

Aleksander Buliński, Marian Korgul

STATYSTYCZNE OPRACOWANIE WYNIKÓW Z NAPIĘCIOWYCH PRÓB STARZENIOWYCH
IZOLACJI ELEKTRYCZNEJ W OPARCIU O ROZKŁAD WEIBULLA. ESTYMACJA PARA-
METRÓW ROZKŁADU METODĄ NAJWIĘKSZEJ WIAROGODNOŚCI

1. Wprowadzenie

Postęp w technologii wytwarzania dielektryków i postęp w produkcji nowych układów izolacyjnych spowodowały rozwój badań starzeniowych, którym postawiono za cel ocenę niezawodności urządzeń elektrycznych. Nowe materiały oferowane elektrotechnice przez przemysł chemiczny muszą być, w możliwie krótkim czasie sprawdzone pod względem przydatności do pracy w określonych warunkach, ponieważ długotrwałe obserwacje eksploatacyjne, prototypów urządzeń, byłyby nieuzasadnione ekonomicznie.

Ta konieczność skrócenia badań nad nowymi układami izolacyjnymi, doprowadziła do opracowania różnych koncepcji prób przyspieszonych [1 ... 7] a prace nad nimi są ciągle intensywnie rozwijane.

Jeżeli chodzi o liczbę publikacji, stosunkowo najlepiej rozpoznane są próby cieplne izolacji, próbom napięciowym, czyli takim, w których pole elektryczne o zwiększonym natężeniu jest głównym czynnikiem wymuszającym starzenie izolacji, poświęca się ze względu na stosowanie coraz wyższych napięć probierczych, wznastającą uwagę.

Zachowanie się materiału izolacyjnego w czasie, pod wpływem działania pola elektrycznego może być opisane 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 natężeniu.

Mgr inż. Aleksander Buliński, Instytut Podstaw Elektrotechniki i
Elektrotechnologii
Mgr Marian Korgul, Centrum Obliczeniowe Politechniki Wrocławskiej

Zjawisko spadku wytrzymałości elektrycznej z czasem działania pola elektrycznego na izolację, nie ma jak dotąd w literaturze, przejrzystego wyjaśnienia. Brak jest w przypadku prób w polu elektrycznym, w odróżnieniu do cieplnych prób starzeniowych, opisu mechanizmu starzenia. Spotkać można jedynie mniej lub bardziej skomplikowane hipotezy odnośnie jego przebiegu.

W artykule poświęcono uwagę zastosowaniu probabilistycznej teorii przebicia dielektryków do opisu zjawisk starzeniowych w polu elektrycznym i wynikającym z jej przyjęcia problemom opracowania wyników pomiarowych.

2. Rozkłady czasów do przebicia

Zakładając, że do układu o jednorodnej izolacji zostanie przyłożone pole elektryczne o natężeniu E i że nie dojdzie do przebicia przez czas równy t , prawdopodobieństwo przebicia w przedziale czasowym od t do Δt można zapisać [8]:

$$f = \alpha \cdot \Delta t \quad (1)$$

gdzie α jest spodziewaną częstotliwością przebicia układu, zależną głównie od E i od t .

Zgodnie z równaniem 1 prawdopodobieństwo "przeżycia" izolacji wyniesie:

$$1 - f = 1 - \alpha \Delta t \quad (2)$$

Dzieląc przedział czasowy $0 \dots t$ na n podprzedziałów o szerokości Δt_1 ($i = 1, 2, \dots, n$) prawdopodobieństwo "przeżycia" izolacji można przedstawić:

$$P = \prod_{i=1}^n (1 - \alpha_i \Delta t_1) \quad (3)$$

i po zlogarytmowaniu równania (3):

$$\ln P = \sum_{i=1}^n \ln (1 - \alpha_i \Delta t_i) \approx - \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta t_i \quad (4)$$

z czego wynika, że przy $\Delta t_i \rightarrow 0$

$$\ln P = - \int_0^t \alpha(t, E) dt \quad (5)$$

Ostatecznie prawdopodobieństwo "przeżycia" izolacji w przedziale $[0, t]$ przyjmie postać:

$$P(t, E) = \exp \left(- \int_0^t \alpha(t, E) dt \right) \quad (6)$$

Współczynnik α zależy od fizycznej struktury dielektryku, od jego "historii" oraz od czynników wymuszających przebicie (temperatura, obecność wylądowań niezupełnych, wilgoć, natężenie pola itp.). Jego zależność od czasu można opisać, sprawdzoną wielokrotnie w praktyce funkcją potęgową o postaci [8]:

