



Tadeusz Łaś*, Helena Słowikowska*, Stanisław J. Słowikowski**

WPŁYW CZĘSTOTLIWOŚCI NAPIĘCIA NA ZJAWISKA TOWARZYSZĄCE WYŁADOWANIOM NIEZUPEŁNYM W PRÓBACH STARZENIOWYCH ŻYWIC EPOKSYDOWYCH

Streszczenie: W układzie elektrod ostrze — dielektryk stały (żywica epoksydowa z wypełniaczem Al_2O_3) — płyta, badano wpływ częstotliwości napięcia na charakterystyki wyładowań niezupełnych (wnz) oraz równoważny czas próby przy różnych częstotliwościach i wartościach napięcia. Celem badań jest ocena możliwości zastosowania podwyższonej częstotliwości jako czynnika przyspieszającego próby odporności materiałów izolacyjnych stałych na działanie wnz w ośrodkach gazowych.

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, żywica epoksydowa, przyspieszone starzenie, częstotliwość napięcia, elektrody ostrze-płyta

1. Wstęp

Oszacowanie przewidywanego czasu życia układu izolacyjnego przeprowadza się w próbach przyspieszonego starzenia, w których zwiększa się intensywność głównych czynników powodujących starzenie w taki sposób, by skracając czas próby nie spowodować zmiany mechanizmów, które powodują degradację w normalnej eksploatacji. W przypadku rozdzielnic izolowanych SF_6 lub szynoprzewodów czynnikiem zagrażającym izolacji z żywic epoksydowych są wyładowania niezupełne (wnz). Czas próby można tu skrócić przez zmianę wartości napięcia i częstotliwości.

Ocena czasu życia uwarunkowanego wnz na podstawie badań przyspieszonych wymaga znalezienia zależności parametrów wnz od napięcia i częstotliwości dla okre-

* Instytut Elektrotechniki, Zakład Wysokich Napięć, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

** Inwar, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

ślonego układu elektrod i badanego materiału oraz określenia funkcji wiążącej czas życia z napięciem i częstotliwością.

Mimo dużej liczby publikacji dotyczących badań nad wpływem wnz na degradację dielektryków, informacje o wpływie częstotliwości na rozwój i parametry wnz są nieliczne i niewystarczające do zaproponowania warunków prób i ich wiarygodnej interpretacji. Większość z nich odnosi się do materiałów w postaci folii [1, 2], lub degradacji materiału występującej w innych układach izolacyjnych, np. drzewienia [3]. Brak również jednoznacznych poglądów, w jakim stopniu podwyższenie częstotliwości przyspiesza czas starzenia. Często przyjmowana jest proporcjonalna zależność równoważnego czasu starzenia od ilorazu częstotliwości próby — f , i częstotliwości sieciowej — f_0 (50 lub 60 Hz), tzn. że w wyrażeniu na współczynnik przyspieszenia próby „a”, określonym jako:

$$a = t_0/t = (f/f_0)^k \quad (1)$$

wykładnik $k = 1$. Wg [4] ładunek przenoszony przez wnz w jednym okresie napięcia maleje z częstotliwością, co oznacza, że $k < 1$. Potwierdzają to badania przeprowadzone na żywicy epoksydowej z wypełniaczem Al_2O_3 przy częstotliwościach od 60 do 800 Hz [5], na podstawie których można ocenić wartość $k = 0,6$ do 0,68. Proporcjonalność pomiędzy równoważnym czasem życia a stosunkiem częstotliwości stwierdzono w pracy [6], lecz ze znacznymi ograniczeniami związanymi z badanym materiałem i grubością próbki. Wg przepisów amerykańskich ASTM [7] dotyczących badań odporności na wyładowania powierzchniowe równoważny czas próby jest odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości jeżeli energia wydzielana w cyklu napięcia jest jednakowa; zwraca się również uwagę na odchylenia od proporcjonalności dla różnych materiałów i warunków prób (wpływ wilgotności).

