

Janusz Dubicki, Ryszard Sachajko

ZASTOSOWANIE MODELU DEGRADACJI SUMARYCZNEJ DO WYZNACZENIA
NAPIĘCIOWYCH KRZYWYCH ŻYCIA STAŁYCH DIELEKTRYKÓW ORGANICZNYCH

1. Wprowadzenie

Zachowanie się materiału lub układu izolacyjnego w czasie, pod wpływem pola elektrycznego, może być opisane tzw. napięciową krzywą życia, przedstawiającą zależność czasów do przebicia od natężenia pola. Każdy punkt na takiej krzywej przedstawia czas życia izolacji, na przyjętym poziomie prawdopodobieństwa przebicia w warunkach, kiedy do izolacji zostaje przyłożone pole elektryczne o stałym w czasie natężeniu [1].

Ponieważ brak jest podstaw teoretycznych do przyjęcia takiej, a nie innej postaci równania napięciowej krzywej życia, dobiera się ją z konieczności w oparciu o wyniki doświadczeń. Rozwinięte jednak w ostatnich latach metody statystyczne w zastosowaniu do badań niezawodności urządzeń, dają quasi-teoretyczne podstawy do przyjęcia zależności

$$E^N t = C \quad (1)$$

gdzie N, C - const ,

jako najlepszego modelu matematycznego do opisu zjawisk starzeniowych [1,2,3].

Czas życia izolacji dla roboczego natężenia pola jest otrzymywany przez ekstrapolację równania (1) wyznaczonego dla wyższych natężeń i

Mgr inż. Janusz Dubicki, mgr inż. Ryszard Sachajko - Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej

stosunkowo krótkich czasów do przebiccia. Dopuszczalność takiej ekstrapolacji jest jednak wątpliwa, gdyż zależność między natężeniem pola i czasem życia może się zmieniać w przypadku zmniejszenia się natężenia pola.

Zmiany intensywności wyładowań niezupełnych prowadzą również do zmian mechanizmów starzenia stałych dielektryków organicznych [4,5], a co za tym idzie - zmiany postaci napięciowej krzywej życia (1) tych dielektryków. W tych przypadkach ekstrapolacja czasów życia wyznaczonych w zakresie wyższych natężeń w zakres niższych jest niedopuszczalna.

Z drugiej strony stosowanie stosunkowo prostych modeli przyspieszonych prób starzeniowych, jak np. [6], nie prowadzi do uchwycenia zmian mechanizmów starzenia izolacji polimerowych.

Istotne jest więc zastosowanie do badań takiego modelu przyspieszonych prób starzeniowych, który stosunkowo szybko wykazywałby zmiany kształtu napięciowej krzywej życia /zmiany mechanizmu starzenia/ oraz za którego pomocą ekstrapolacja w zakres natężeń roboczych posiadałaby większą wiarygodność, niż to ma miejsce w przypadku modelu 1, przy $N, C - \text{const.}$

2. Połączenie modelu degradacji sumarycznej z klasycznym modelem napięciowej krzywej życia

Postawione powyżej zadanie wymagało przyjęcia określonego modelu starzenia. Wykorzystano model oparty o pojęcie tzw. degradacji sumarycznej [2], opisujący proces dojścia materiału do momentu utraty właściwości izolacyjnych według kryterium wytrzymałości dielektrycznej. Postać końcowa tego modelu jest wyrażona równaniem

$$g_F = \sqrt[N+1]{1 - g^N (N+1) \frac{\lambda}{E_0} t} \quad 2$$

przy czym

$$g_F = \frac{E_F}{E_0} ; g = \frac{E}{E_0}$$

- E_0 - wytrzymałość dielektryczna materiału nie starzonego,
 E_F - wytrzymałość dielektryczna materiału po czasie starzenia t ,
 E - natężenie pola przyłożonego do materiału w czasie próby starzeniowej,
 λ - liniowa szybkość wzrostu natężenia pola w próbach wytrzymałości dielektrycznej,
 N - wykładnik potęgowy krzywej życia (1) .