$$\alpha = \alpha_0 \cdot t^m \quad (7)$$

gdzie $m \geq 0$ zależy od rodzaju układu, materiału izolacyjnego, oraz poziomu zastosowanych natężeń pola elektrycznego. Z (6) i (7) wynika, że:

$$P(t, E) = \exp (- A \cdot t^a) \quad (8)$$

gdzie: $A = \frac{\alpha_0}{a}$; $a = m + 1$

Prawdopodobieństwo przebicia izolacji po czasie t działania pola elektrycznego o natężeniu $E = \text{const}$ będzie zatem równe:

$$P(t)_{E=\text{const}} = 1 - \exp (- A \cdot t^a) \quad (9)$$

Zależność (9) jest analogiczna z wyrażeniem na dystrybucję jednego z trzech typów rozkładów granicznych [9] spotykanego w literaturze pod nazwą rozkładu Weibulla.

Podobny tok rozumowania w odniesieniu do rozkładu napięć przebiecia przy założeniu stałego czasu do przebiecia $t = \text{const}$, doprowadziłby do rozkładu granicznego o postaci [10]

$$F(E)_{t=\text{const}} = 1 - \exp(-B \cdot E^b) \quad (10)$$

Postawienie założenia, że przebiecie części układu izolacyjnego oznacza przebiecie całego układu tzn. że jeżeli $P(t)$ (równanie (8)) jest prawdopodobieństwem "przeżycia" 1/n części układu to prawdopodobieństwo przeżycia całego układu wyniesie P^n prowadzi do uogólnionego rozkładu Weibulla o postaci [10, 11]:

$$F(t, E) = 1 - \exp(-C t^a E^b) \quad (11)$$

gdzie C jest stałą, niezależną od czasu i natężenia pola elektrycznego, zależną natomiast od warunków otoczenia oraz wymiarów izolacji.

Przyjmując w równaniu (11) stały poziom prawdopodobieństwa przebiecia ($F = \text{const}$) otrzymuje się równanie krzywej życia:

$$E^b \cdot t = \text{const} \quad (12)$$

Zależność (12) jest wynikiem ogólnych rozważań opartych na teorii "słabego ogniwa". Ich słuszność potwierdzają wyniki większości badań starzeniowych [1 ... 8, 11 ... 15].

Wynika z tego, że rozkład o dystrybuancie (11) najlepiej odpowiada naturze zjawisk starzeniowych i że wykonując próby przy stałych natężeniach pola elektrycznego, powinno się otrzymać rozkłady czasów do przebiecia zgodne z rozkładem Weibulla.

W pewnych przypadkach różnice między wynikami obliczeń według rozkładu Gaussa i rozkładu Weibulla mogą być niewielkie, co obserwuje się np. w badaniach wytrzymałości dielektrycznej izolacji. Z reguły jednak, przy wyznaczaniu czasów życia nie można posługiwać się rozkładem normalnym, ponieważ rozkłady czasów do przebiecia są rozkładami bardzo niesymetrycznymi [13, 11, 16, 17].

Zastosowanie rozkładu Weibulla pozwala ponadto wyjaśnić ten zwany "efekt rozmiarowy", czyli obserwowane doświadczalnie zmiany wytrzymałości dielektrycznej izolacji pod wpływem zmian wymiarów izolacji [11, 18...20], nie prowadzi również do sprzecznych fizycznie wniosków jak w przypadku rozkładu normalnego, z którego wynika, że dla natężenia pola $E=0$ istnieje skończone, różne od zera prawdopodobieństwo przebicia.

3. Opracowanie wyników z przyspieszonych prób życia izolacji elektrycznej, w oparciu o rozkład Weibulla

Najczęściej spotykaną w literaturze metodą opracowania wyników z badań starzeniowych izolacji jest metoda graficzna - stosunkowo prosta, posiadająca cenną zaletę, jaką jest możliwość sprawdzenia zgodności przyjętego modelu matematycznego z rzeczywistym przebiegiem zjawiska [21]. Jej wadą jest mała dokładność. Z tego punktu widzenia przewagę ma metoda analityczna, trudna jednak w obliczeniach i w interpretacji wyników. Połączenie obydwóch sposobów opracowania wyników jest wyjściem na jkorystniejszym, bo obydwa wzajemnie się uzupełniają.

