



Marian Michalczuk*

PRĄDY POLARYZACJI I PRZEWODNICTWA W LAMINATACH SZKŁO-EPOKSYDOWYCH

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań prądów polaryzacji i przewodnictwa w laminatach szkło-epoksydowych poddanych starzeniu napięciowo-termicznemu. Podano nowy sposób wyznaczania prądu przewodzenia, służący do obliczania rezystywności skrośnej dielektryków stałych. Przeprowadzono analizę zmian poszczególnych składowych prądu polaryzacji i przewodzenia w trakcie starzenia.

Słowa kluczowe: polaryzacja, przewodnictwo, laminaty szkło-epoksydowe

1. Wstęp

Prąd płynący przez dielektryk stały pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego jest sumą prądów polaryzacji i przewodzenia [4]:

$$i = i_p + i_u \quad (1)$$

gdzie: i_p oznacza prąd polaryzacji, a i_u — prąd przewodzenia.

Prąd polaryzacji, w najprostszym przypadku, można opisać jednoskładnikową funkcją wykładniczą typu $\exp(-t/T)$, w której t oznacza czas, a T — stałą czasową procesu polaryzacji. Gdy w dielektryku występują różne rodzaje polaryzacji, prąd polaryzacji zawiera wiele składowych eksponensjalnych, i wówczas jego przebieg można opisać funkcją:

$$i_p = I_0 \cdot t^{-M} \quad (2)$$

w której M oznacza wykładnik potęgi zależny od temperatury i właściwości dielektryku, a I_0 jest wartością stałą. W rzeczywistych dielektrykach stałych, posiadających

* Politechnika Szczecińska, Instytut Elektrotechniki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

skomplikowaną budowę i skład, np. materiały kompozytowe, funkcja aproksymacyjna prądu polaryzacji jest bardziej złożona. Ze względu na skomplikowane zjawiska polaryzacji wolnorelaksacyjnej w takich materiałach, czas zaniku prądu polaryzacji może być długi — od kilkudziesięciu minut do kilku godzin, lub nawet jeszcze dłużej.

Prąd przewodzenia i_u ma charakter omowy i związany jest z transportem ładunków. W dielektrykach, w głównej mierze, jest to przepływ jonów, których ilość zależy od zawartości zanieczyszczeń ulegających dysocjacji (tzw. zanieczyszczenia jonowe) lub wywołujących dysocjację, np. woda. Analogicznie jak w cieczach może występować zjawisko oczyszczania elektrycznego i rekombinacja jonów. Dodatkowo, w wysokich polach elektrycznych, może występować emisja elektronów z katody i przewodnictwo elektronowe. Wartość prądu przewodzenia maleje w czasie. Ponieważ prąd przewodzenia płynie jednocześnie z prądem polaryzacji, praktycznie niemożliwe jest pomierzenie każdego z nich osobno. Teoretycznie pomiar prądu przewodzenia jest możliwy po zaniku prądu polaryzacji.

W pracach dotyczących przewodnictwa cieczy [1, 2] obserwowano dwa różne procesy — jeden szybki, zachodzący w ciągu kilkudziesięciu minut, a drugi powolny zachodzący w ciągu kilkudziesięciu godzin. Również w dielektrykach stałych obserwowano dwa procesy przewodnictwa, którym odpowiadały różne energie aktywacji. Opis procesu zanikania prądu przewodnictwa dla polietylenów podany przez Fowlera [3] odpowiada zależności

$$i = \frac{i_0}{1 + (\alpha/kT)i_0(W - W_0)t} \quad (3)$$

gdzie: k oznacza stałą Boltzmana, T — temperaturę bezwzględną, i_0 — prąd początkowy, α — stałą, W_0 — poziom najniższej pułapki, W — poziomy innych pułapek.

Taki proces zmniejszania się przewodnictwa elektrycznego trwa kilkadziesiąt godzin. Po tym czasie prąd przewodzenia wykazuje fluktuacje wokół pewnego minimalnego poziomu.

Wyznaczenie prądu polaryzacji i przewodzenia jest możliwe po wprowadzeniu pewnych założeń upraszczających. Rozpatrując różne rodzaje polaryzacji można stwierdzić, że polaryzacja sprężysta jest procesem odwracalnym. Wobec tego przebieg prądu polaryzacji elektronowej i jonowej (atomowej) jest lustrzanym odbiciem prądu depolaryzacji. Przy polaryzacji relaksacyjnej tak dokładne zależności między tymi prądami prawdopodobnie nie występują. Przyczyną różnicy może być to, że na przebieg procesu depolaryzacji ma wpływ zanikające wewnętrzne pole elektryczne, natomiast podczas polaryzacji występuje sumaryczny wpływ narastającego pola wewnętrznego i stałego pola elektrycznego zewnętrznego; wpływ temperatury na oba procesy jest taki sam.