Model ten umożliwia wyznaczenie wykładnika potęgowego krzywej życia materiału w czasie znacznie krótszym, niż to ma miejsce w przypadku klasycznych prób krzywej życia (1). Poza tym za pomocą modelu degradacji sumarycznej jest możliwe empiryczne wyznaczenie zmian wykładnika potęgowego N opisującego mechanizm zachodzących w materiale procesów, przy ogólnym założeniu zależności tych zmian od natężenia pola.

Funkcje $N(E)$ mogą mieć z założenia różną postać dla różnych materiałów i dla tego samego materiału różną postać, w zależności od warunków pracy. Czynnikiem, który w znacznym zakresie może wpływać na postać funkcji $N(E)$, są wyładowania niezupełne. Prawdopodobnie w zależności od intensywności wyładowań, ich umiejscowienia w izolacji, środowiska gazowego itp. postaci funkcji $N(E)$ będą różne.

W tych przypadkach równanie (1) przyjmie postać:

$$E^{N(E)} t = C(E) \quad (3)$$

Jakkolwiek wyznaczenie zależności $N(E)$ jest możliwe za pomocą modelu degradacji sumarycznej, to wyznaczenie zależności $C(E)$ jest możliwe jedynie za pomocą modelu klasycznego (1) . W celu więc wyznaczenia szczegółowej postaci równania (3) dla badanego materiału połączono dwa różne modele starzeniowe, traktowane w literaturze zawsze oddzielnie.

3. Metody obliczeń

Jako wartości wytrzymałości dielektrycznej E_0 i E_F (2) oraz czasów życia (1) przyjęto mediany z rozkładu Weibulla, którego parametry estymowano metodą największej wiarygodności [7]. Na rysunkach podano przedziały ufności dla median na poziomie ufności 0,90.

Wartości wykładnika potęgowego krzywej życia (2) obliczano metodą kolejnych przybliżeń.

Równania funkcji $N(E)$ i $C(E)$ otrzymano za pomocą regresji wielomianowej dla współczynnika korelacji krzywoliniowej 0,99.

4. Układy elektrod. Próbki. Metody badań

Badania przeprowadzono w dwóch środowiskach: powietrznym i oleju transformatorowego.

Środowisko powietrzne wybrano w celu szybkiej weryfikacji modelu, ponieważ polimery poddane działaniu wyładowań niezupełnych w powietrzu szybko ulegają procesowi degradacji. W tym przypadku czasy do przebiecia są stosunkowo krótkie, a wykładnik potęgowy krzywej życia posiada stosunkowo niską wartość.

Do badań w środowisku powietrznym użyto folii z polietylenu (PE) wysokociśnieniowego o grubości 100 μm . Warstwę folii, naprężaną pierścieniem izolacyjnym, umieszczano w dwóch identycznych płaskich układach elektrod o średnicy 120 mm każda, wykonanych ze stali nierdzewnej. Wyładowania niezupełne o kontrolowanej intensywności wymuszano w szczelinie powietrznej o grubości 1 mm między elektrodą wysokonapięciową i próbką.

Próby wytrzymałości dielektrycznej przeprowadzano w oleju, w celu wyeliminowania wyładowań niezupełnych. Próby te wykonywano przy użyciu elektrody o średnicy 39 mm, wykonanej ze stali nierdzewnej. Wytrzymałość dielektryczną wyznaczano przebijając każdą próbkę w kilku punktach, w centralnym obszarze działania wyładowań niezupełnych. Wyznaczona tą drogą wytrzymałość dielektryczna jest w pewnych granicach nie-

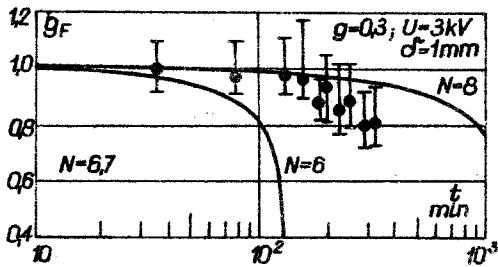
zależna od obecności słabych punktów w materiale i stąd niezależna od jakości technologii produkcji materiału.

