

Eugeniusz Wasilenko¹

O KRZYWEJ ŻYCIA POLIMEROWEJ IZOLACJI ELEKTRYCZNEJ

Streszczenie: Artykuł przedstawia nowe spojrzenie na krzywą życia izolacji polimerowej i związane z tym wnioski dotyczące modelowania i weryfikacji wyników badań przyspieszonego starzenia. Autor postuluje wykorzystanie temperatury zeszklenia polimeru jako integralnego parametru w procesie weryfikowania wyników. Krytyka modeli „hybrydowych” krzywej życia na rzecz uniwersalnego modelu wykładniczego. Istnieją procedury odtwarzające właściwe wyniki otrzymane z błędnych badań.

Słowa kluczowe: modelowanie krzywej życia, weryfikacja wyników badań starzeniowych, temperatura zeszklenia polimerów.

1. Wstęp

Zależność analityczna czasu t pracy układu izolacyjnego w funkcji długotrwałe doprowadzonego napięcia roboczego U_r , temperatury U_r , oraz ewentualnie innych narażeń N_i działających trwale lub okresowo, nazywa się krzywą życia:

$$t = f(U_r, T_r, N_i) \quad (1)$$

Obiektem badań są najczęściej modele fizyczne, symulujące geometrię rzeczywistego układu izolacyjnego, w skali umożliwiającej znaczne przyspieszenie badań i obniżenie ich kosztów. Tradycyjnym kryterium życia izolacji jest czas t_b do przebicia elektrycznego licznych próbek modelu fizycznego, otrzymany dla określonego poziomu napięcia U_i , (lub naprężenia E_i) i temperatury T_i . Przebiecie wyklucza próbkę z dalszych badań, ale pozwala na przeprowadzenie dodatkowych badań zmian morfologicznych okolic miejsca przebicia.

Kryterium przebicia można zastąpić innym, nieniszczącym, na przykład $tg\delta$, i_{up1} , wnz , itp., które oferują ciągłą rejestrację postępów degradacji, również do przebicia. Takie kryteria wychodzą naprzeciw pojawiającej się ostatnio tendencji tzw. monitorowania pracy urządzeń elektroenergetycznych.

Końcowym celem badań starzeniowych jest zależność analityczna typu (1), której parametry korelacyjne umożliwiają nie tylko porównanie własności różnych materiałów

¹ Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, 80-952 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12

izolacyjnych, ale po transformacji geometrycznej pozwolą na transformację czasową, do obiektów rzeczywistych.

O ważności krzywej życia izolacji dla oceny eksploatacyjnej i projektowania układów izolacyjnych wypowiedzieli się dwaj wybitni specjaliści w zakresie badań izolacji – V. M. Montsinger, który w 1935 roku napisał: „nie było możliwe opracowanie ogólnego równania dla napięcia przebicia w funkcji czasu, obejmującego cały przebieg krzywej i jest bardzo wątpliwe czy równanie takie może być otrzymane” [1], oraz prawie 50 lat później T. W. Dakin: „z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że nie ma właściwej, opartej na rozsądnych podstawach fizykalnych, ogólnie przyjętej zależności matematycznej między czasem przebicia izolacji i doprowadzonym napięciem [2].

Powyższe wyzwanie jest wciąż aktualne, mimo licznych prób i różnych podejść do rozwiązania problemu, mimo stosowania coraz doskonalszych metod i narzędzi badawczych i nagromadzenia imponującego materiału doświadczalnego, który od kilku lat dojrzewa do rzetelnej oceny.

Aktualną sytuację w 1996 r. skomentował lapidarnie zespół autorski J. P. Crinea: „istnieje względnie duża liczba modeli i teorii (ponad 200), ale żadne, z kilku najczęściej prezentowanych, nie pozwala na wiarygodne określenie czasu życia izolacji” [3].

2. W poszukiwaniu kryteriów wiarygodności modelu

Do aproksymacji wyników badań starzeniowych stosuje się od dziesięcioleci proste modele analityczne, traktowane jako „empiryczne” [4], w postaci funkcji potęgowej:

$$t = NE^{-n} \quad (2)$$

lub wykładniczej:

$$t = B \exp(-bE) \quad (3)$$

które przedstawiają linię prostą w skali log – log (2) lub półlogarytmicznej(3).

Niezależnie od skali, aproksymacja liniowa ma swoje walory, ale powinna być ograniczona do przedziałów E , T , w których zmiany własności fizycznych badanego dielektryka pozwalają jeszcze na liniową ekstrapolację otrzymanych wyników. Również jednostronne przekroczenie punktu charakterystycznego przedziału E , T w czasie badań przyspieszonego starzenia, prowadzi do błędnych wniosków końcowych.

