

Marek Olesz<sup>1</sup>**PRĄDY TERMICZNIE STYMULOWANE W FOLIACH POLIMEROWYCH  
PODDANYCH STARZENIU ELEKTRYCZNEMU**

**Streszczenie:** Przedstawiono wyniki badań metodą prądów termicznie stymulowanych w folii polietylenotereftalanowej (PET) i polietylenowej (PE), poddawanych działaniu napięcia stałego, przemiennego lub skojarzonego w układzie elektroda walcowa – płyta w temperaturze 293 K. Opisano wpływ rodzaju napięcia na właściwości elektretowe folii, obliczane na podstawie przebiegu prądu depolaryzacji w funkcji temperatury.

**Słowa kluczowe:** folia polietylenotereftalanowa i polietylenowa, narażenia napięciowe, termicznie stymulowana depolaryzacja, energia aktywacji

**1. Wstęp**

Znane są prace stwierdzające inkubację drzewka w polimerze [1] lub przebicie rzeczywistej izolacji kablowej [2] po pewnym czasie od przyłożenia udaru łączeniowego, w czasie roboczego napięcia przemiennego. W pracy [3] udowodniono doświadczalnie w temperaturze 293 K przechwytywanie wyładowań niepełnych (wnz) w polietylenie sieciowanym. Zjawisko to polega na inicjowaniu udarem łączeniowym wnz, które następnie mogą być podtrzymywane napięciem przemiennym o amplitudzie mniejszej od napięcia progowego. Wydaje się prawdopodobnym, że przyczyna obserwowanego zjawiska wynika z kumulowania w polietylenie ładunku przestrzennego [4,5]. W celu określenia wielkości pułapowanego ładunku i energii koniecznej do jego uwolnienia podjęto badania metodą prądów termicznie stymulowanych na foliach PET i PE, które poddawano narażaniu napięciem stałym, przemiennym lub skojarzonym. Przebieg prądu depolaryzacyjnego w funkcji temperatury pozwala ocenić stan naelektryzowania folii wskutek oddziaływania wnz w czasie działania napięcia, kinetykę procesów depolaryzacyjnych, a pośrednio rozmiary i rozkład defektów strukturalnych [6].

<sup>1</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, 80-952 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12, tel. 058-3471820, e - mail: molesz@ely.pg.gda.pl

## 2. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na próbkach folii PET i PE o grubości odpowiednio 40  $\mu\text{m}$  i 150  $\mu\text{m}$ . Dla każdego poziomu napięcia probierczego przygotowano zestawy po 5 próbek z pasa folii w stanie poprodukcyjnym, które oznaczono i poddano wygrzewaniu przez ok. 10 godzin w temperaturze 350 K (PE) lub 370 K (PET), w celu usunięcia tła poprodukcyjnego. Próbki, po sprawdzeniu braku poprodukcyjnego stanu elektretowego przez wstępne badanie termicznie stymulowanej depolaryzacji (TSD), przechowywano w uziemionym klaserze ekwipotencjalnym, wykonanym z folii aluminiowej. Do sterowania przebiegiem procesu oraz rejestracji pomiarów zastosowano układ mikroprocesorowy opisany w pracy [6].

Przygotowane zestawy próbek narażano różnymi rodzajami napięć w układzie walec-płyta: stałym (9 kV, czas 240 sekund), przemiennym (amplituda 9 kV, czas 240 s) bądź skojarzonym (udary 600  $\mu\text{s}$ /3500  $\mu\text{s}$ , wartość szczytowa 9 kV nakładane na napięcie przemiennie o amplitudzie 0,5 kV lub 4 kV co 200 ms przez czas 240 s, co odpowiada przyłożeniu 1200 udarów łączeniowych).

Bezpośrednio po zakończeniu oddziaływania napięcia na próbkę przeprowadzano proces TSD i rejestrowano krzywe prądu termicznie stymulowanego. Na podstawie charakterystyk prądu depolaryzacji w funkcji temperatury, obliczano uśrednione współrzędne maksimum prądu ( $T_M$ ,  $I_M$ ) oraz energię aktywacji  $E_1$  z wzoru Chena [7]:

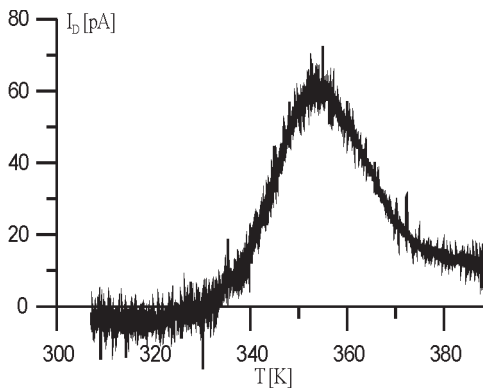
$$E_1 = 1,52 \frac{kT_M^2}{T_M - T_1} - 3,16kT_M \quad (1)$$

w którym:  $E_1$  – energia aktywacji w [eV],  $I_M$  – maksymalna wartość prądu depolaryzacyjnego w [pA],  $T_M$  – wartość maksymalna temperatury pików w [K],  $T_1$  – temperatura (na lewo od ekstremum prądu depolaryzacji) w [K] dla której  $I_D = 0,5 I_M$ ,  $k$  – stała Boltzmanna ( $k = 8,6174 \cdot 10^{-5}$  eV/K).