Ponieważ liczba publikacji przedstawiających zastosowanie metody graficznej jest znaczna [5, 7, 8, 11...17], są również prace poświęcone wyłącznie jej opisowi [21]. W niniejszym artykule zostanie omówiona metoda analityczna, oparta na estymacji parametrów rozkładu Weibulla metodą największej wiarygodności. Zostanie przedstawiony algorytm obliczeń na maszynie cyfrowej oraz porównawcze przykłady opracowania wyników metodą graficzną i analityczną, w których przy określonych natężeniach pola elektrycznego, wszystkie próbki były doprowadzane do przebicia.

Wprowadzamy wzór na dystrybucję rozkładu Weibulla w postaci:

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \frac{(t - T_0)^k}{T} \right] \text{ dla } t \geq T_0 \geq 0$$

$$F(t) = 0 \quad \text{dla } t < T_0$$
(13)

różniący się od zależności (9) elementem T_0 .

Przy korzystaniu z rozkładu Weibulla do oceny niezawodności izolacji należy zwrócić uwagę na poprawną interpretację tego parametru. Wielkość T_0 należy ogólnie uważać za pierwszą realizację zmiennej losowej, przynależną do rozkładu o zdeterminowanych wartościach parametrów k i T . Dla czasów t mniejszych od T_0 mogą istnieć realizacje zmiennej losowej przynależne do rozkładu innego typu, lub rozkładu Weibulla o innych parametrach. Założenie, że $F(t) = 0$ dla czasów t mniejszych od T_0 jest równoznaczne z uszanowaniem pewnego faktu, że w czasie eksploatacji krótszym od T_0 izolacja nie może ulec uszkodzeniu, co nie jest prawdą. Chwilę T_0 należy uważać jedynie za chwilę przejścia rozkładu z jednej postaci w inną. Parametr T w równaniu (13) jest tzw. parametrem skali, parametr k - współczynnikiem kształtu, a parametr T_0 parametrem położenia.

Funkcję gęstości rozkładu Weibulla otrzymuje się z zależności (13) po zróżniczkowaniu $F(t)$ po czasie:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{k}{T} (t - T_0)^{k-1} \exp \left[- \frac{(t - T_0)^k}{T} \right] \quad (14)$$

Funkcja ta cechuje się dużą różnorodnością postaci, co zapewnia, że po odpowiednim doborze wszystkich trzech parametrów k , T i T_0 może być użyta do ekstrapolacji wyników doświadczalnych o bardzo różnych rozkładach empirycznych.

Metoda największej wiarygodności oszacowania parametrów rozkładu Weibulla, opiera się na wprowadzonej przez Fischera funkcji wiarygodności, zdefiniowanej jako łączna gęstość rozkładu próbki o liczności n , to znaczy

$$g(t) = \sum_{i=1}^n f(t_i) \quad (15)$$

$$g(t) = \left(\frac{k}{T}\right)^n \prod_{i=1}^n (t_i - T_0)^{k-1} \exp \left[- \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (t_i - T_0)^k \right] \quad (16)$$

Wprowadzając podstawienie:

$$L(t) = \ln \vartheta(t)$$

dostaje się zależność na $L(t)$ w postaci:

$$L(t) = n \ln k - n \ln T + (k-1) \sum_{i=1}^n \ln (t_i - T_0) - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (t_i - T_0)^k \quad (17)$$

której maksimum leży w tym samym punkcie co maksimum funkcji (16). Dla jego znalezienia, należy wyznaczyć pochodne cząstkowe $L(t)$ po k , T i T_0 :

$$\frac{\partial L(t)}{\partial T_0} = - (k-1) \sum_{i=1}^n (t_i - T_0)^{-1} + \frac{k}{T} \sum_{i=1}^n (t_i - T_0)^{k-1} \quad (18)$$

$$\frac{\partial L(t)}{\partial T} = - \frac{n}{T} + \frac{1}{T^2} \sum_{i=1}^n (t_i - T_0)^k \quad (19)$$

$$\frac{\partial L(t)}{\partial k} = \frac{n}{k} + \sum_{i=1}^n \ln (t_i - T_0) - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (t_i - T_0)^k \ln (t_i - T_0) \quad (20)$$

Przyrównując pochodne cząstkowe do zera i rozwiązując (19) ze względu na T otrzymuje się zależność na parametr skali, jako funkcję współczynnika kształtu k i parametru położenia T_0 :