Godząc się na pewną niedokładność można wprowadzić założenie, że

$$i_p = -i_d \quad (4)$$

w którym i_d oznacza prąd depolaryzacji. Wówczas, na podstawie równania (1) i (2) można zapisać, że

$$i_u = i + i_d \quad (5)$$

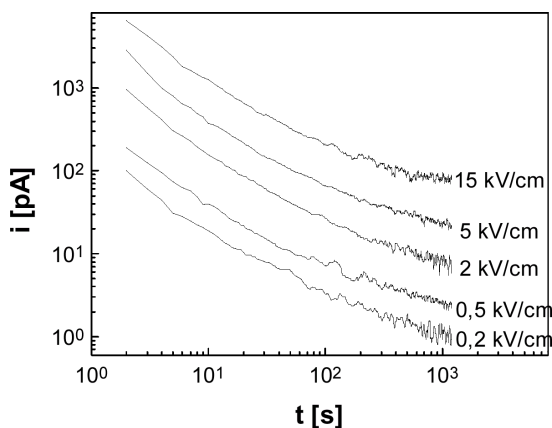
Wyznaczony w ten sposób prąd przewodzenia i_u może służyć do obliczania rezystywności skrośnej materiału. Taki sposób wyznaczania rezystywności skrośnej ma tę zaletę, że nie trzeba czekać aż do „ustalenia się” prądu i . W rzeczywistości prąd i nie ustala się.

2. Przedmiot i metoda badań

Przedmiotem badań były próbki laminatów szkło-epoksydowych o wymiarach 24×24 cm i grubości 2 mm produkowanych przez IZO-ERG Gliwice. Trójelektrodowy układ pomiarowy wykonano z przewodzącego lakieru EMV 35 w spray’u. Do pomiaru prądu stosowano pikoamperomierz z wejściem MOSFET-owym oraz komputerowy układ rejestrujący z częstotliwością próbkowania 0,2 Hz przy pomiarach trwających kilkadziesiąt godzin, lub 2 Hz przy pomiarach trwających kilkadziesiąt minut. Po pomiarach wstępnych próbki umieszczono w termostатовanej komorze w temperaturze 155°C i poddano je działaniu pola elektrycznego przemiennego 50 Hz o natężeniu 10 kV/cm. W trakcie starzenia wykonywano pomiary prądów polaryzacji i przewodzenia.

3. Wyniki badań

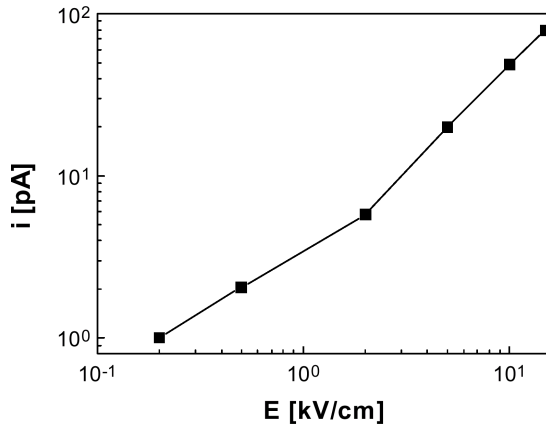
Na rysunku 1 przedstawiono wyniki wstępnych pomiarów prądu i w funkcji czasu, wykonane przy różnych natężeniach pola elektrycznego. Natomiast na rysunku 2 podane są wyniki pomiarów tego prądu w funkcji natężenia pola elektrycznego, uzyskane po czasie $t = 1200$ s od chwili włączenia napięcia. W badanym zakresie natężeń pola charakterystyka składa się z dwu prostych przecinających się, którym odpowiadają dwa różne procesy przewodzenia, o różnych energiach aktywacji.



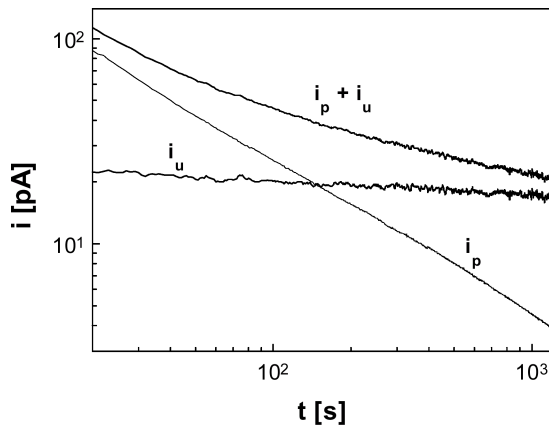
Rys. 1. Przebiegi prądu i , pomierzone przy różnych natężeniach pola elektrycznego

Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi prądów polaryzacji i_p i przewodzenia i_u wyznaczone na podstawie zależności (4) i (5). Widać, że względne zmiany prądu

przewodzenia i_u są kilkakrotnie mniejsze niż prądu i , który jest sumą $i_p + i_u$. Z badań wynika, że prąd przewodzenia powoli, ale systematycznie maleje. Świadczy to, że ilość jonów biorących udział w przewodzeniu zmniejsza się. Jony po dojściu do elektrody są neutralizowane. Bardzo powolne zmniejszanie się tego prądu jest wynikiem małej ruchliwości jonów w dielektryku stałym.

