

Mgr inż. Leszek Palion  
Instytut Maszyn i Sterowania  
Układów Elektroenergetycznych  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
w Krakowie

## HIPOTEZY DOTYCZĄCE KSZTAŁTU ROZKŁADÓW IMPULSÓW NAPIĘCIOWYCH W ZANIKAJĄCYCH FORMACH WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

W wyniku pomiarów wyładowań niezupełnych za pomocą analizatorów amplitud otrzymuje się szeregi rozdzielcze podające liczbę impulsów napięciowych przenoszących dany ładunek. Szeregi te można przedstawić graficznie w postaci tzw. rozkładów empirycznych.

Rozkłady empiryczne otrzymane w efekcie zbadania obiektów tego samego rodzaju są zbliżone pod względem kształtu, co wskazuje na występowanie prawidłowości w mechanizmie fizycznym działania wyładowań.

Można je więc aproksymować pewnym założonym rozkładem teoretycznym, którego przebieg uważany będzie za typowy dla danego rodzaju wyładowań.

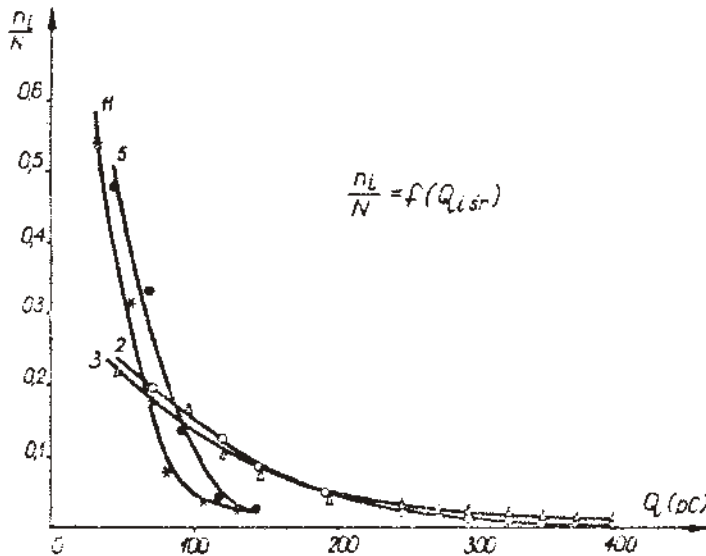
Znajomość typowych rozkładów teoretycznych dla prostych form wyładowań posiada dwojakie znaczenie:

po pierwsze ułatwia analizowanie przypadków złożonych, w których rozkład jest rezultatem działania kilku form równocześnie /praktycznie zwykle dwóch/, po drugie jeśli w wyniku dalszych badań uzyska się szczegółowe informacje o zmianach parametrów opisowych rozkładów wyładowań w funkcji czasu, wówczas można będzie wyrazić ogólną zależność zmian zachodzących w czasie podczas wyładowań, czyli opisać proces stochastyczny jakiemu one podlegają.

W pracy niniejszej przyjęto za podstawę materiał doświadczalny, opisany w artykule [4], na podstawie którego postanowiono obliczyć

rozkłady teoretyczne dla zanikających form wyładowań w izolacji kablowej. Materiał ten stanowiły wyniki pomiarów przeprowadzonych na kilkunastu odcinkach kabla w różnych momentach od chwili rozpoczęcia próby napięciowej aż do chwili całkowitego zaniku wyładowań w kablu.