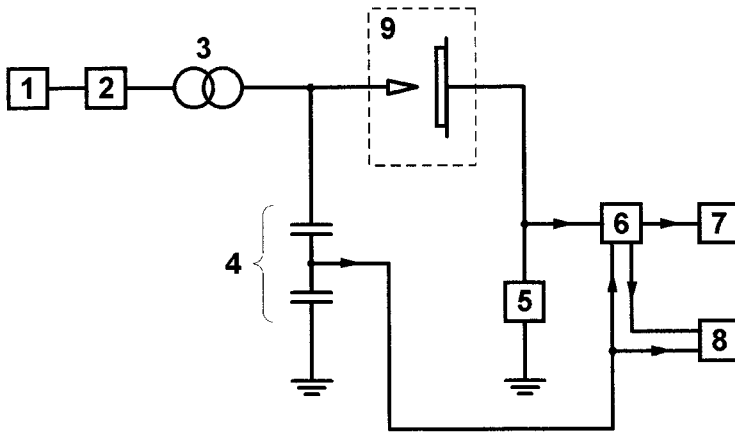
W referacie podano niektóre wyniki prac, prowadzonych w Zakładzie Wysokich Napięć Instytutu Elektrotechniki nad degradacją żywicy epoksydowej z wypełniaczem Al_2O_3 w ośrodkach gazowych pod wpływem wnz. Przedstawiono wyniki pomiarów, mających na celu określenie wyjściowych warunków napięciowych i częstotliwościowych w próbach przyspieszonego starzenia oraz niektóre wyniki tych prób. Na podstawie wyników badań dokonano oszacowania zależności równoważnego czasu próby od częstotliwości dla przyjętego w badaniach układu elektrod i materiału — żywicy epoksydowej z wypełniaczem Al_2O_3 .

2. Układ pomiarowy

Badania wykonywano w układzie elektrod ostrze-dielektryk-płyta. Elektrody ostrzowe wykonane były ze stali nierdzewnej o średnicy 1,5 mm, ze stożkiem o kącie wierzchołkowym 60° i promieniem krzywizny $r = 53 \mu m$. Do każdej próby starzeniowej używano nową elektrodę ostrzową.

Próby wykonywano przy częstotliwościach od 100 do 1000 Hz. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.

Transformator wysokiego napięcia zasilany był z wzmacniacza o mocy wyjściowej 100 W, maksymalnym napięciu wyjściowym 320 V i częstotliwości 20 Hz–20 kHz.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego. Oznaczenia: 1 – generator RC, 2 – wzmacniacz mocy, 3 – przekładnik napięciowy 20 kV, 4 – dzielnik napięcia 47p/492n, 5 – impedancja pomiarowa, 6 – detektor wnz Tettex 9126, 7 – PC, 8 – oscyloskop cyfrowy, 9 – elektrody ostrze-plate z badaną próbką

Wyładowania niezupełne mierzone były detektorem Tettex typ 9126 z impedancją pomiarową (typ 9223), kilowoltomierzem i interfejsem szeregowym RS 232 C, którym mierzone wartości przesyłane były do pamięci komputera rejestrującego. Sinusoida napięcia wyjściowego transformatora WN oraz impulsy wnz obserwowane były na ekranie oscyloskopu cyfrowego.

3. Pomiary

Jako podstawową wielkość, określającą intensywność wnz, przyjęto prąd średni wyładowań, zdefiniowany (np. wg IEC 270) zależnością:

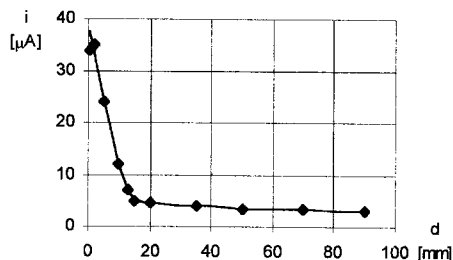
$$I = \frac{1}{T} [|q_1| + |q_2| + \dots + |q_n|] \quad (2)$$

Uznano bowiem, iż prąd średni, jako wielkość, związana z sumarycznym oddziaływaniem wszystkich impulsów wnz niezależnie od ich znaku i będąca miarą całkowitego ładunku wydzielonego podczas próby a pośrednio również energii, najlepiej określa zachodzące zjawiska i najlepiej nadaje się do dokonywania porównań pomiędzy próbami, wykonywanymi przy różnych wartościach napięcia i częstotliwości.

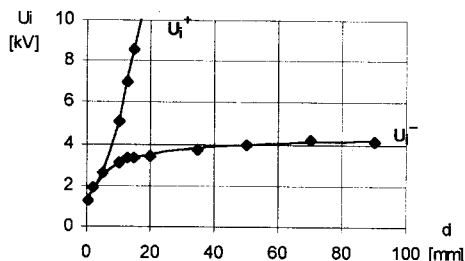
W długotrwałych próbach starzeniowych rejestrowano również oprócz prądu średniego bezwzględną wartość maksymalnego ładunku wnz, q , występującego w dodatniej lub ujemnej połówce sinusoidy napięcia. Komputerową rejestrację mierzonych wartości prowadzono w odstępach 15-minutowych z wyjątkiem 5-cio minutowego odstępu od pierwszego pomiaru na początku próby. W każdym cyklu rejestrowano 16-krotnie każdą z mierzonych wielkości I , q_m , dla uzyskania wiarygodnych wartości średnich i średnich odchyłeń kwadratowych. Z wykresu prądu średniego I w czasie prób długotrwałych obliczono wartość sumarycznego ładunku wnz wydzielanego

w czasie trwania próby, całkując powierzchnię pod krzywą $I = f(t)$. Pomiaru wykonywano w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $55 \pm 5\%$.