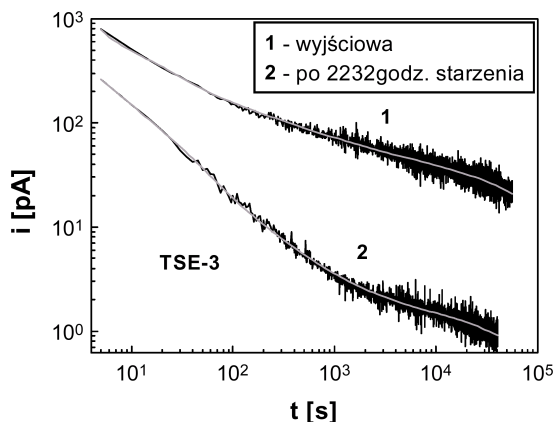


Rys. 2. Zależność prądu i od natężenia pola elektrycznego



Rys. 3. Przebiegi prądów polaryzacji i_p , przewodnictwa i_u oraz prądu $i = i_p + i_u$

Rysunek 4 przedstawia przykładowe przebiegi prądów i , przed i po starzeniu. Z analizy tych przebiegów wynika, że oprócz podstawowej składowej opisaną funkcją $I_0 \cdot t^{-M}$ zawierają one jeszcze trzy składowe eksponensjalne.



Rys. 4. Przebiegi prądów i przed i po starzeniu, kolor jasny — ich aproksymacja

Ostatecznie, funkcja aproksymacyjna prądu i wyraża się wzorem

$$i_{\text{fit}} = I_0 \cdot t^{-M} + \sum_{n=1}^{n=3} A_n \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_n}\right) \quad (6)$$

Pierwszy składnik funkcji aproksymacyjnej i_{fit} (6) jest typowy dla dielektryków stałych o złożonej budowie. Z badań wynika, że stała czasowa T_1 pierwszej składowej eksponencjalnej ma wartość $1 \div 3$ s, drugiej $T_2 = 12 \div 30$ s, a trzeciej $T_3 = 75 \div 88 \cdot 10^3$ s. Pierwsza i druga składowa eksponencjalna związane są odpowiednio z polaryzacją ładunku przestrzennego i polaryzacją powierzchni granicznych, natomiast trzecia składowa eksponencjalna związana jest z pewnym procesem przewodzenia, wywołanym transportem dużych jonów. Zestawienie parametrów funkcji aproksymacyjnej dla przebiegów z rysunku 4 podano w tabeli 1.

Początkowa wartość prądu I_0 w czasie starzenia nie ulega zmianie, natomiast współczynnik M dwukrotnie zwiększa swoją wartość. W pewnym sensie jego zmiany odpowiadają zmianom znanego współczynnika absorpcji R_{60}/R_{15} .

Tabela 1. Zestawienie parametrów funkcji aproksymacyjnej (6)

		wyjściowe	po 2232 h starzenia
I_0	[pA]	976	975
M		0,434	0,881
A_1	[pA]	4514	0,845
T_1	[s]	1,417	2,644
A_2	[pA]	196	27,68
T_2	[s]	15,87	26,85
A_3	[pA]	23,63	1,35
T_3	[s]	86465	79972

Kształt przebiegów prądu z rysunku 4 oraz analiza poszczególnych jego składowych pozwalają stwierdzić, że procesy polaryzacyjne w badanych materiałach trwają około 1000 s. Po tym okresie czasu zmiany prądu związane są z powolnymi zmianami różnych procesów przewodzenia. Po zaniku prądu trzeciej składowej A_3 , T_3 prąd przewodzenia płynący przez dielektryk wykazuje fluktuacje wokół pewnego minimalnego poziomu.

4. Podsumowanie

Procesy polaryzacyjne w laminatach szkło-epoksydowych trwają około 1000 s. Po tym okresie czasu zmiany prądu i związane są z subtelnymi zmianami różnych procesów przewodzenia, m.in. z zanikiem przewodzenia związanego z transportem dużych jonów. Proces ten można porównać do procesu oczyszczania elektrycznego występującego w dielektrykach ciekłych.

Nowy sposób wyznaczania prądu przewodzenia i_u (5) może z powodzeniem służyć do określania rezystywności dielektryków.

Literatura

- [1] **Adamczewski J.:** *Jonizacja i przewodnictwo ciekłych dielektryków*, PWN Warszawa 1965
- [2] **Gzowski O., Terlecki J.:** Acta Phys. Pol., 18, 191 1059
- [3] **Fowler J. F.:** Proc. Roy. Soc., 236, 464, 1956
- [4] **Michalczuk M.:** 4th UEES'99, St. Petersburg RUSSIA, June 21–24, 1999

POLARISATION AND CONDUCTION CURRENTS IN GLASS-EPOXY LAMINATES

The article presents the results of research on polarisation and conduction currents in glass-epoxy laminates exposed to AC field — thermal ageing process. The article describes a new method of determination of conduction current to be used for calculation of solid dielectric resistivity. There is also an analysis of changes of particular components of polarisation and conduction current presented in the article.