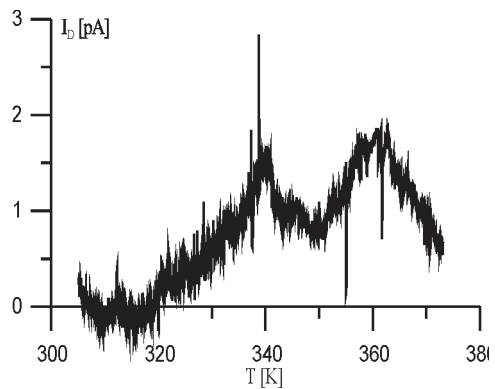
## 3. Omówienie wyników badań

Na rys. 1, 2, 3 przedstawiono wybrane przebiegi prądu termicznie stymulowanej depolaryzacji  $I_D$  w funkcji temperatury  $T$  dla próbek narażanych odpowiednio napięciem stałym, przemiennym i skojarzonym wg programu podanego w metodyce badań. Współrzędne ekstremum prądu oraz wyniki obliczeń energii aktywacji na podstawie wzoru (1) zestawiono w tabeli 1. Dla folii PET stwierdzono maksymalną wartość prądu depolaryzacji na poziomie 85 pA (przy wartości średniej 78,8 pA), dla narażania napięciem stałym (rys. 1). Natomiast folia PE przy rozpatrywanym rodzaju napięcia nie daje jednoznacznych do analizy ekstremów lokalnych, ze względu na niewielki prąd depolaryzacji nie przekraczający 5 pA. Tej samej wielkości prądy zarówno dla PET i PE otrzymano w przypadku narażania folii napięciem przemiennym. Przykładowy termogram dla folii PE po narażaniu napięciem przemiennym pokazano na rys. 2, gdzie prąd depolaryzacji osiąga zaledwie 2 pA.

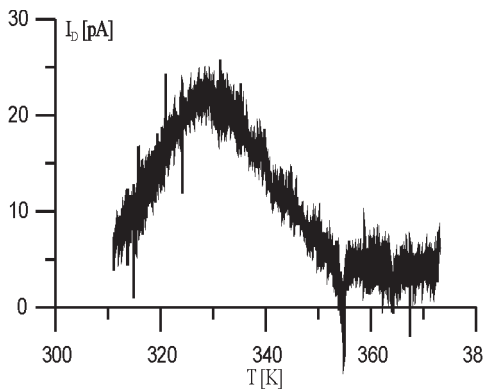
Ciekawe wyniki otrzymano w przypadku narażania próbek napięciem skojarzonym (wartość szczytowa udaru łączeniowego równa amplitudzie napięcia stałego i przemiennego), dla którego największe wartości prądów depolaryzacyjnych (rys. 4)



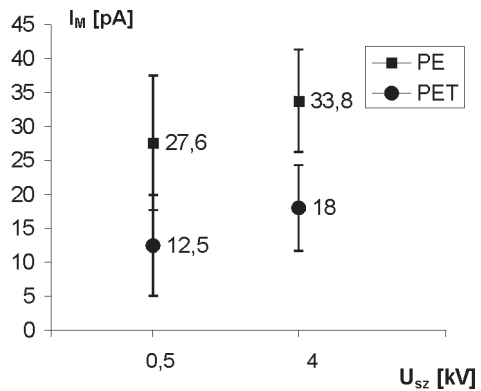
**Rys.1.** Przykładowa krzywa prądu TSD dla folii PET po narażeniu napięciem stałym



**Rys.2.** Przykładowa krzywa prądu TSD dla folii PE po narażeniu napięciem przemiennym



**Rys.3.** Przykładowa krzywa prądu TSD dla folii PE po narażeniu napięciem skojarzonym



**Rys. 4.** Porównanie prądu depolaryzacji  $I_M$  dla folii PE i PET narażanych napięciem skojarzonym (składowa udarowa 9 kV, składowa przemienna  $U_{sz}$  0,5 i 4 kV)

otrzymano dla folii PE. Okazuje się, że polietylen przy tego rodzaju napięcia gromadzi w sposób trwały ładunek elektryczny wielokrotnie większy (rys. 3), niż przy napięciu stałym lub przemiennym (rys. 2). Wzrost amplitudy składowej przemienniej nieznacznie intensyfikuje proces gromadzenia ładunku, a zmiana biegunowości udaru praktycznie pozostaje bez wpływu na maksimum prądu depolaryzacyjnego (tab. 1). Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na przyspieszenie degradacji polietyleny obecnością ładunku przestrzennego wprowadzanego w miejscach niejednorodności pola elektrycznego przez udary nakładane na robocze napięcie przemiennym. Świadczą o tym przeprowadzone badania początkowej fazy rozwoju drzewienia elektrycznego z elektrody ostrzowej o promieniu zaokrąglenia 5  $\mu\text{m}$ , w czasie których obserwowano szybszy wzrost długości drzewka właśnie przy napięciu skojarzonym [3].