W celu statystycznego ich opracowania sporządzono szeregi rozdzielcze zależności  $n_i = f/Q_{i\dot{s}r}$  przyporządkowujące każdemu przedziałowi ładunków  $Q_i \div Q_{i+1}$  /przedział klasowy szeregu/ o ładunku przeciętnym  $Q_{i\dot{s}r}$  /wariant klasowy szeregu/ liczbę impulsów  $n_i$  /liczebność klasy/, częstość klasy  $\frac{n_i}{N}$  /stosunek liczebności klasy do sumy liczebności wszystkich klas szeregu  $N$ / oraz częstość skumulowaną  $\frac{\sum_{k=1}^i n_k}{N}$  /suma częstości danej klasy i wszystkich klas poprzednich szeregu/. Następnie zależność  $\frac{n_i}{N} = f/Q_{i\dot{s}r}$  przedstawiono graficznie otrzymując tzw. rozkłady empiryczne /rys.1/.



Rys.1. Rozkłady empiryczne  $\frac{n_i}{N} = f/Q_{i\dot{s}r}$  impulsów wyładowań niezupełnych: 2,3 - przypadki wolnozaniwiających form wyładowań, 5,11 - przypadki szybko zanikających form wyładowań.

Kształtki tych rozkładów oraz rozważania teoretyczne dotyczące statystycznego opisu zjawiska wyłączeń pozwoliły na postawienie hipotezy nieparametrycznej, że są one rozkładami wykładniczymi dwuparametrycznymi, których gęstości i dystrybuanty wyrażają się ogólnymi wzorami:

$$f/Q = \begin{cases} \lambda \cdot \exp[-\lambda \cdot (Q - Q_0)] & \text{dla } Q \geq Q_0 \\ 0 & \text{dla } Q < Q_0 \end{cases} \quad /1/$$

$$F/Q = \begin{cases} 1 - \exp[-\lambda \cdot (Q - Q_0)] & \text{dla } Q \geq Q_0 \\ 0 & \text{dla } Q < Q_0 \end{cases} \quad /2/$$

Aby zweryfikować tę hipotezę należało przeprowadzić testy zgodności dla dowolnie wybranych rozkładów empirycznych. W tym celu wyznaczono konkretne wartości parametrów  $\lambda$  i  $Q_0$  dla kilku rozkładów empirycznych za pomocą wyrównania ich częstości skumulowanych na siatkach funkcyjnych rozkładu wykładniczego /rys.2/, a następnie wstawiono je do wzorów /1/ i /2/. I tak przykładowo aproksymujący rozkład teoretyczny dla poszczególnych odcinków kabla miał dystrybuanty następującej postaci:

odcinek kabla nr.2:

$$F/Q = 1 - \exp[-0,0137/(Q-27)]$$

odcinek kabla nr.3:

