

Adam Rynkowski, Henryk Boryń,  
Jerzy Suchocki, Stanisław Wojtas

## WYTRZYMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNA KABLI Z INTENSYWNYMI WYŁADOWANIAMI NA POWIERZCHNI POLIETYLENU IZOLACYJNEGO

### 1. Wstęp

Z dotychczasowych badań krajowych kabli polietylenowych wynika, że wyładowania niezupełne występują przede wszystkim na zewnątrz izolacji między warstwami półprzewodzącymi ekranu oraz na powierzchni izolacji [2 - 5]. Stwierdzono także, że zwiększony poziom intensywności wyładowań niezupełnych na powierzchni polietylenu izolacyjnego nie zawsze wiąże się ze skróceniem czasów do przebiccia [6]. Można jednak przypuszczać, że różnice w intensywności wyładowań były zbyt małe, aby ewentualny ich wpływ na czas przebiccia był zauważalny.

Celem pracy było sprawdzenie wpływu intensywności wyładowań niezupełnych na powierzchni izolacji na wytrzymałość długotrwałą kabli przy dość wysokim napięciu 20 kV/mm.

### 2. Metodyka badań

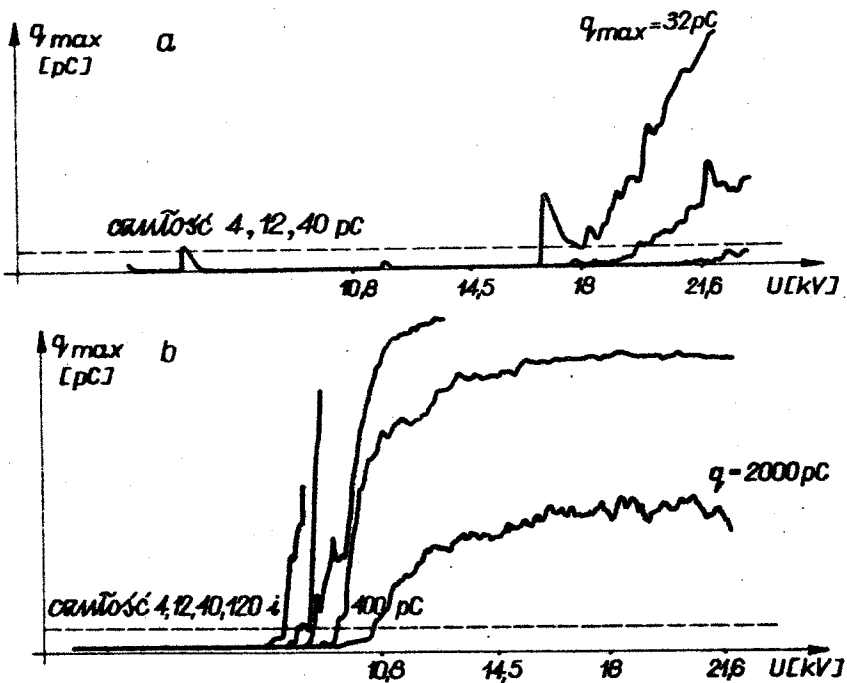
Badania prowadzono na kablu typu YHAKX 1x70 mm<sup>2</sup> wyprodukowanym w 1975r. Z odcinka fabrykacyjnego o długości 65 m przygotowano 14 próbek o długości pomiarowej równej 1750 mm. Kable były zakończone prefabrykowanymi głowicami o wytrzymałości długotrwałej ok. 115 kV, wolnymi od wyładowań niezupełnych do napięcia 36 kV przy czułości 0,4 pC [6].

---

Dr inż. Adam Rynkiewicz, mgr inż. Henryk Boryń, dr inż. Jerzy Suchocki,  
mgr inż. Stanisław Wojtas - Politechnika Gdańska, Instytut Wysokich  
Napięć i Aparatów Elektrycznych

Próbki te charakteryzowały się małą intensywnością wyładowań niezupełnych - napięcie progu wyładowań przy czułości 4 pC było rzędu 20 kV.