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - T_0)^k \quad (21)$$

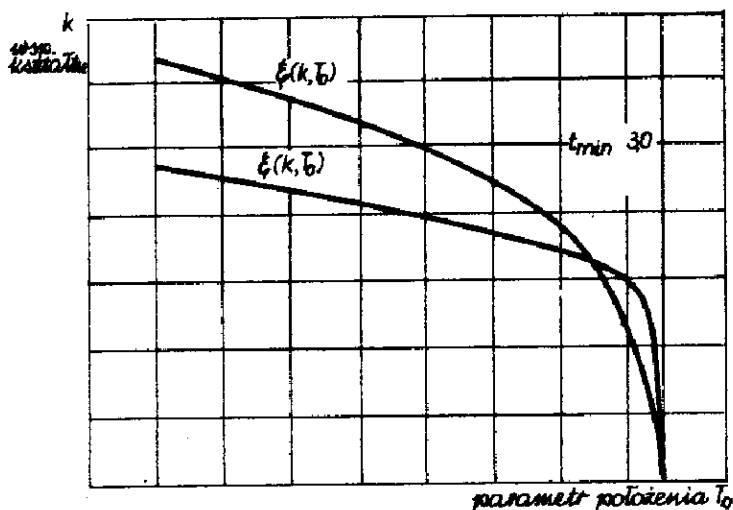
Podstawiając (21) do (18) i (20) otrzymuje się następujący układ równań nieliniowych:

$$\xi_1(k, T_0) = \frac{1}{k} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln (t_i - T_0) - \left[\sum_{i=1}^n (t_i - T_0)^k \ln (t_i - T_0) \right] \left[\sum_{i=1}^n (t_i - T_0)^k \right]^{-1} = 0 \quad (22)$$

$$\xi_2(k, T_0) = (1-k) \sum_{i=1}^n (t_1 - T_0)^{-1} +$$

$$+ \left[n \cdot k \sum_{i=1}^n (t_1 - T_0)^{k-1} \right] \left[\sum_{i=1}^n (t_1 - T_0)^k \right]^{-1} = 0 \quad (23)$$

Według rozeznania autorów, ścisłe analityczne rozwiązanie układu równań (22) i (23) w ogóle nie istnieje. Szuka się go metodą kolejnych przybliżeń, wykorzystując do tego celu maszynę cyfrową. Polega to na szukaniu przecięcia dwóch krzywych w układzie współrzędnych (k, T_0) . Zmienna k , będąca rozwiązaniem równania $\xi_1(k, T_0) = 0$ dla ustalonej wartości zmiennej T_0 maleje monotonicznie wraz ze wzrostem T_0 (dla $T_0 \in [0, t_1]$). Podobnie jest w przypadku równania $\xi_2(k, T_0) = 0$. Graficzną interpretacją rozwiązań k_1 i k_2 równań $\xi_1(k, T_0) = 0$ i $\xi_2(k, T_0) = 0$ są krzywe, które przecinają się w przedziale $[0, t_1]$ (rys. 1).



Rys. 1 Graficzna interpretacja rozwiązania układu równań nieliniowych 22, 23.

Znalezienie punktu przecięcia, który jest równocześnie rozwiązaniem układu równań (22) i (23) i wyznacza tym samym szukane estymatory T_0^* i k^* w sensie kryterium największej wiarygodności przebiega według następującego schematu:

1) wyznaczenie rozwiązań k_1^0 i k_2^0 układu równań (22), (23) w punkcie $T_{00} = 0$,

2) wyznaczenie rozwiązań k_1^1 i k_2^1 układu równań (22), (23) w punkcie $T_{01} = t_1 - 0.0001$

3) wyznaczenie różnicy $S1 = \text{sign}(k_1^0 - k_2^0)$

4) jeżeli $S1(k_1^1 - k_2^1) > 0$ przechodzi się do punktu 10,

5) wyznaczenie rozwiązań k_1^p , k_2^p układu równań (22), (23) w punkcie $T_{op} = (T_{00} + T_{01})/2$,

6) gdy zostanie osiągnięta żądana dokładność rozwiązania równań $\xi_1(k, T_0) = 0$ i $\xi_2(k, T_0) = 0$ w punkcie T_{op} należy przejść do punktu 9),

7) jeżeli $S1(k_1^p - k_2^p) > 0$ to $T_{00} = T_{op}$, w przeciwnym razie $T_{01} = T_{op}$,

