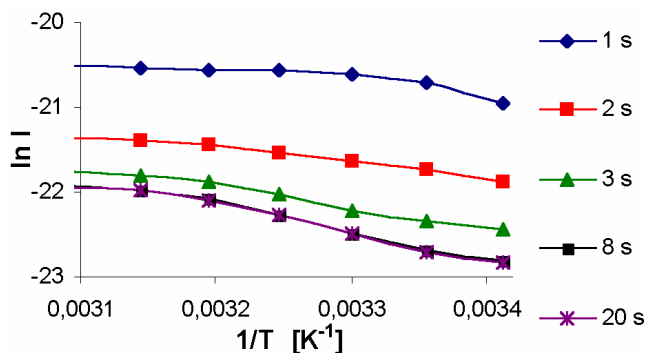


Rys. 7. Zależności prądu w funkcji temperatury dla czasów: 1, 2, 3, 8 i 20 s

Pokazane na rysunku 7 przebiegi prądu wykreślono również w układzie  $\ln I - (1/T)$  (rys. 8) i aproksymowano linią prostą zgodnie z równaniem Arrhenius'a [5]:

$$(3) \quad I = I_0 \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right)$$

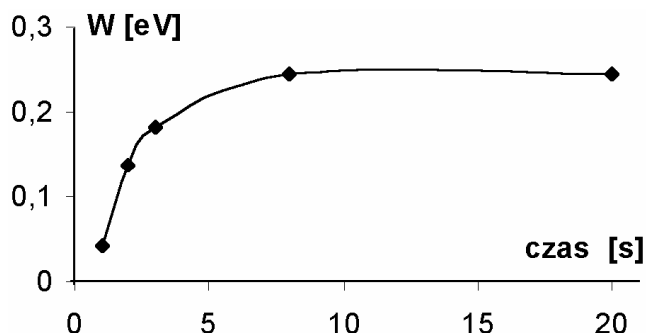
gdzie:  $k_B$  - stała Boltzmanna równa  $8,6173 \cdot 10^{-5}$  eV/K,  $W$  - energia aktywacji,  $T$  - temperatura



Rys. 8. Zależności  $\ln I(1/T)$  dla czasów 1 s, 2 s, 3 s, 8 s i 20 s od przyłożenia napięcia do próbki badanej

Na podstawie współczynnika kierunkowego prostych wyliczono energię aktywacji  $W$  w funkcji czasu przyłożenia napięcia do próbki, co pokazano na rysunku 9.

Poziom energii aktywacji w stanie ustalonym wynosi tylko 0,25 eV i jest zbliżony do wartości otrzymanych dla kabli polietylenowych ( $0,5 \pm 0,54$  eV) [4]. Otrzymana niższa wartość energii aktywacji prawdopodobnie wynika z silnie niejednostajnego pola w otoczeniu igły w stosunku do próbek kablowych.



Rys. 9. Energia aktywacji w funkcji czasu przyłożenia napięcia

W analizie odpowiedzi prądowej dielektryka najprostszym modelem jest kondensator wypełniony dielektrykiem, przez który po przyłączeniu do źródła napięcia stałego płynie krótkotrwały prąd ładowania, a następnie po procesie

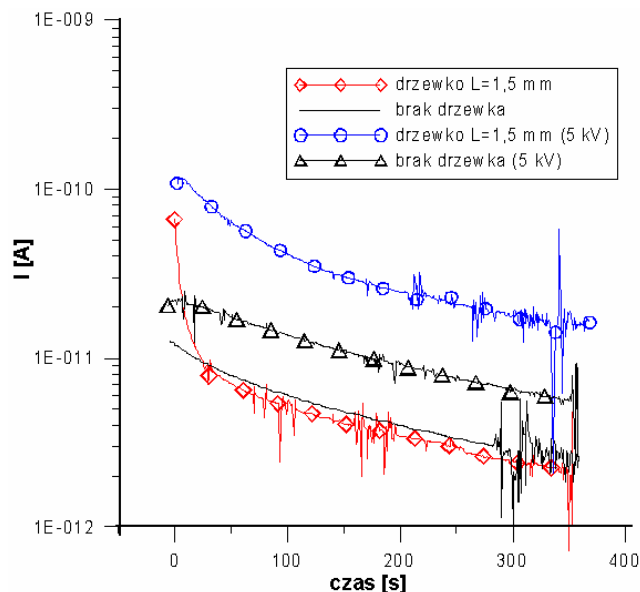
polaryzacji niewielki prąd upływnościowy. Przebiegi odpowiedzi prądowej polietylenu XLPE uzyskane w wyniku pomiarów, które przedstawiono na rysunkach 5+8, są zbliżone do przebiegów teoretycznych, przy czym temperatura, w jakiej znajduje się próbka polietylenu sieciowanego istotnie wpływa na odpowiedź prądową [3, 6]. W stanie ustalonym, zgodnie z rysunkiem 6, wartość prądu w XLPE w temperaturze 20°C (293 K) jest o 17 pA mniejsza niż w próbce w temperaturze 50°C (323 K). W temperaturze 80°C (353 K) różnica ta wynosi już 24 pA. Wyjaśnienie przebiegu zależności prądu polaryzacji od czasu wymaga pewnego uproszczenia polegającego na założeniu, że badany dielektryk nie ma swobodnych ładunków elektrycznych oraz składa się z dipoli o dominującym czasie relaksacji zależnym od temperatury  $\tau(T)$  spełniających zależność arrheniusowską:

$$(4) \quad \tau(T) = \tau_{\infty} \exp\left(\frac{W}{k_B T}\right),$$

gdzie:  $\tau_{\infty}$  oznacza naturalny czas relaksacji dipoli.