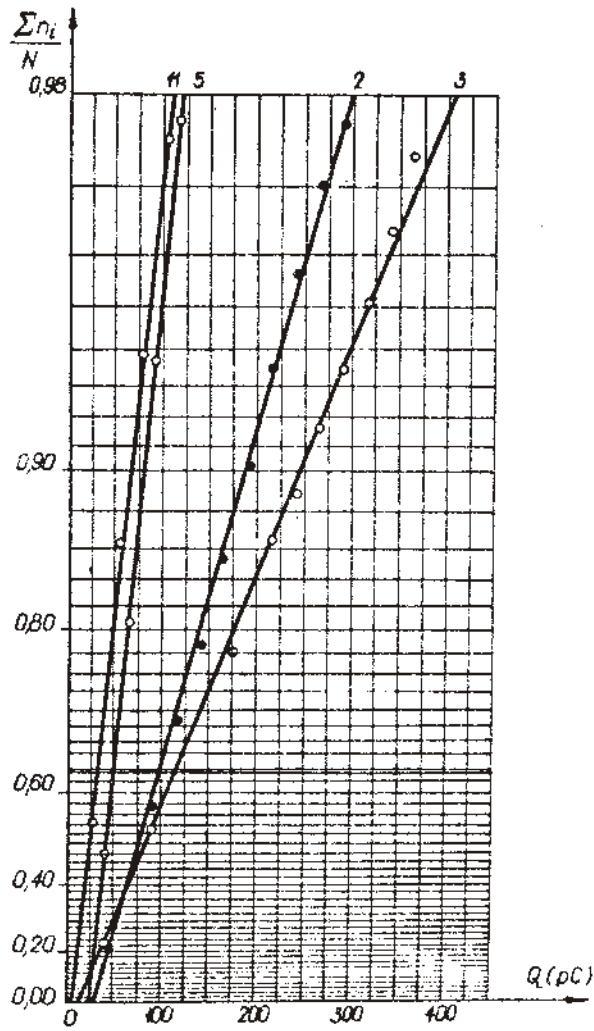
$$F/Q = 1 - \exp[-0,0102/(Q-18)]$$

odcinek kabla nr.5:

$$F/Q = 1 - \exp[-0,04/(Q-26)]$$

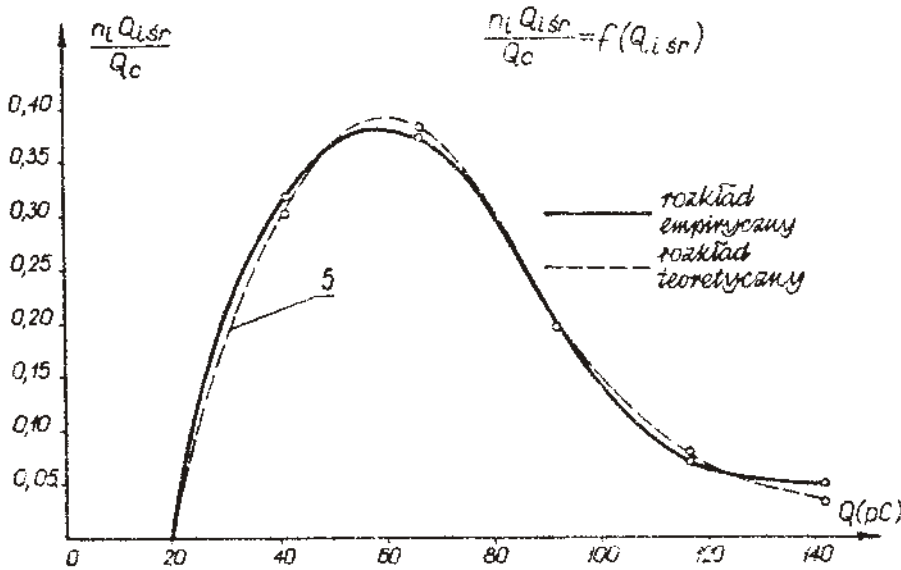
odcinek kabla nr.11:

$$F/Q = 1 - \exp[-0,0435/(Q-23)]$$



Rys.2. Wyrównywanie częstości skumulowanych rozkładów empirycznych  $\frac{\sum n_i}{N} = f/Q_{i\text{ér}}$  na siatce rozkładu wykładniczego.

Dla tych odcinków kabla dokonano weryfikacji hipotezy nieparametrycznej za pomocą testu zgodności Kolmogorowa-Smirnowa przy założonym poziomie istotności hipotezy  $\alpha = 0,01$ . Dowiodła ona, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, że rozkłady  $\frac{n_i}{N} = f/Q_{i,sr}$  są rozkładami wykładniczymi dwuparametrycznymi /graficzne porównanie rozkładów empirycznych i teoretycznych przedstawiono na rys.3/.



Rys.5. Porównanie rozkładów empirycznych  $\frac{n_i}{N} = f/Q_{i,sr}$  z aproksymującymi je rozkładami teoretycznymi.