8) powrót do punktu 5),

9) wyznaczenie rozwiązania układu równań (22), (23)

$$T_0^* = T_{op}, \quad k^* = (k_1^p + k_2^p)/2$$

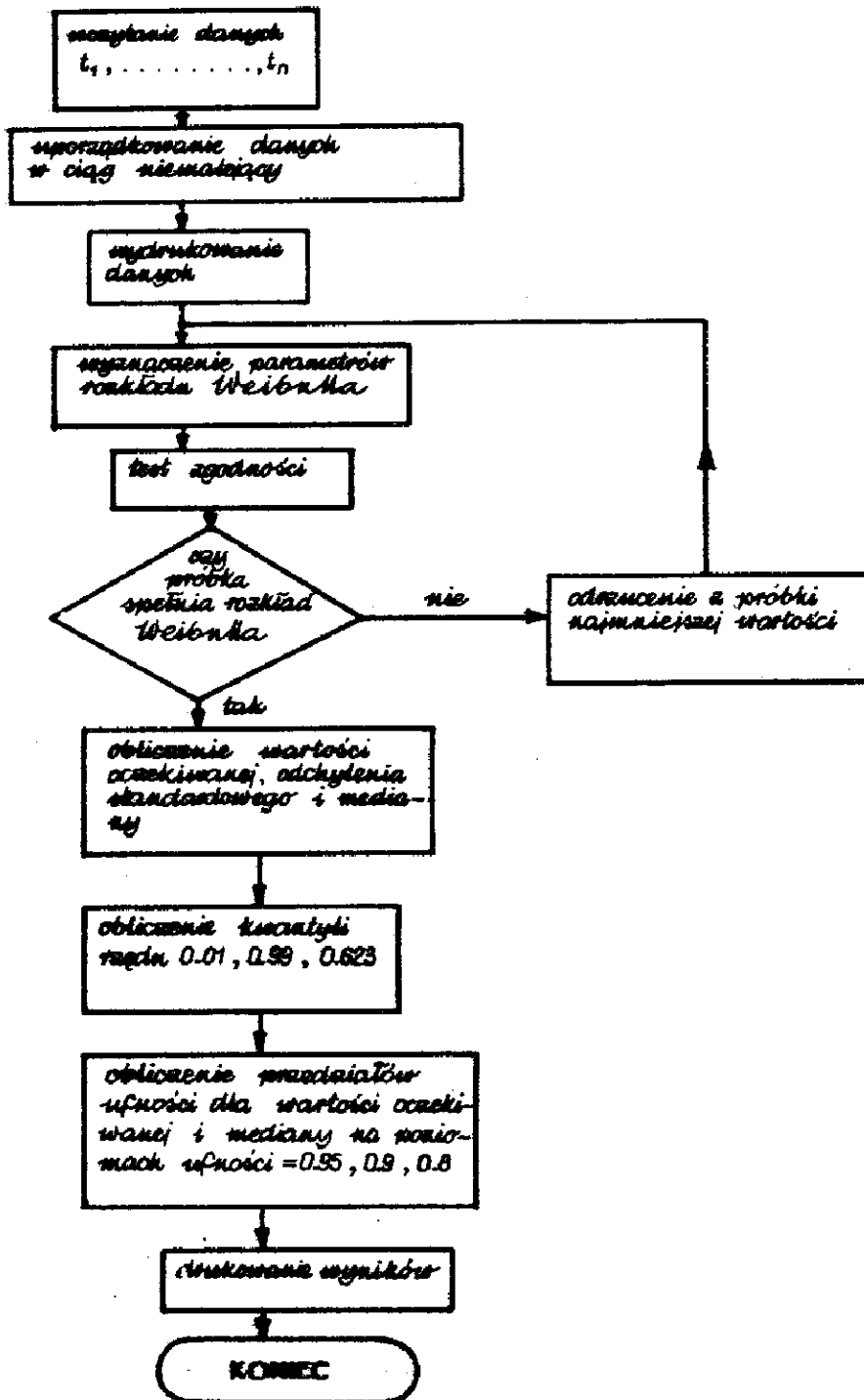
i przejście do punktu 11),

10) wyznaczenie rozwiązania układu równań (22), (23)

$$T_0^* = 0, \quad k^* = k_1^1$$

11) KONIEC.

W oparciu o podany schemat obliczeń opracowany został blok nr 4 przedstawionego na rysunku 2, algorytmu programu, napisanego w języku ALGOL 1900 dla maszyn z serii ODRA 1300.