Wszystkie polimery posiadają stałe punkty termiczne T , w których zachodzą przejścia termodynamiczne lub relaksacyjne w obszar o innych własnościach fizykochemicznych polimeru; na przykład może to być temperatura topliwości T_{tp} , zeszklenia T_s , lub dekompozycji T_{dk} . Każdemu przejściu towarzyszy określona wartość energii (kJ/mol). Szczegółowe dane temperatur i energii przejść dla wszystkich polimerów są publikowane w almanachach chemicznych.

Szczególnie atrakcyjna wydaje się temperatura zeszklenia T_s , której wielkość jest związana z energią kohezji polimeru, długością i sztywnością łańcucha i ruchami Browna, czyli cechami fizycznymi, które mogą być czynne w procesie przebicia.

Przy temperaturze T_{zs} , większość ruchów molekularnych zostaje zamrożona, co zmienia własności polimeru, niekiedy radykalnie. O ważności tego parametru w chemii i technologii polimerów może świadczyć duża liczba monografii i kilkadziesiąt metod pomiarowych T_{zs}

opartych na zmianach różnych cech polimerów z temperaturą. Dla polimerów T_{zs} mieści się przykładowo w przedziale 180 - 500 deg.

Temperatura dekompozycji polimerów T_{dk} dotyczy stanu, w którym nastąpiła bardzo silna degradacja termiczna, związana z utratą 50% masy początkowej polimeru (w próżni), to znaczy z przerwaniem większości wiązań C-H, odgazowaniem wodoru i części smolistych i pojawieniem się węgla. Dla większości polimerów T_{dk} wynosi 650 - 800 deg i można ją uznać jako górną granicę degradacji termiczno-elektrycznej.

Temperatura zeszklenia T_{zs} dzieli przedział temperaturowy $0 < T_{zs} < T_{dk}$ na dwa, o różnych mechanizmach degradacji termiczno-elektrycznej: $T_{zs} < T < T_{dk}$ – przedział mechanizmu molekularnego, w którym E_0 monotonicznie maleje ze wzrostem temperatury i przedział: $0 < T < T_{zs}$ – mechanizmu kwantowego, w którym E_0 maleje bardzo nieznacznie.

Dolną granicę napięciową analitycznej krzywej życia wyznacza naprężenie progowe E_0 , poniżej którego proces degradacji zanika.

Warto przypomnieć, że pierwsze wzory Peeka z 1919 roku [5], dotyczące krzywej życia próbek preszpanu nasyconego olejem, były tak skonstruowane, że przy bardzo długim czasie t napięcie przebicia U_p dąży do $0,35 U_{p1}$, gdzie U_{p1} oznacza wytrzymałość 1-minutową. Jednocześnie była to pierwsza zależność napięciowo-czasowa, której sprawdzony przedział czasowy ważności modelu wynosił od 1s do ponad kilkudziesięciu godzin [1].

Próg napięciowy jest wciąż tematem dyskusji, zarówno co do jego genezy, przyspieszonych metod wyznaczania E_0 i sposobu weryfikacji.

Naprężenie progowe E_0 oddziela procesy odwracalne, na poziomie atomowym, dla $E \leq E_0$, od procesów nieodwracalnych, na poziomie molekularnym (dla $E \geq E_0$).

Górna granica E_g , dla najkrótszych możliwych czasów przebicia (np. około 10 ns), być może jest początkiem innego, szybszego mechanizmu przebicia (laserowego?).

3. Weryfikacja wiarygodności modelu

W monografii [6] autor wykazał, że wzór wykładniczy (3) nie tylko nie jest wzorem „empirycznym”, pochodzi bowiem od termodynamicznego modelu Eyringa:

$$t = \frac{h}{kt} \exp\left(\frac{\Delta H}{kT}\right) \exp\left(\frac{-\Delta S}{k}\right) \quad (4)$$

ale ponadto uwzględnia również wpływ synergizmu E-T, bowiem jego współczynniki B i b zależą od temperatury T próbek. Podobne zależności termiczne wykazują współczynniki N i n we wzorze potęgowym (2).

Jeżeli wzory (2) i (3) nie opisują starzenia czysto „elektrycznego” bo takie nie istnieje (dla $T > 0$), to nie ma sensu tworzenie wieloparametrycznych wzorów „hybrydowych” polegających na kojarzeniu wzorów (2) lub/i (3) z wzorem Arrheniusa, który może opisywać starzenie czysto „cieplne” [7].