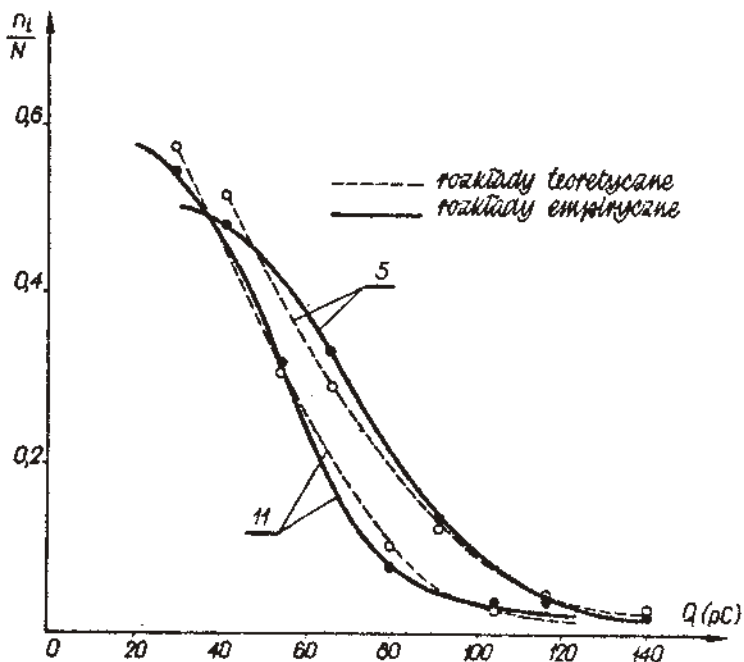
Jeżeli chodzi o zmiany rozkładów  $\frac{n_i}{N} = f/Q_{i,sr}$  wyładowań częściowych zanikających w funkcji czasu, to można po naniesieniu ich częstości skumulowanych na siatki funkcyjne sądzić, że pozostają one w dalszym ciągu rozkładami wykładniczymi, lecz z biegiem czasu wzrasta ich funkcja ryzyka  $\lambda$ . Hipotezy tej jednak do tej pory nie zweryfikowano.

W dalszym ciągu opracowywania wyników pomiarów zbadano zależność całkowitego ładunku przeniesionego przez impulsy danego przedziału klasowego od przeciętnego ładunku pojedynczego impulsu  $n_i \cdot Q_{i\text{sr}} = f / Q_{i\text{sr}}$ . Zależność tę otrzymano z poprzedniej zależności  $n_i = f / Q_{i\text{sr}}$  dla poszczególnych odcinków kabli wymnażając liczebności poszczególnych przedziałów klasowych  $n_i$  przez odpowiadające im warianty klasowe  $Q_{i\text{sr}}$ .

Również dla tych zależności utworzono szeregi rozdzielcze i wyznaczono rozkłady empiryczne  $\frac{Q_{i\text{sr}} \cdot n_i}{Q_c} = f / Q_{i\text{sr}}$ .

$Q_c = \sum n_i \cdot Q_{i\text{sr}}$  - całkowity ładunek przenoszony przez wszystkie impulsy w danym odcinku kabla/.

Przykłady tych rozkładów w formie graficznej przedstawiono na rys.4.



Rys.4. Rozkłady empiryczne  $\frac{n_i \cdot Q_{i\text{sr}}}{Q_c} = f / Q_{i\text{sr}}$  impulsów wyładowań

niezapełnionych: 2,3 - przypadki wolnozaniakających form wyładowań, 5,11 - przypadki szybkozaniakających form wyładowań.

Podobnie jak i poprzednio kształty rozkładów oraz rozważania teoretyczne pozwoliły na postawienie hipotezy, że są one rozkładami gamma w przypadku odpowiadającym wyładowaniom szybko zanikającym niezbyt zróżnicowanym w grupie /o niewielkim rozstępie ładunku  $Q_{\max} - Q_{\min}$  / lub rozkładami Weibulla w przypadku większego zróżnicowania ładunków pojedynczego impulsu dla wolnozaniwiających form wyładowań.