Rys. 2 Uproszczony algorytm obliczeń na maszynie cyfrowej przy wyznaczaniu parametrów rozkładu Weibulla metodą największej wiarygodności oraz przy wyznaczaniu wybranych momentów rozkładu Weibulla

Przykład

Dla zilustrowania omawianej metody estymacji parametrów rozkładu Weibulla, zostaną porównane wartości parametrów wyjściowego rozkładu hipotetycznego z estymatorami obliczonymi na maszynie cyfrowej ODRA 1305 i IBM 7090 [22].

Rozkładem wyjściowym jest rozkład o $T_0 = 1,975$, $T = 166,827$, $k = 1,3285$. Zbiór danych spełniających ten rozkład, wygenerowanych metodą Monte Carlo [22] przedstawia Tablica 1. W tablicy 2 zestawiono wyniki obliczeń własnych i wg [22].

T a b l i c a 1

Zbiór czasów do przebiccia wg hipotetycznego rozkładu Weibulla [22]

3.0	10	17	25	30	38	44	55	69	90
4.4	10	17	26	32	39	45	60	71	97
4.4	13	19	26	32	39	46	61	71	100
6.0	13	19	26	33	40	50	61	75	100
6.8	13	19	26	33	40	50	61	77	105
8.0	14	20	27	34	42	51	61	79	113
8.0	15	20	28	34	42	52	66	79	113
9.0	15	21	28	37	42	52	66	81	113
9.0	16	21	29	38	44	54	68	86	121
9.4	17	24	29	38	44	55	69	89	145

Czasy do przebiccia w tablicy 1 podane są w godzinach. Pierwsze przebiccie nastąpiło po $3.0 \text{ h}/t_{\min} = t_1 = 3.0 \text{ h}$, następne w 4 godzinie $/t_2 = 4.4 \text{ h}$ etc.

Wyniki estymacji parametrów rozkładu Weibulla wg danych z tabelicy 1

Lp.	Parametr	Rozkład a priori	Wyniki estymacji parametrów metodą największej wiarygodności	
			IBM 7090 [22]	ODRA 1305
1	skali T	166.827	155.065	155.083
2	położenia T_0	1.975	2.61262	2.612
3	kształtu k	1.3285	1.63082	1.324
4	estymator wartości oczekiwanej $K^*(t)$	-	44.24	44.148
5	estymator dyspersji $\sigma^2(+)$	-	30.7315	31.67
6	estymator mediany $Me^*(+)$	-	-	36.832

Opracowany program, oprócz parametrów rozkładu pozwala na wyliczenie wartości oczekiwanej, mediany, kwantylów rzędu 0.1, 0.623, 0.99 z rozkładu, oraz na wyznaczenie długości przedziałów ufności dla mediany i wartości oczekiwanej na poziomach ufności 0.95, 0.9 i 0.8. Za każdym razem jest również sprawdzana hipoteza o zgodności rozkładu empirycznego z rozkładem Weibulla. Został do tego celu wykorzystany test zgodności Kolmogorowa - Smirnowa. Przy ujemnym wyniku testu, odrzucony jest pierwszy wynik i wszystkie przeliczenia zostają powtórzone (rys.2). Jeżeli to jest konieczne zostaje odrzucony wynik następny itd. Przy wydruku wyników sygnalizowana jest liczba odrzutów. Ma to istotne znaczenie przy interpretacji wyników obliczeń i wiąże się z występowaniem tzw. rozkładów złożonych [16].

Na wstępie tego rozdziału wspomniano o tym, że przy opracowaniu wyników badań starzeniowych korzystne jest zastosowanie obydwóch metod - graficznej i analitycznej. Metoda analityczna zapewni bowiem

dokładne oszacowanie parametrów i wybranych momentów rozkładów empirycznych, zaś metoda graficzna daje ilustrację zgodności obserwowanego zjawiska z przyjętym modelem matematycznym. Dla przykładu, na rysunku 3 i 4, przedstawiono w siatkach funkcyjnych rozkładu Weibulla wartości czasów do przebicia izolacji warstwowej papier kablowy - ciekły azot [14, 23]. Wartości oszacowanych metodą graficzną i analityczną tych parametrów rozkładów zestawiono w tabelicy 3.