Dla określenia optymalnej odległości elektrody ostrzowej od próbki, wykonano pomiary prądu średniego wnz w powietrzu przy częstotliwości 600 Hz i napięciu 7 kV, zmieniając odległość od 0,5 mm do 90 mm. Dla tego zakresu odległości zmierzono też napięcie zapłonu impulsów wnz o polaryzacji ujemnej U_i^- i dodatniej U_i^+ . Wyniki przedstawiono na rys. 2 i 3.



Rys. 2. Prąd średni wnz w funkcji odległości elektrody od próbki; $f = 600$ Hz, $U = 7$ kV. Dla $d \geq 15$ mm, $q^+ = 0$; dla $d < 15$ mm, $q^+ > 0$



Rys. 3. Napięcie zapłonu wnz ujemnej i dodatniej polaryzacji w zakresie napięć do 10 kV $f = 600$ Hz

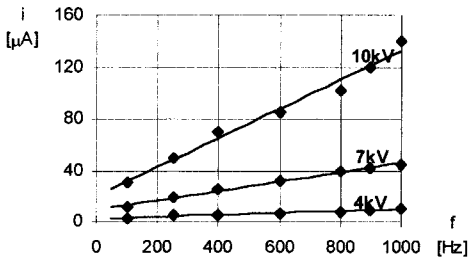
Z rysunków tych widać, iż dla odstępów powyżej ok. 13 mm zarówno prąd średni, jak i U_i^- zmieniają się nieznacznie. Powyżej tego odstępku na ekranie oscyloskopu obserwowano typowe wyładowania ulotowe, jak dla ostrza samotnego. Przy zmniejszeniu odstępku poniżej 13 mm zaczyna się pojawiać wpływ powierzchni dielektryka i gromadzonych na niej ładunków prąd średni wnz szybko rośnie, napięcie zapłonu U_i^- maleje, pojawiają się strimery dodatnie, zmienia się faza impulsów. Z tego względu dalsze pomiary przeprowadzono przy odstępach, w których zachodziło silne oddziaływanie wnz z powierzchnią dielektryka, a mianowicie 0,5, 2 i 5 mm.

Dla wyznaczenia początkowych warunków prób starzeniowych, tj. intensywności wnz w chwili rozpoczęcia próby, przeprowadzono pomiary średniego prądu wnz przy częstotliwościach od 100 do 1000 Hz, dla odległości 0,5 mm, 2 mm i 5 mm, przy napięciach 4, 7 i 10 kV. Odczyt prądu wykonywano bezpośrednio po podniesieniu napięcia do założonej wartości. Wyniki pomiarów dla $d = 0,5$ mm podano na rysunkach 4 i 5.

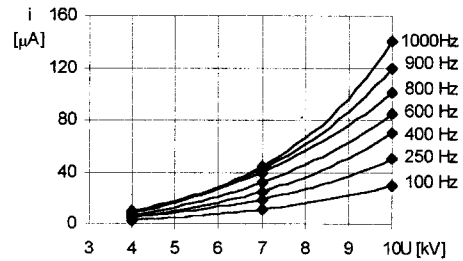
Próby starzeniowe przeprowadzono przy wstępnym założeniu odwrotnej proporcjonalności równoważnego czasu starzenia do częstotliwości, tj. $k = 1$. Czas prób zawierał się w zakresie od ok. 1 godz. przy 1000 Hz do 22 godz. przy 50 Hz. Na rysunku 6 pokazano przykładowe protokoły z prób starzeniowych przy $U = 4$ kV, $d = 0,5$ mm i częstotliwościach 250 Hz i 750 Hz.