Wzór wykładniczy może prawidłowo opisać znaczą część zjawisk zachodzących w polimerze; niekiedy do interpretacji wygodnie jest użyć rozszerzonego wzoru w postaci:

$$t = \frac{h}{kT} \exp\left(\frac{W - \alpha E}{kT}\right) \quad (5)$$

lub wreszcie wzoru pełnego, obejmującego krzywe życia od nieskończoności (dla $E \leq E_0$) do górnej wartości E_g , dla bardzo krótkich czasów [6, 8].

Podstawą weryfikacji modelu i otrzymywanych wyników jest porównanie wartości temperatury zeszklenia T_{zs} obliczonej na podstawie wyników badań, z temperaturą T_{zs} tego polimeru, zmierzoną metodą fizyczną. Zgodność obydwu wartości oznacza prawidłowość wyników i zaufanie do modelu, zaś niezgodność zmusza do szukania przyczyn, zwykle po stronie polimeru. Tak więc temperatura zeszklenia staje się odtąd integralną częścią modelu starzenia.

W tabelicy 1 przedstawiono wyniki badań starzeniowych minikabli z XLPE [7] przy zastosowaniu modelu wykładniczego, a w tabelicy 2, te same wyniki aproksymowane modelem potęgowym.

Tab. 1. Wyniki starzenia izolacji XLPE minikabli [7]. Aproksymacja modelem wykładniczym $t = B \exp(-bE)$

$T_{[K]}$	293		333		363	
	-	+	-	+	-	+
20	712	712	373	258	247	128
15	2035	2035	817	947	441	560
12	3792	3792	1321	2065	649	1357
r	-0,99999	-0,99999	-0,9999	0,9(7)	0,9996	0,9(7)
ln B	10,753	10,753	9,079	10,753	7,909	10,755
b	0,209	0,209	0,158	0,260	0,120	0,295
E_0	4,78	4,78	6,33	3,846	8,32	3,388

Czasy w tabelicy 1 i 2 są podane w godzinach. Dla każdej temperatury T są dwie kolumny czasów; (-) oznacza czas „surowy” zaś (+) – czas skorygowany tak jak dla próbek homogenizowanych. Analizując wyniki łatwo zauważyć, że czasy w kolumnach (-) zmniejszają się zgodnie z oczekiwaniami; wzrastają dla malejących naprężeń probierczych, a czasy (-) w wierszach maleją ze wzrostem temperatury. Natomiast zdziwienie budzą rosnące wartości naprężenia progowego $E_0 = 1/b$ ze wzrostem temperatury T . Wyższe naprężenie progowe oznacza polepszenie fizyczne polimeru. Również obliczona temperatura zeszklenia, $T_{zs} = 404 \text{ deg}$, zamiast standardowej $T_{zs} = 200 \text{ deg}$, potwierdza ten nieoczekiwany wniosek. Zjawisko takie występuje w izolacji XLPE lub EPR kabli wytłaczanych i jest związane z niejednorodnością materiału.

Stosując analizator termomechaniczny można było stwierdzić, że w takiej izolacji, przy pierwszym nagrzewaniu występuje kurczenie się polimeru zamiast spodziewanego rozszerzania się [9]. Efekty elektryczne mogą być związane z relaksacją i redystrybucją ładunku przestrzennego w tych rejonach. Po wygrzewaniu w podwyższonej temperaturze zjawisko to zanika. Opracowano procedury symulujące homogenizację izolacji, przywracając właściwą wartość T_{zs} przez korektę danych. Wyniki korekty są przedstawione w kolumnach oznaczo-

nych (+). Po symulowanej „homogenizacji” otrzymuje się $T_{zs} = 199,6 \text{ deg}$, skorygowane parametry $\ln B$ i b , poprawnie malejące z temperaturą wartości E_0 , oraz bardziej korzystny rozkład czasów do przebicia: wzrost przy niższych naprężeniach, tzn. bliższych roboczym, w zamian za nieistotne skrócenie czasu życia przy wyższych naprężeniach, tzn. przy krótkotrwałych przepięciach.

Tab. 2. Wyniki starzenia izolacji XLPE minikabli [7]. Aproksymacja modelem potęgowym $t=NE_{-n}$

T[K]E [kV/mm]	293		333		363	
	-	+	-	+	-	+
20	712	712	373	259	247	132
15	2035	2035	817	850	441	506
12	3792	3792	1321	2137	649	1427
r	0,997	0,997	0,998	-1	0,9991	0,9(5)
N	16,46	16,46	13,40	17,93	11,20	18,85
n	-3,29	-3,29	-2,49	-4,13	-1,90	-4,7

Model potęgowy również reaguje na zmiany morfologii polimeru. Bezpośrednim symptomem jest zachowanie się wykładnika n , który maleje ze wzrostem temperatury dla wyników surowych (-) i wzrasta po symulowanej homogenizacji polimeru (+).