Połowę odcinków próbnych poddano przeróbce przez zmycie grafitu z powierzchni izolacji kabla i ponowne nałożenie pozostałych warstw zewnętrznych. Po przeróbce odcinki te charakteryzowały się napięciem progu od 4 kV do 7 kV przy 4 pC, a ładunek maksymalny przy 21,6 kV był rzędu 2000 pC, a więc o trzy rzędy wielkości większy niż w odcinkach nie przerabianych. Na rysunku 1 podano przykładowe charakterystyki  $q_{max} = f(u)$  odcinków z obu populacji.



Rys.1. Charakterystyki amplitudy ładunku w funkcji napięcia próbek kabla YHAKX 1 x 70 mm<sup>2</sup>

- a/ odcinek o małej intensywności wyładowań - duże napięcie progu, mały ładunek przy 21,6 kV,  
 b/ odcinek o dużej intensywności wyładowań - zmyty grafit z powierzchni izolacji

Odcinki z obu grup poddane próbie wytrzymałości długotrwałej w temperaturze pokojowej /około  $20^{\circ}\text{C}$ / i przy napięciu 90 kV /średnie napięcie w izolacji  $E = 20\text{ kV/mm}$ /.

Pomiary wyładowań niezupełnych i badania wytrzymałości elektrycznej długotrwałej przeprowadzono na stanowiskach opisanych w [8, 6]. Analizę czasów do przebiccia prowadzono w oparciu o prawo rozkładu zmiennej losowej wg Weibulla. Do estymacji parametrów rozkładu wykorzystano metodę graficzną.

### 3. Wyniki badań

W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości napięciowej długotrwałej próbek kabla. Podano czasy do przebiccia przy napięciu 90 kV dla odcinków o małej i dużej intensywności wyładowań. W tabeli tej podano także wartości napięcia proggu przy różnych czułościach oraz wartości ładunku maksymalnego zmierzone przy napięciu 21,6 kV. Podano wartości średnie i odchylenia standardowe.

Na rysunku 2 na siatkach funkcyjnych Weibulla przedstawiono rozkłady czasów do przebiccia dla obu populacji. Między punktami odpowiadającymi wynikom doświadczeń przeprowadzono proste. Wartości parametrów rozkładu podano na rysunkach.

Z porównania wykresów rys.2a i 2b wynika, że parametry rozkładu czasów do przebiccia dla obu populacji różnią się nieznacznie. Parametry skali są jednakowe  $T_a = T_b = 160\text{ godz.}$ , a parametry kształtu - zbliżone  $m = 2,2$ ;  $m = 1,85$ . Funkcje intensywności uszkodzeń w obu przypadkach monotonicznie rosną ( $m > 1$ ). Wartość współczynników  $m > 1$  może świadczyć o postępującym starzeniu i degradacji izolacji. Trudno jednak przypuszczać, aby wyładowania niezupełne o tak różnym natężeniu dawały zbliżone wartości współczynników  $m$ .

Na rysunku 3 przedstawiono na wspólnym wykresie rozkład wartości oczekiwanych czasów do przebiccia dla wszystkich odcinków kabla YHAKX  $1 \times 70\text{ mm}^2$ . Można zauważyć, że wszystkie punkty z badanej populacji na-