T a b l i c a 3

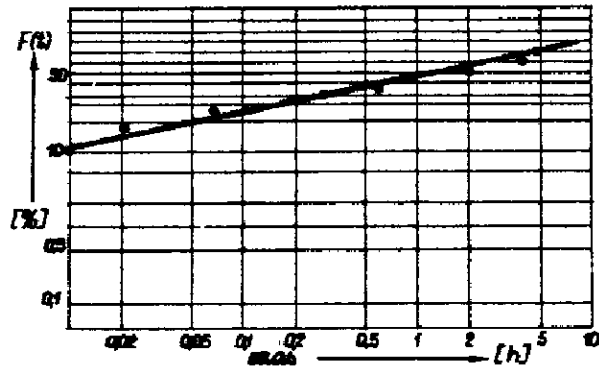
Wyniki estymacji parametrów rozkładów czasów do przebicia dla izolacji papier kablowy - ciekły azot wg rys. 3

Lp.	Parametr	Estymatory parametrów rozkładów wyznaczone metodą:			
		graficzną		analityczną	
		26,6 kV/mm	25 kV/mm	26,6 kV/mm	25 kV/mm
1	T_0	0.000	0.000	0.000	0.000
2	T	0.85	76.8	0.901	127.576
3	k	0.48	0.96	0.61	1.14
4	$E(t)$ w [h]	-	-	1.242	67.09
5	$Me(t)$ w [h]	0.43	52.8	0.462	50.984

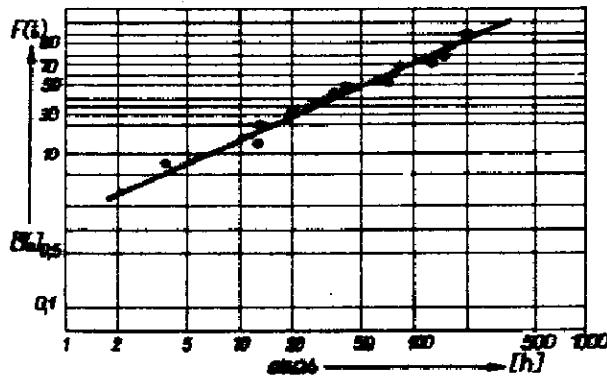
4. Uwagi końcowe

Poprawna interpretacja wyników badań starzeniowych izolacji elektrycznej, niezależnie od typu takich badań, wymaga zastosowania odpowiedniego aparatu matematycznego przy ich opracowaniu.

Opieranie się na niesprawdzanym w wielu przypadkach, założeniu o normalnym rozkładzie mierzonych wartości, może pociągnąć za sobą poważne błędy. Dotyczy to zwłaszcza badań czasów życia izolacji w polu elektrycznym lub w podwyższonej temperaturze, które cechują się niesymetrycznymi rozkładami i dużymi rozrzutami wartości.



Rys. 3. Rozkłady czasów do przebicia w systemie Weibulla dla 10 warstwowych próbek izolacji papier kablowy (120 μm) - ciekły azot. Natężenie przebierane pola elektrycznego - 26,6 kV/mm



Rys. 4. Rozkłady czasów do przebicia w systemie Weibulla dla 10 warstwowych próbek izolacji papier kablowy (120 μm) - ciekły azot. Natężenie przebierane pola elektrycznego - 25 kV/mm

Wyjście z założenia, że przebicie izolacji lub ogólnie, zniszczenie obiektu, jest realizacją pewnej zmiennej losowej, daje teoretyczne podstawy do przyjęcia rozkładu Weibulla, jako najlepszego modelu matematycznego do opisu rozkładów czasów do przebicia. Liczne doświadczenia potwierdziły to w praktyce. Okazuje się, że jest to najlepszy model w odniesieniu również do innych wielkości, takich jak wytrzymałość dielektryczna, wytrzymałość mechaniczna i jak sprawdzono ostatnio w Politechnice Wrocławskiej, napięcie zapłonu i czasy do zapłonu w odgromnikach wysokiego napięcia.

Stosowanie rozkładu Weibulla do opracowania wyników jest obliczeniowo kłopotliwe. Najprostszą, przez to najczęściej stosowaną metodą, jest metoda graficzna. Jej wadą jest mała dokładność - zaletą ilustracyjność, pomocna przy interpretacji wyników badań. Analityczne wyznaczenie parametrów rozkładu Weibulla daje najlepsze wyniki przy zastosowaniu metody największej wiarygodności. Ponieważ jednak wiąże się ona z rozwiązywaniem układu równań nieliniowych, konieczne jest stosowanie do obliczeń maszyny cyfrowej.

Opracowany w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej program na maszynie z serii ODRA 1300 wykonuje obliczenie dla 100 danych w czasie ok. 3 minut. Dla porównania użycie metody graficznej zajmuje nie mniej niż 1/2 godziny.