4. Omówienie wyników

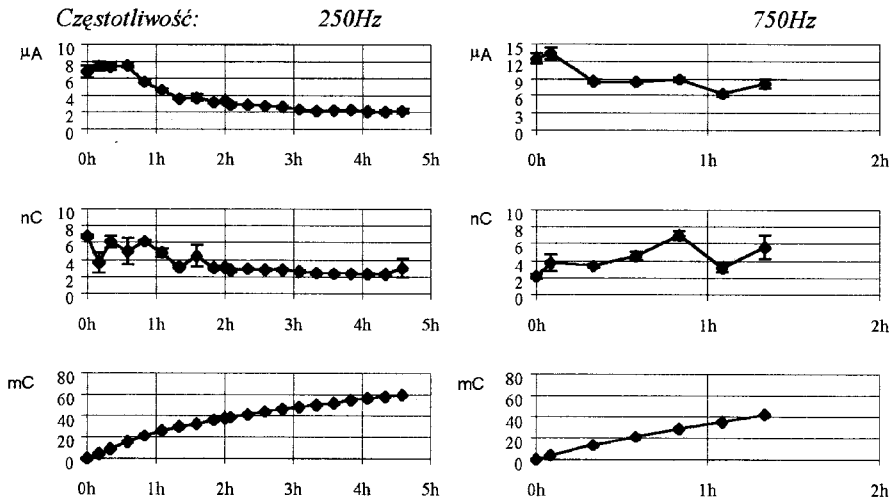
Przeprowadzone próby pozwoliły na weryfikację wstępnego założenia proporcjonalności równoważnego czasu próby starzeniowej do odwrotności częstotliwości na-



Rys. 4. Zależność prądu średniego wnz od częstotliwości; $d = 0,5 \text{ mm}$



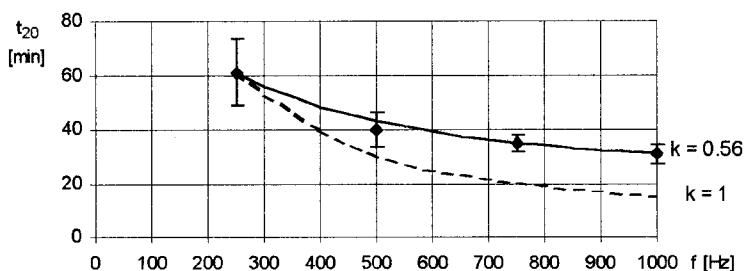
Rys. 5. Zależność prądu średniego wnz od napięcia; $d = 0,5 \text{ mm}$



Rys. 6. Przebieg prób starzeniowych żywicy epoksydowej z wypełniaczem Al_2O_3 , $U = 4 \text{ kV}$, $d = 0,5 \text{ mm}$, $f = 250 \text{ Hz}$ i 750 Hz

pięcia. Na rysunku 7 przedstawiono zależność czasu t , po jakim sumaryczny ładunek wnz $Q = 20 \text{ mC}$ został wydzielony w czasie próby przyspieszonego starzenia, przeprowadzonej przy napięciu 4 kV , odstępzie elektrody ostrzowej $0,5 \text{ mm}$ i częstotliwościach $250, 500, 750$ i 1000 Hz . Z przebiegu obliczyć można, dla warunku $Q = \text{const.}$, wartość współczynnika $k = 0,56$. Oznacza to, iż wstępne założenie proporcjonalności nie jest prawdziwe dla przyjętych w badaniach warunków prób, tj. układu elektrod, wilgotności i temperatur. Zgadza się to dość dobrze z wynikami badań [5], prowadzonych w takim samym układzie elektrod, dla których można obliczyć współczynnik k , równy $0,6$ do $0,68$. W innych seriach badań starzeniowych, przeprowadzonych przez autorów przy wyższych wartościach napięcia i odstępnie elektrody, lecz w tym samym systemie elektrod i warunkach atmosferycznych, znaleziono wartość $k = 0,5$ do $0,7$.

Obliczono również współczynnik k z wyników pomiarów warunków wyjściowych dla $U = 7$ i 10 kV i $d = 0,5, 2$ i 5 mm opierając się na założeniu: $Q = i \cdot t = \text{const.}$. Otrzymano wartości w granicach $0,57$ do $0,72$. Dobra zgodność otrzymanych wartości



Rys. 7. Zależność czasu t_{20} , po jakim ładunek sumaryczny wnz $Q_t = 20 \text{ mC}$ został wydzielony w czasie próby starzenia, od częstotliwości; $U = 4 \text{ kV}$, $d = 0,5 \text{ mm}$. Linia przerywana pokazuje zależność t od f dla zależności odwrotnie proporcjonalnej ($k = 1$)

potwierdza słuszność założenia warunku stałej wartości ładunku sumarycznego wnz w próbach przyspieszonego starzenia.