Tabela I

Wyniki badań wytrzymałości napięciowej długotrwałej kabli o różnych poziomach intensywności wyładowań na zewnątrz izolacji przy  $U = 90$  kV i temperaturze izolacji 293 K

a. Kable o małej intensywności wyładowań niezrębnych - nie przerobione		b. Kable o dużej intensywności wyładowań niezrębnych - przerobione								
Lp.	U 4 pC	U <sub>z</sub> 40 pC/400 pC	q <sub>max</sub> [pC] przy 21,6 kV	t <sub>p</sub> [godz.]	Lp	U <sub>z</sub> 4 pC	U <sub>z</sub> [kV]		q <sub>max</sub> [pC] przy 21,6 kV	t <sub>p</sub> [godz.]
							40 pC	400 pC		
1	20,1	-	10	37	1	7,2	10,4	11	1750	50
2	21,2	-	6	105	2	8,4	9,6	12	740	85
3	18,0	-	32	110	3	3,6	7,3	7,7	3600	93
4	20,3	-	8	141	4	6,8	8,4	9,4	1300	65
5	21,1	-	6	150	5	8,3	9	12	750	172
6	19,4	-	28	168	6	6,5	8,0	8,8	1800	182
7	20,0	-	13	240 <sup>x/</sup>	7	7,5	8,5	10,4	2000	240
		$\bar{U}_z = 20,1$				$\bar{U}_z = 6,9$	$\bar{U}_z = 8,74$	$\bar{U}_z = 10,18$	$\bar{q}_{max} = 1705$	
		$\sigma = 1,2$				$\sigma = 1,49$	$\sigma = 0,96$	$\sigma = 1,53$	$\sigma = 902$	

x Próbe przerwano.

Oznaczenia: U<sub>z</sub>

q<sub>max</sub>

t<sub>p</sub>

U<sub>z</sub>

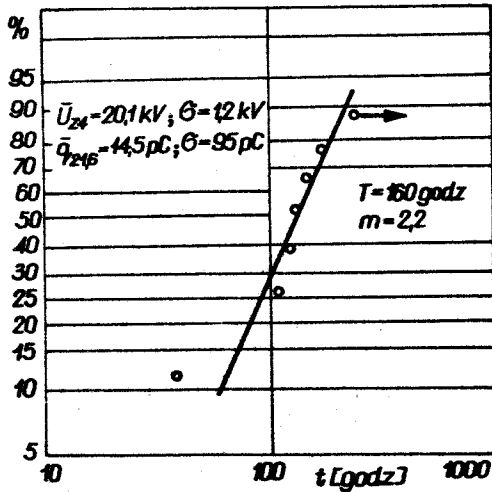
q<sub>max</sub>

σ

- napięcie prądu wyładowań przy czułości 4 pC, 40 pC i 400 pC,
- wartość ładunku maksymalnego zmierzona przy napięciu 21,6 kV
- czas do przebiecia odcinka kabla przy 90 kV 50 Hz,
- wartość średnia napięcia prądu,
- wartość średnia q<sub>max</sub>
- odchylenie standardowe

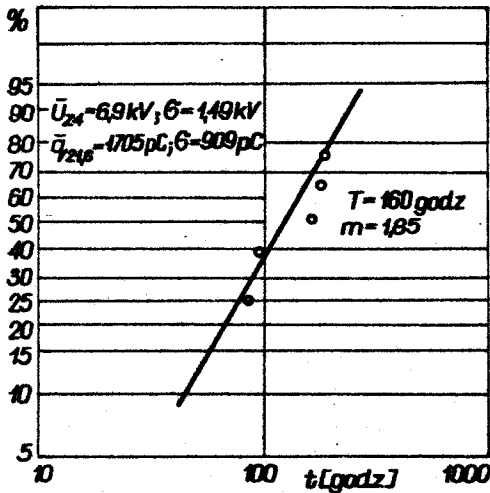
leżą do tego samego rozkładu o zdeterminowanych wartościach parametru skali  $T = 150$  godz. i kształtu  $m = 1,9$ .