W folii PET gromadzenie ładunku elektrycznego ma miejsce zasadniczo przy napięciu stałym. Narażanie napięciem skojarzonym daje w obszarze przyelektrodowym mniejszą ilość ładunku elektrycznego w stosunku do folii PE, z podobnym wpływem amplitudy składowej przemiennej i biegunowości udaru.

W obu rodzajach folii energia aktywacji obliczana z przebiegu prądu TSD osiąga najmniejsze wartości przy napięciu skojarzonym o składowej przemiennej  $U_{SZ}=4$  kV, co wskazuje na wpływ napięcia przemiennego na kinetykę procesów gromadzenia i usuwania ładunku.

**Tab. 1.** Wartości charakteryzujące przebieg prądu depolaryzacyjnego w zależności od rodzaju napięcia narażającego, B.E – brak jednoznacznego ekstremum

Materiał:		Folia PET			Folia PE		
Narażenie:		$T_M$	$I_M$	$E_1$	$T_M$	$I_M$	$E_1$
		[K]	[pA]	[eV]	[K]	[pA]	[eV]
napięcie stałe elektr. walcowa (+)	240 s	354,3	78,8	1,8	B.E	B.E	B.E
napięcie stałe elektr. walcowa (-)	240 s	354,0	63,2	1,8	B.E	B.E	B.E
napięcie przemienne	240 s	B.E	B.E	B.E	B.E	B.E	B.E
napięcie skojarzone (-9 kV/0,5 kV)	240 s	352,3	12,8	1,8	328	26,3	1,32
napięćskojarzone (+9kV/0,5 kV)	240	351,2	12,5	1,93	322,6	27,6	1,30
napięcie skojarzone (+9 kV/4 kV)	240 s	357,6	18	1,43	334,3	33,8	0,71

#### 4. Podsumowanie

- Analiza wyników badań wskazuje na istniejące korelacje pomiędzy rodzajem napięcia i obrazem prądu termicznie stymulowanego (np.  $T_M$ ,  $I_M$ ,  $E_1$ ).
- Folia polietylenowa posiada zdolność gromadzenia ładunku elektrycznego przy udarach łączeniowych nakładanych na napięcie przemienne; narażanie napięciem stałym lub przemiennym pozwala obserwować prąd depolaryzacji zaledwie na poziomie pojedynczych pA.
- Folia polietylenotereftalanowa kumuluje ładunek elektryczny przy napięciu stałym lub skojarzonym; narażanie napięciem przemiennym pozwala obserwować prąd depolaryzacji na poziomie pojedynczych pA.

#### Literatura

- [1] Murata Y. Katakai S., Kanaoka M.: *Impulse Breakdown Superposed on ac Voltage in XLPE Cable Insulation*, IEEE Trans. on DEIS, 1996, Vol. 3, No. 3, pp. 361 - 365
- [2] Hartlein R. A., Harper V. S., Harry Ng.: *Effects of Voltage Surges on Extruded Dielectric Cable Life Project Update*, IEEE Trans. on Power Delivery, 1994, Vol.9, No. 2, pp. 611-619
- [3] Olesz M.: *Wpływ temperatury na rozwój drzewienia elektrycznego przy udarach łączeniowych nałożonych na napięcie przemienne*, VII Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia, Zakopane 21-23.10.1999 r.

- [4] **Aucland D. W., Kabir S. M. F., Varlow B. R.:** *Space-charge and Breakdown in Artificial Tree Channels*, 1992, VI Intern. Conf. on DMMA, pp. 197-200
- [5] **Fukuma M., Fukunaga K., Maeno T.:** *Space Charge Dynamics in LDPE Films Immediately Before Breakdown*, IEEE Trans. on DEI, 2001, Vol. 8, No. 2, pp. 304-306
- [6] **Zagórski A.:** *Oddziaływanie narażeń na folię polietylenotereftalanową a obrazy prądów termicznie stymulowanych*, VI Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia, Zakopane, 23-23 października 1997
- [7] **Christodoulides C.:** *Determination of activation energies by using the widths of peaks of thermoluminescence and thermally stimulated depolarisation currents*, J. Phys. D: Appl. Phys. 18 (1985), pp. 1501-1510

### THERMALLY STIMULATED CURRENTS OF POLYMERS FILMS SUBJECTED TO ELECTRICAL STRESS

The paper presents the influence of electric stresses on diagrams of thermally stimulated currents in polyethylene-terephthalate (PET) and low-density polyethylene (PE) films. The polymer films were aged in cylinder – plane arrangement by DC, AC or switching impulses superimposed on ac voltage with 200 ms time intervals. The influence of various kind of electric stresses on electret properties of polymer films, calculated from TSD diagrams, are discussed.