Liczność próbek dla każdej próby wytrzymałości dielektrycznej wynosiła 10 - 13, a dla próby czasów do przebicia - 13 - 15.

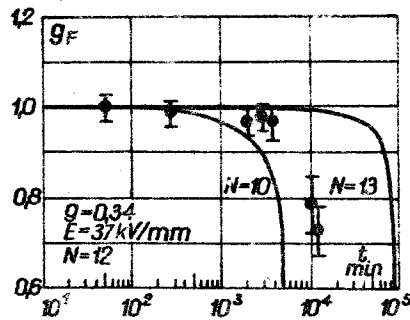
Do badań w oleju transformatorowym użyto tego samego typu folii polietylenowej jak dla badań w powietrzu oraz folii o grubości $80 \mu\text{m}$, wykonanej z politereftalanu etylenu /PETF/. Badania wytrzymałości dielektrycznej oraz badania czasów do przebicia przeprowadzono w płaskich układach elektrod o średnicy 39 mm wykonanych ze stali nierdzewnej, zanurzonych w oleju. Liczność próbek dla folii PE wynosiła 28, a dla PETF - 16 dla każdej próby.

5. Wyniki pomiarów

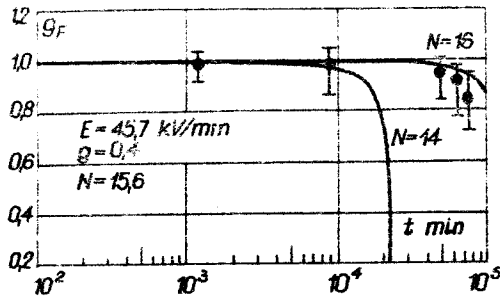
Na rysunkach 1 - 3 przedstawiono przykładowe przebiegi wytrzymałości dielektrycznej g_f w funkcji czasu starzenia dla różnych wartości natężenia pola g . Podano także obliczone wartości wykładnika potęgowej krzywej życia N oraz przebiegi teoretyczne wyznaczone za pomocą modelu degradacji sumarycznej (2) przy założonych wartościach N .



Rys. 1. Przebieg wytrzymałości g_f w funkcji czasu starzenia dla folii PE $100 \mu\text{m}$ przy natężeniu $g = 0,3$ i grubości szczeliny powietrznej $\delta = 1 \text{ mm}$



Rys. 2. Przebieg wytrzymałości g_f w funkcji czasu starzenia dla folii PETF $80 \mu\text{m}$ zanurzonej w oleju przy natężeniu $g = 0,34$



Rys.3. Przebieg wytrzymałości G_F w funkcji czasu starzenia dla folii PE 100 μm zanurzonej w oleju przy natężeniu $g = 0,4$

Dla folii PE w środowisku powietrznym, poddanej działaniu intensywnych wyładowań niezupełnych, wytrzymałość dielektryczna szybko obniża się z czasem starzenia i wykładnik potęgowy krzywej życia jest stosunkowo niski w całym zakresie przyłożonych napięć, przy których występują wyładowania niezupełne. Natomiast dla folii PE i PETF zanurzonych w oleju obniżanie się wytrzymałości z czasem starzenia jest znacznie wolniejsze - wykładniki potęgowe są znacznie wyższe niż w środowisku powietrznym.

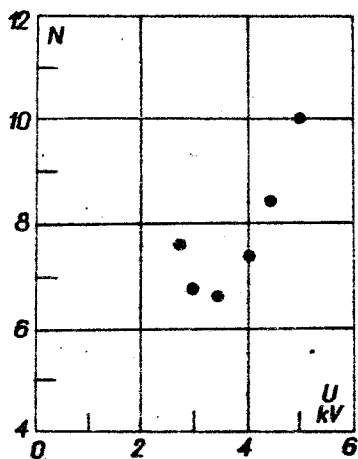
Istotne jest, że maksymalny ładunek pozorny wyładowań niezupełnych dla folii PE w powietrzu dla wszystkich prób zawierał się w granicach 90 - 2000 nC, podczas gdy dla folii PE i PETF zanurzonych w oleju nie zarejestrowano wyładowań niezupełnych przy czułości układu pomiarowego 3 pC w całym zakresie przeprowadzonych badań.