a



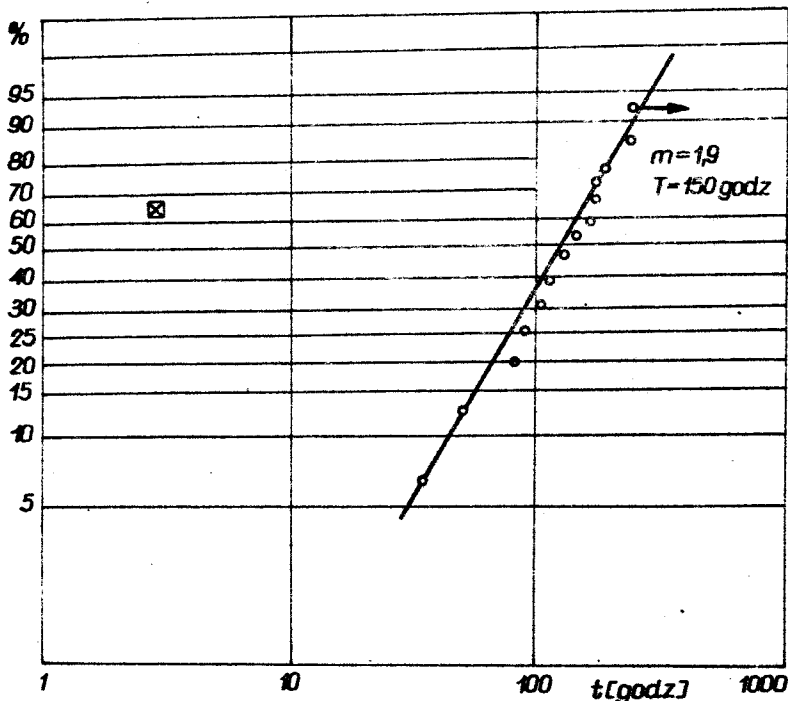
Rys.2. Rozkład statystyk pozycyjnych w siatce funkcyjnej Weibulla o małej a/ i o dużej b/ intensywności wyładowań niezupełnych

b



Dla zweryfikowania hipotezy o braku istotnej różnicy między obu populacjami pod względem trwałości badanych odcinków, wykorzystano test oparty na funkcji Korjoluuka [1]. Test ten jest szczególnie przydatny wtedy, gdy z dwóch zbiorów obiektów pobieramy próbki o niewielkiej lecz jednakowej liczebności. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że

obie próby pochodzą ze zbiorów o takim samym rozkładzie czasów do przebicia. Twierdzenie to jest słuszne na poziomie prawdopodobieństwa równym 98 %.



Rys. 3. Rozkład czasów do przebicia próbek kabla YHAKX 1x70 mm<sup>2</sup> o różnych poziomach intensywności wyładowań niezupełnych na zewnątrz izolacji polietylenowej

Wyniki doświadczeń otrzymane w serii badań i pozytywna weryfikacja hipotezy o braku wpływu wyładowań niezupełnych na powierzchni izolacji głównej kabla na czas do przebicia wskazują, że przy próbach wykonywanych w stałej temperaturze pokojowej mierzony poziom wyładowań niezupełnych  $U_z$ ,  $q_{max}$  nie ma istotnego wpływu na wytrzymałość długotrwałą kabli dla czasów do około 200 godz. i przy natężeniu pola w izolacji równym 20 kV/mm. Wartości oczekiwane zmiennej losowej czasu do przebicia przedstawiono na siatce funkcyjnej Weibulla tworzą rozkłady o parametrach charakterystycznych dla badanej populacji. Starzenie izolacji nie wynika więc z poziomu intensywności wyładowań na zewnątrz izo-

lacji lecz z wartości naprężenia probierczego i z obecności wad technologicznych, mechanicznych lub strukturalnych wewnątrz izolacji.