### Prądy depolaryzacji

Na rysunku 10 pokazano charakterystyki  $I(t)$  prądów depolaryzacyjnych w próbkach polietylenu w układzie ostrze – płyta uziemiona. Charakterystyki te zmierzone po ładowaniu próbki napięciem 1 kV lub 5 kV przez czas 10 minut przedstawiają w układzie współrzędnych logarytm  $I$  – czas  $t$  postać prostych równoległych. W przypadku igły bez drzewka obserwuje się zależność wykładniczą, natomiast przy wystąpieniu drzewka w krótkich czasach relaksacji obserwuje się wzrost prądu. O ile przy napięciu 1 kV oprócz wspomnianego wzrostu prądu przebiegi z drzewkiem i bez drzewka są podobne, to przy wyższym napięciu obserwowano również różnice w wartościach prądu w całym zakresie depolaryzacji.



Rys. 10. Prądy depolaryzacji zmierzone po 10 min. ładowania układu ostrze – płyta w polietylenie XLPE

Prądy depolaryzacyjne mogą zostać przeliczone na empiryczne współczynniki starzenia określające stan izolacji kabla. Metoda ta wymaga znalezienia stałych  $a_i$  oraz stałych czasowych relaksacji ładunków  $\tau_i$  sumy funkcji

wykładniczych (4) i daje poprawne wyniki wykrywania drzewienia wodnego i elektrycznego w kablach XLPE [7].

$$(5) \quad I(t) = I_0 + \sum_{i=1}^3 a_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}$$

Prostszym sposobem stosowanym w praktyce jest obliczenie wskaźnika degradacji jako stosunku zaabsorbowanego ładunku podzielonego przez iloczyn pojemności i napięcia ładowania próbki [1].

### Wnioski

1. W układzie ostrze – płyta w polietylenie XLPE metoda odpowiedzi prądowej na skok napięcia o wartości 1 kV nie pozwala ocenić charakteru uszkodzenia izolacji. Wynika to z zastosowania zbyt niskiego napięcia probierczego.
2. W czasie prób stwierdzono po około 20 s od momentu przyłożenia napięcia w przybliżeniu stałą wartość prądu, prawdopodobnie spowodowaną dużą, składową upływnościową.
3. Obliczona na podstawie charakterystyk odpowiedzi prądowej energia aktywacji polietylenu w stanie ustalonym wynosi 0,25 eV i jest niższa od wartości podawanych w literaturze dla kabli polietylenowych (0,5 ÷ 0,54 eV). Mniejsza wartość energii aktywacji związana jest prawdopodobnie z występowaniem silnie niejednostajnego pola elektrycznego w otoczeniu igły.
4. Prądy depolaryzacyjne przy obecności drzewka osiągają wyższe wartości, a ich początkowy przebieg odbiega od zależności wykładniczej.

### LITERATURA

- [1] Bolarin Oyegoke, Petri Hevonen, Martti Aro, Ning Gao, Application of dielectric response measurement on power cable systems, *IEEE Trans. on DEI*, vol. 10, no. 5, 2003, 862-872
- [2] Kang D. S., Sun J. H., Lee H. S., The relationship between electrical characteristics and electrical tree degradation in XLPE insulation, *Proc. of the 6<sup>th</sup> ICPADM*, 2000, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, 546-549
- [3] Kusche M., Kalkner W., Dielectric response measurements in time and frequency domain of different XLPE homo- and copolymer insulated medium voltage cables, *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 146, No. 5, September 1999, 243-248
- [4] Taylor D. M., Lewis T. J., Electrical conduction in polyethylene terephthalate and polyethylene films, *J. Phys., D: Appl. Phys.*, 1971, Vol. 4, 1346-1357
- [5] Hilczer B., Matecki J., *Elektrety i piezopolimery*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1992
- [6] Adamec V., Calderwood J. H., On the determination of electrical conductivity in polyethylene, *J. Phys., D: Appl. Phys.*, 14, (1981), 1487-94
- [7] Wojtas S., Olesz M., Michalski R., Analiza prądu relaksacji izotermicznej w polietylenie kablowym, *Przegląd Elektrotechniczny, Konferencje*, nr 1, Materiały VII Ogólnopolskiego Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć - IW 2004, Poznań-Będlewo, 26-28.05.2004 r., 247-250
- [8] Łazarewicz M., Odpowiedź prądowa układu ostrze – płyta w polietylenie sieciowanym na skok jednostkowy napięcia, *Praca dyplomowa magisterska*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2003

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)