Dla rozkładu teoretycznego gamma gęstość i dystrybuanta wyrażają się następującymi wzorami:

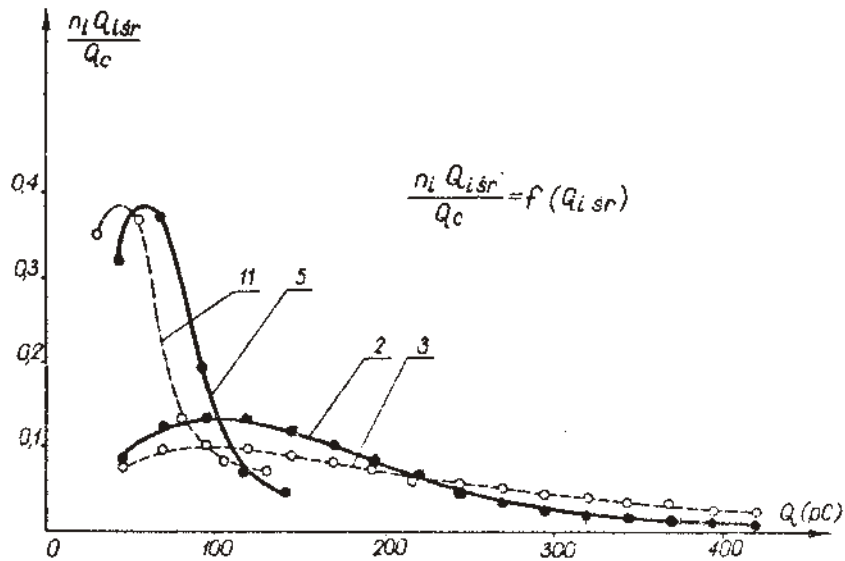
$$f/Q = \begin{cases} \frac{\lambda^r / Q - Q_0 /^{r-1}}{\Gamma(r)} \cdot \exp[-\lambda / Q - Q_0 /] & \text{dla } Q \geq Q_0 \\ 0 & \text{dla } Q < Q_0 \end{cases} \quad /3/$$

$$F/Q = \begin{cases} 1 - \exp[-\lambda / Q - Q_0 /] \cdot \sum_{k=0}^{r-1} \frac{[\lambda / Q - Q_0 /]^k}{k!} & \text{dla } r\text{-naturalne} \\ & Q \geq Q_0 \\ 0 & \text{dla } Q < Q_0 \end{cases} \quad /4/$$

Aby zweryfikować hipotezę o aproksymacji powyższych rozkładów empirycznych rozkładem gamma wyznaczono dla jednego z rozkładów empirycznych parametry opisowe i za ich pomocą określono dystrybuantę rozkładu teoretycznego, która przyjęła następującą postać:

$$F/Q = 1 - \exp[-0,05/Q-20/] \cdot \sum_{k=0}^1 [0,05/Q-20/]^k$$

a następnie zastosowano test zgodności Kolmogorowa-Smirnowa, który dla założonego poziomu istotności  $\alpha = 0,01$  wykazał, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy /graficzne porównanie rozkładu empirycznego i teoretycznego dla tego przypadku przedstawiono na rys.5/.