#### 4. Wnioski

1. Przedstawione wyniki badań wytrzymałości długotrwałej izolacji kabla YHAKX z r.1975 wykazały, że przy napięciu 90 kV  $E = 20 \text{ kV/mm}$ , temperaturze izolacji ok.  $20^{\circ} \text{C}$  i czasach do 200 godz. wyładowania niezupełne na powierzchni izolacji nie wpływają na skrócenie czasu do przebicia nawet wtedy, kiedy różnice w amplitudzie wyładowań przy napięciu 21,6 kV dochodzą do trzech rzędów wielkości /od 4 pC do 3600 pC/. Nie wyklucza to możliwości wpływu tych wyładowań w innych warunkach, na przykład przy dłuższych czasach do przebicia /mniejsze naprężenia lub lepsza jakość polietylenu / lub w innych warunkach termicznych.

2. W celu szerszego wyjaśnienia wpływu powierzchniowych wyładowań niezupełnych na wytrzymałość kabli i lepszej oceny ich jakości należy przeprowadzić badania w warunkach bardziej zbliżonych do eksploatacyjnych /mniejsze naprężenia, dłuższe czasy, nagrzewanie/.

3. Poszukiwań związku między intensywnością wyładowań niezupełnych a wytrzymałością elektryczną długotrwałą kabli nie należy ograniczać tylko do parametrów wyładowań zmierzonych przed badaniami wytrzymałości, ale mierzyć również parametry wyładowań przy napięciu probierczym długotrwałym.

4. Poszukiwanie wymienionych korelacji jest bardzo trudne i dla postawienia wniosków ogólnych należałoby wykonywać badania korelacji wielokrotnych uwzględniające oprócz progu wyładowań i ładunku maksymalnego również inne parametry wyładowań niezupełnych.

## LITERATURA

1. Grzesiak K.: Niezawodność urządzeń elektrycznych. Warszawa 1965, PWN.
2. Rynkowski A.: Wpływ wartości napięcia na charakterystyki wyładowań niezupełnych kabli o izolacji polietylenowej. Zeszyty Naukowe PG nr 262, Elektryka XL 1977.
3. Rynkowski A.: Wpływ czasu działania napięcia na charakterystyki wyładowań niezupełnych w kablach w.n. o izolacji polietylenowej. Energetyka nr 1, 1978.
4. Rynkowski A.: Wpływ obciążenia prądowego na intensywność wyładowań niezupełnych w kablach elektroenergetycznych wysokiego napięcia z izolacją polietylenową. Energetyka nr 5, 1978.
5. Rynkowski A.: Badania intensywności wyładowań niezupełnych w kablach z wprowadzonymi wadami technologicznymi i mechanicznymi. Zeszyty Naukowe PG nr 289 Elektryka XLV 1978.
6. Rynkowski A.: Wytrzymałość elektryczna kabli z wprowadzonymi wadami. Zeszyty Naukowe PG nr 289, Elektryka XLV 1978.
7. Rynkowski A.: Metoda lokalizacji wyładowań niezupełnych występujących na zewnątrz izolacji kabli. Materiały konferencyjne "Doświadczenia w zakresie budowy i eksploatacji kabli i linii kablowych średnich i wysokich napięć". SEP, BFK 1978, Bydgoszcz.
8. Rynkowski A.: Stanowisko do badań odporności kabli wysokiego napięcia na wyładowania niezupełne przy napięciu przemiennym, udarowym i naprężeniach termicznych. Zeszyty Naukowe PG nr 262 Elektryka XL, 1977.

## Summary

## ELECTRIC STRENGTH OF THE CABLES WITH INTENSIVE PARTIAL DISCHARGES ONTO SURFACE OF THE POLYETHYLENE INSULATION

The results of endurance tests at 90 kV of two groups of samples of power cable type YHAKX 1x70 mm<sup>2</sup> were compared. One group of samples was prepared to have a high intensity of the partial discharges by washing out of graphite from the surface of polyethylene insulation. The ana-



Analysis of the results was made on the base of the Weibull's distribution law. It was confirmed that the life distribution of the cable samples at 20 kV/mm, 20°C and time to 200 hours doesn't depend on intensity of partial discharges.