Zmienia się również temperatura zeszklenia od $T_{zs} = 543 \text{ deg}$ dla stanu (-) do $199,6 \text{ deg}$ dla stanu (+).

4. Dyskusja

Korzystając z wyników dostępnych w literaturze autor (EW) wielokrotnie potwierdził słuszność proponowanej tu metody weryfikacji wyników badań starzeniowych i wykładniczego modelu krzywej życia izolacji.

Tylko w nielicznych wypadkach autorzy informują o wstępnych procesach termicznych homogenizujących próbki; w tych przypadkach zgodność praktyki z teorią jest doskonała.

Niestety, większość wyników pochodzi z badań na materiale o nieustabilizowanej morfologii, co w końcowym efekcie prowadzi do zaskakujących wniosków lub teorii.

Przestroga może tu być znany z literatury przypadek zaprzepaszczenia wyników wieloletnich badań, o wielomilionowej wartości, wskutek użycia „surowego” materiału [10].

5. Wnioski

1. Na krzywej życia można wskazać punkty temperaturowe i napięciowe, w których następuje zmiana mechanizmu przebicia polimeru.

2. Temperatura zeszklenia polimeru jest ważnym parametrem w badaniach starzeniowych i może być wykorzystana jako obiektywne kryterium weryfikacji modelu i wyników badań starzeniowych.

3. Prosty model wykładniczy $t = B \exp(-bE)$ jest dobrym kandydatem do prezentowania krzywej życia w jej różnych odcinkach czasowych i temperaturowych. Model potęgowy nie spełnia kryteriów modelu wykładniczego.

4. Właściwe wyniki badań starzeniowych otrzymuje się tylko z próbek homogenizowanych.

5. Istnieją procedury pozwalające odtworzyć właściwe wyniki badań przeprowadzonych nawet na niehomogenizowanych próbkach

6. Nie wydaje się, żeby wieloparametryczne modele „hybrydowe” mogły opisać krzywą życia polimeru bardziej wnikliwie, niż czyni to proponowany model wykładniczy.

Literatura

- [1] **V. M. Montsinger** – *Breakdown Curve for Solid Insulation*, JAIEE, vol. 54, pp 1300-1301, 1935
- [2] **T. W. Dakin** – *Theory of Voltage Endurance* – CIGRE, Doc. WG-15-06, (6 str), Paris, 1983
- [3] **Ch. Dang, J-L. Parpal, J-P. Crine** – *Electrical Aging of Extruded Dielectric Cables. Review of Existing Theories and Data*, IEEE Tr. DEI Vol. 3, No 2, pp 237-247, 1996
- [4] **L. Simoni** – *A New Approach to the Voltage Endurance Tests on Electrical Insulation*, IEEE Tr. El., Vol. 8, pp 76-86, 1973
- [5] **V. M. Montsinger** – *Effects of Time and Frequency on Insulation Test of Transformers*, JAIEE, vol. 43, pp 145-155, 1924
- [6] **E. Wasilenko** – *Model degradacji izolacji polimerowej w układach wysokiego napięcia*, Zesz. NPGd, Nr 469, Elektryka LXVIII, pp 3-121, 1991
- [7] **L. Simoni, G. Mazzanti, G-C. Montanari, L. Lefebvre** – *A General Multi-stress Life Model for Insulating Materials with or without Evidence of Thresholds*, IEEE Tr. El., Vol. 28, No 3, pp 349-364, 1993
- [8] **E. Wasilenko** – *Ocena wartości napięcia progowego polimerowej izolacji kablowej na podstawie badań symulowanego kanału przebicia*, VI Symp. EUI'97, pp 427-432, Zakopane 1997
- [9] **J. Haberfeld, J. Johnson, R. Gaskill** – *Characterization of Polymeric Insulation by Thermomechanical Analysis*, Termochemica Acta, Vol. 18, pp 171-176, 1977
- [10] **M. D. Walton, B. S. Bernstein, J. T. Smith III, W. A. Thue, J. H. Groeger** – *Accelerated Cable Life Testing of EPR-Insulated Medium Voltage Distribution Cables*, IEEE Tr. PD, Vol. 9, No 3, pp 1195 – 1208, 1994

ON THE LIFE-CURVE OF POLYMER INSULATION

The article presents a new look on the life-curve of polymer electrical insulation, models and their mode of verification hereupon. The glass transition temperature (T_g) of polymer tested is postulated as the main verification indicator combined with exponential life-model (3, 5). The procedure to estimate proper data from aged polymer samples, even those thermally mishandled before, has been obtained.