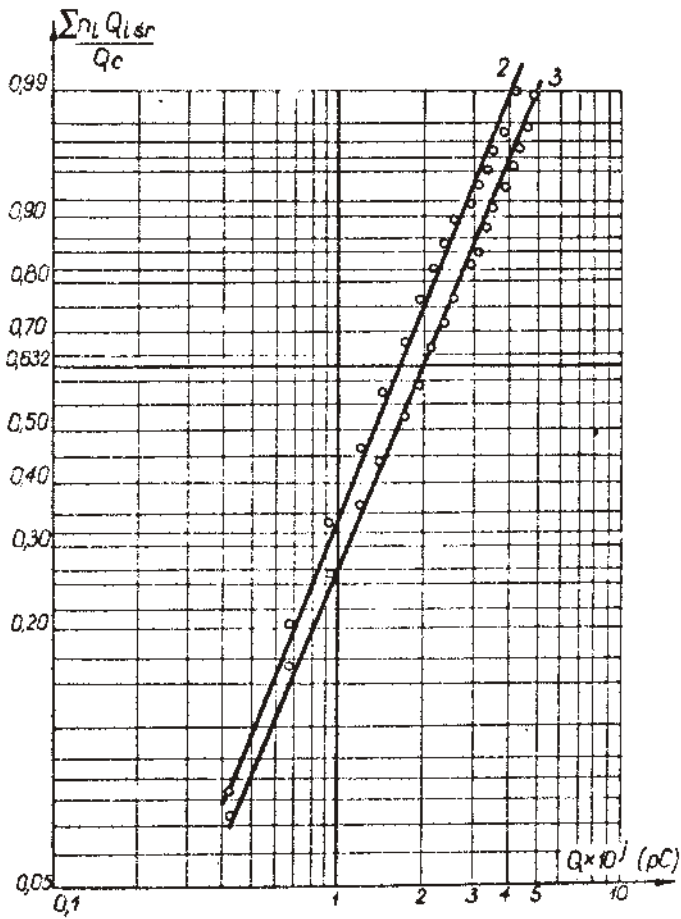


Rys.5. Porównanie rozkładu empirycznego  $\frac{n_i \cdot Q_{i,sr}}{Q_c} = f/Q_{i,sr}/$  impulsów wyładowań niezupełnych z aproksymującą je rozkładem teoretycznym dla przypadku wyładowań szybkozanikających.

Gdy zakres ładunków przenoszonych przez pojedyncze impulsy w trakcie wyładowań częściowych zanikających był większy lepszą aproksymacją rozkładów empirycznych  $\frac{Q_{i,sr} \cdot n_i}{Q_c} = f/Q_{i,sr}/$  otrzymywało się stosując rozkład teoretyczny Weibulla, którego gęstość i dystrybuanta wyrażają się następującymi wzorami:

$$f/Q = \begin{cases} \frac{1}{\beta} / Q - Q_0 / \beta^{-1} \cdot \exp \left[ - \frac{1/Q - Q_0 / \beta}{\beta} \right] & \text{dla } Q \geq Q_0 \\ 0 & \text{dla } Q < Q_0 \end{cases} \quad /5/$$





Rys.6. Wyrównywanie częstości skumulowanych rozkładów empirycznych  $\frac{n_i Q_{i\text{sr}}}{Q_c} = f/Q_{i\text{sr}}$  / na siatce rozkładu Weibulla dla wólnozani-  
kających form wyładowań.

$$F/Q = \begin{cases} 1 - \exp \left[ - \frac{(Q-Q_0)^{\beta}}{\beta} \right] & \text{dla } Q \geq Q_0 \\ 0 & \text{dla } Q < Q_0 \end{cases} \quad /6/$$

Dla tego przypadku nie przeprowadzono jeszcze weryfikacji hipotezy o zgodności rozkładów empirycznych z teoretycznymi, a dokonano jedynie subiektywnej oceny zgodności za pomocą wyrównania dystrybuant empirycznych na siatce funkcyjnej rozkładu Weibulla, co przedstawione zostało na rys.5.

Podsumowując powyższe rozważania można stwierdzić, że analiza statystyczne wyników badań dotyczących wyładowań częściowych w izolacji kabli nie obaliła hipotez dotyczących kształtów rozkładów impulsów napięciowych dla zanikających form wyładowań oraz potwierdziła prawidłowy kierunek rozważań teoretycznych, zmierzających do znalezienia związków pomiędzy charakterystykami ilościowymi różnych form wyładowań a ich mechanizmem fizycznym.

#### Literatura

1. Palion L., Włodek R. - Rozkłady impulsów i ich parametry opisowe jako metoda badania zmian różnych form wyładowań niezupełnych. Symposium "Wyładowania niezupełne jako czynnik destrukcji izolacji" AGH-IRME Krościenko 72