Sprawdzenie możliwości zastosowania tego programu do obliczeń z pomiarów wytrzymałości doraźnej różnych układów izolacyjnych oraz napięć zapłonu i czasów do zapłonu dla odgromników wysokiego napięcia dało pomyślne wyniki. Należy przypuszczać, że program ten stanowiłby wygodne narzędzie do opracowania wyników w przypadku badań wytrzymałości mechanicznej materiałów, prób zmęczeniowych konstrukcji mechanicznych, odporności materiałów na wibracje, na podwyższoną temperaturę itp.

Literatura

1. Bakin T.W. - Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomena (AIEE Trans., 1948).

2. Dakin T.W. - Electrical Insulation Deterioration (Electro-Technology, 1960, pp. 124 ... 129).
3. Endicott H.S. - Application of the Eyring Model to Capacitor Ageing Test (IEEE Trans. Component Parts, 1965, Vol. CP-12, pp. 34 - 41).
4. Simoni L. - A New Approach to the Voltage Endurance Test on Electrical Insulation (IEEE Trans. Elect. Insulation, Vol. EI-8, No. 3, 1973, pp. 76 - 86).
5. Starr W.T., Endicott H.S. - Progressive Stress - A New Accelerated Approach to the Voltage Endurance (IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-80, 1961, pp. 515 - 522).
6. Hiroshi Shioiri - Application of Cumulative Degradation Model to Acceleration Life Test (IEEE Trans. Reliability, Vol. R-17, No. 1, 1968, pp. 27 - 33).
7. Meyer H. - Voltage Endurance of Electrical Insulation (Proceedings 7 th Electrical Insulation Conference, Chicago 1967, pp. 268 - 272).
8. Occhini E., Pirrelli S.A. - A Statistical Approach to the Discussion of the Dielectric Strength in Electrical Cables (IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-90, No. 5, 1971, pp. 2671 - 2691).
9. Gumbel E.J. - Statistic of Extremes (N.Y. Columbia University Press, 1960).
10. Oudin J.M. - Theorie statistique du claquage électrique (RGE, Tome 77, No. 4, 1968, 430 - 436).
11. Devaux A., Oudin J.M. - Reliability and Development Towards High Voltages of Synthetic Insulated Cables (Cigre 1968, Rep. 21-10).
12. Kreuger F.H. - Determination of the Internal Discharge Resistance of Dielectric Materials (IEEE Trans. Elect. Insulation, Vol. EI-3, No. 4, 1968, pp. 106 - 114).

13. Asker P., Dellby B., Jacobsen C.T. - Accelerated Electrical Ageing of Cross-Linked Polyethylene Cables (Cigre 1972, Rep. Rep. 21-09).
14. Buliński A.T., Juchniewicz J.R. - Voltage Ageing Tests of Layer Insulation Samples Impregnated with Liquid Nitrogen (Cigre 1974, Rep. 15-02).
15. Oudin J.M., Flamand A.: The Use of Thermoplastic Insulating Materials in the Manufacture of the Extra High Voltage Cables for A.C. and D.C. (Cigre 1962, Rep. 209).
16. Fischer P., Rohl P.: Application of Statistical Methods to the Analysis of Electrical Breakdown in Plastics (Siemens Forsch. u. Entwickl. Ber. Bd. 3, 1974, No. 2).
17. Artbauer J., Grac J.: Some Factors Preventing the Attainment of Intrinsic Strength in Polymeric Insulation (IEEE Trans. Elect. Insulation, Vol. EI-5, No. 4, 1970, 104-112).
18. Brookes A.S.: The Weibull Distribution: Effect of Length and Conductor Size of Test Cables (Electra, No. 3, 1974, pp. 49 - 61).
19. Nitta T., Yamado N.: Area Effect of the Electrical Breakdown in Compressed SF₆ (IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-93, No. 2, 1974, pp. 623 - 629).
20. Stannet A.W. - Effect of Specimen Size on the Electric Strength of Plastic Films (IEE Colloquium, May 1974).
21. Nelson W. - Graphical Analysis of Accelerated Life Test Data with the Inverse Power Law Model (IEEE Trans. Reliability, Vol. R-21, No. 1, 1972, pp. 2 - 11).
22. Ravis J. - Estimating Weibull Distribution Parameters (Electro-Technology, March 1964, pp. 46 - 54).
23. Buliński A., Juchniewicz J., Żak W. - Teilentladungen und Alterung der mit flüssigem Stickstoff getränkten Schichtisolierung (XIX Inter. Wiss. Kolloquium 14 - 18. 10. 1974, TH Ilmenau, Heft 2, 33 - 37).