Rozrzut wartości współczynnika k otrzymanych w różnych badaniach lecz dla tego samego systemu elektrod jest na tyle mały, by można było na tej podstawie oszacować wstępnie równoważny czas próby. Wydaje się, iż szacowania tego można dokonać już na podstawie znanych wyjściowych zależności prądu średniego wnz od częstotliwości i napięcia, przyjmując założenie $Q = \text{const.}$, tzn. $i_0 \cdot t_0 = i_f \cdot t_f$ i mając wyniki próby starzenia, przeprowadzonej przy dowolnej częstotliwości. Można również w oparciu o warunek $Q = \text{const.}$ określić przybliżone warunki próby, prowadzonej przy innej wartości napięcia, o ile zachowany zostanie ten sam mechanizm oddziaływania wnz na materiał.

Relacje pomiędzy czasem równoważnym próby a częstotliwością zależą od warunków prób, a więc m.in. od przyjętego systemu elektrod. Można się spodziewać, iż w układzie elektrod, w których wnz występują w zamkniętej objętości, warunki ich występowania będą zależą od gazowych produktów rozkładu i temperatury, a więc mogą się zmieniać bardzo znacznie zależnie od warunków próby i czasu. Badania w „otwartym” systemie elektrod o małej pojemności (ostrze–płyta) daje większe możliwości uzyskania stabilnych i powtarzalnych wyników ze względu na utrzymanie mało zmieniających się warunków zewnętrznych w czasie próby, niezależnie od intensywności wnz i powstających produktów rozkładu.

5. Podsumowanie

1. Dla układu elektrod „otwartego” ostrze – dielektryk – płyta wyznaczono optymalny zakres odstępów elektrody ostryjowej od próbki, w którym oddziaływanie wnz z powierzchnią badanego materiału jest duże a charakter tego oddziaływania jest podobny.
2. Dla tego układu elektrod znaleziono wartości liczbowe współczynnika, określającego zależność pomiędzy równoważnymi czasami prób starzeniowych a częstotliwością napięcia; wartość tego współczynnika wynosi $k \cong 0,5 \div 0,7$.

3. Dość dobra zgodność wartości współczynnika k , określona z prób starzeniowych oraz z pomiarów wstępnych wnz dla czasu $t \approx 0$, przy założeniu stałej wartości ładunku sumarycznego jako kryterium równoważności czasu prób, pozwala na przyjęcie tezy, iż wstępne oszacowanie równoważnego czasu próby starzeniowej przyspieszonej podwyższoną częstotliwością, jest możliwe na podstawie znajomości „wyjściowych” charakterystyk napięciowo-częstotliwościowych określonego wentylowanego systemu elektrod i materiału poddawanego badaniu. Obserwacje te będzie można zweryfikować, przeprowadzając próby innych materiałów, w różnych atmosferach oraz wilgotnościach.

Literatura

- [1] **Ahmed F. S., Ahmed A. S.:** *Pr... of Solid Insulating Films by Partial Discharge Using Sinusoidal and Pulse Voltages*. IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-13, No 5, 1978, pp. 337–342
- [2] **Rodehed C., Gustafsson A., Gedde U. W.:** *Electrical Strenght and Chemical Surface Analysis of Pdypropylene ofter Exposure to External Partial Discharges*. IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 25, No 6, 1990, pp. 1066–1076
- [3] **Suwarno, Susudzi Y., Mizutani T.:** *Effects of Frequency and Applied Voltage on Electrical Treeing-Induced Discharges*. Electrical Engineering in Japan, Vol. 118, No 3, 1997, pp. 1–12
- [4] **Bartnikes R.:** *Nature of Partial Discharges and their Measurement*. 1987 Annual Report, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomana. IEEE, NBS, Gaithersburg, USA, 1987
- [5] **Von Brunt R. J., von Glahn P., Łaś T.:** *Nonstationary behavior of partial discharge during discharge indused ageing of dielectrics*. IEE Proc.-Sci. Mees. Technol., Vol. 142, No 1, 1995, pp. 37–45
- [6] **Ikeda Y., Tanaka T.:** *Frequency Accelation Characteristics In Internal Discharge Eudurance Tests By A Glass-Covered Electrode System*. IEEE Trans.Electr. Insul., Vol. EI-17, No 1, 1982, pp. 64–69
- [7] **ASTM S2275-89.** *Standars Test Method for Voltage Endurance of Solid Electrical Insulating Materials Subjected to Partial Discharge (Corona) on the Surface*

EFFECT OF VOLTAGE FREQUENCY ON THE PHENOMENA ACCOMPANYING PARTIAL DISCHARGES IN AGEING TESTS OF EPOXY RESINS

The effect of voltage frequency on PD characteristics and the equivalent test time was investigated at various voltage frequencies and values in point-dielectric (epoxy resin with Al_2O_3 filler) — plane electrode arrangement. The purpose of investigating was assessment of the possibility to use elevated frequencies as a resistance of accelerating tests of the resistance of solid insulating materials to PD action in gaseous media.