Na rysunku 4 przedstawiono zmiany wykładnika potęgowego N obliczonego z równania (2) dla folii PE w środowisku powietrznym dla stosowanych napięć. Przebieg ten posiada charakter paraboliczny: wykładnik potęgowy ma większą wartość dla napięć wyższych i niższych oraz mniejszą - dla napięć średnich. Taki przebieg wykładnika potęgowego pociąga za sobą podwójne zagięcie krzywej życia.

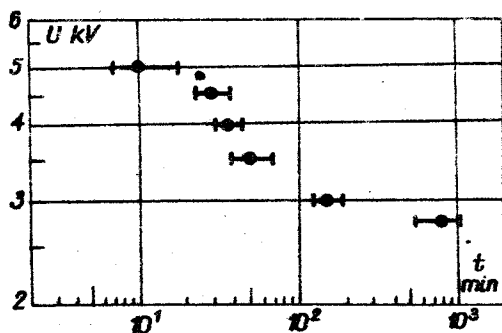
Istotnie krzywa życia wyznaczona metodą klasyczną (1) /rys.5/ potwierdza takie zmiany wykładnika potęgowego - posiada on wartość wyższą w pierwszej i trzeciej części krzywej, a niższą - w drugiej części.

Na podstawie przeprowadzonych badań folii PE w środowisku powietrznym

nym wydaje się, że wykładnik potęgowy krzywej życia, wyznaczony za pomocą modelu degradacji sumarycznej, dobrze oddaje zmiany mechanizmu starzenia zdeterminowane klasyczną krzywą życia.



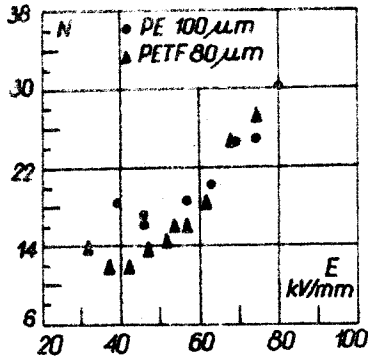
Rys.4. Zmiany wykładnika potęgowego N krzywej życia dla folii PE 100 μm w funkcji przyłożonego napięcia przy grubości szczeliny powietrznej $\delta = 1 \text{ mm}$



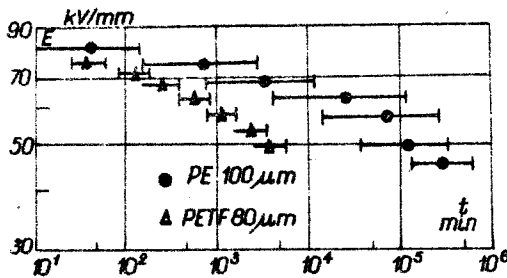
Rys.5. Krzywa życia dla folii PE 100 μm przy grubości szczeliny powietrznej $\delta = 1 \text{ mm}$

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi wykładnika potęgowego w funkcji natężenia pola dla folii PE i PETF zanurzonych w oleju. Przebiegi te posiadają podobny charakter jak na rysunku 4, wykładniki potęgowe są jednak większe, przy czym dla PE są one większe w całym zakresie przykładanych natężeń niż dla PETF, co świadczy o wolniejszym przebiegu procesów starzeniowych w PE, a więc dłuższych czasach życia.

W przypadku środowiska olejowego, podobnie jak w przypadku powietrznego jest spodziewane podwójne zagięcie krzywej życia.



Rys. 6. Zmiany wykładnika potęgowego N krzywych życia dla folii PE 100 μm i PETF 80 μm w funkcji przyłożonego natężenia pola



Rys. 7. Krzywe życia dla folii PE 100 μm i PETF 80 μm zanurzonych w oleju

Wielomiesięczne badania za pomocą metody klasycznej potwierdziły pierwsze zagięcie dla folii PE i PETF w oleju /rysunek 7/. Drugie zagięcia krzywych życia według rysunku 6 wystąpiłyby przy niższych natężeniach pola niż przykładowych w badaniach metodą klasyczną.

Szczególne postaci równania (3) zostały wyznaczone metodą analityczną przedstawioną w p.3 - jak się wydaje - dobrze aproksymują empiryczne krzywe życia. W tym przypadku ekstrapolacja czasów życia w zakres niższych natężeń nosi cechy większej wiarygodności niż ekstrapolacja za pomocą linii prostej z zakresu stosunkowo wysokich natężeń i krótkich czasów życia.

Interesujące jest, że teoretyczna krzywa życia (3) dla PE i PETF zanurzonych w oleju posiada podobny kształt do empirycznej krzywej życia dla PE w środowisku powietrznym /rys.5/ w przypadku działania intensywnych wyładowań niezupełnych. Fakt ten mógłby sugerować, że procesy degradacji zachodzące w układzie PE, PETF - olej mają bezpośredni

związek z wyładowaniami niezupełnymi o bardzo małej intensywności, jak już wcześniej wspomniano, mniejszej od 3 pC w całym zakresie przyłożonych napięć.

6. Uwagi końcowe

Przedstawiono wyniki badań zmian wytrzymałości dielektrycznej z czasem starzenia oraz czasów do przebicia dla folii PE i PETF w środowisku powietrznym i oleju transformatorowego. Zanotowano duże zmiany wytrzymałości dielektrycznej z czasem starzenia dla folii PE poddanej działaniu wyładowań niezupełnych o dużej intensywności oraz małe zmiany wytrzymałości dla folii PE i PETF zanurzonych w oleju.

Wskazano na możliwość oszacowania za pomocą modelu degradacji sumarycznej wielkości wykładnika potęgowego krzywej życia oraz jego zmian ze zmianą napięcia pola dla badanych materiałów. Analogiczne zmiany wykładnika potęgowego zostały potwierdzone przez krzywe życia badanych materiałów. Kształt krzywych życia, jak się wydaje, ma bezpośredni związek z intensywnością wyładowań niezupełnych, również w przypadku, gdy ich poziom jest niższy od 3 pC.

Zaproponowano połączenie modelu degradacji sumarycznej z modelem klasycznym krzywej życia, w celu zwiększenia wiarygodności ekstrapolacji w zakresie niższych napięć i dłuższych czasów życia.

W przypadku weryfikacji zaproponowanego modelu dla innych materiałów i innych środowisk zewnętrznych prawdopodobnie możliwe byłoby zastosowanie go w celu doboru naprężeń roboczych dla izolacji wykonanej ze stałego dielektryka organicznego za pomocą krzywej życia na niskim poziomie prawdopodobieństwa przebicia.

LITERATURA

1. Occhini E.,Pirelli S.: IEEE Trans.Power App.Syst.Vol.PAS-90,No.6, 1971, pp. 2671-2681.
2. Simoni L.: IEEE Trans. on Electr.Insul.,Vol. EI-8, No.3, 1973, pp. 76 - 86.
3. Nelson W.B.: General Electric Research & Development Center TIS, Report No. 71 - C - 011.
4. Mitsui H. i inni: Electr.Eng.Jap. vol. 90:206, 1972.
5. Lacoste R.: Mater.Compos.Aujourd'heri Demain: Mater.Nouv Ind. Tradit,C. - R. Congr. Int. p.253, 1971.
6. Endicott H.S. i inni: IEEE on Comp.Parts, March 1964, pp.34 - 41.
7. Ravenis L.J.: Electro-Technology, March 1964, pp. 46 - 54.