

TADEUSZ STĘPNIEWSKI, ZBIGNIEW GACEK

Katedra Technologii i Metrologii Elektrycznej

STATYSTYCZNA OCENA WYTRZYMAŁOŚCI MECHANICZNEJ IZOLATORÓW WISZĄCYCH DŁUGOPNIOWYCH

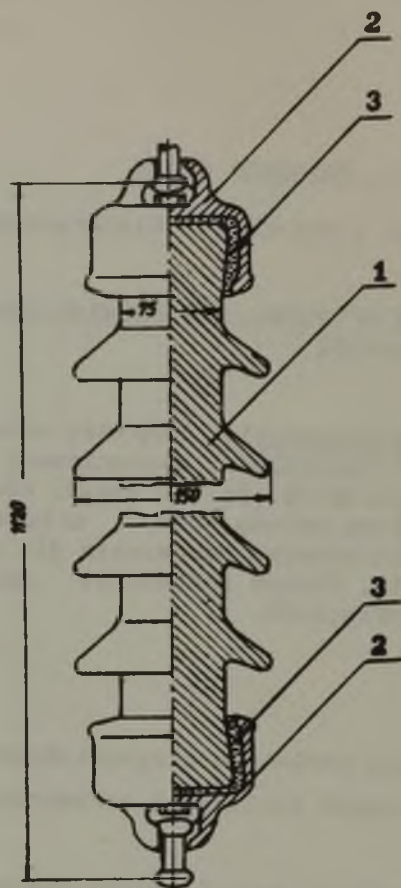
Streszczenie. Omówiono obecne sposoby oceny wytrzymałości mechanicznej izolatorów długopniowych. Podano zasady oceny statystycznej. Nową metodę oceny zilustrowano przykładem liczbowym, odnoszącym się do izolatorów LP 75/12. Podano propozycje zmian obowiązujących przepisów.

1. Wprowadzenie

Układ konstrukcyjny izolatora długopniowego, przedstawiony na rys. 1, obejmuje część izolacyjną ceramiczną i dwa kołpaki połączone spoiwem.

Izolator ma spełniać zadania elektryczne oraz zadania mechaniczne, wynikające z obciążenia przewodem, sadią i ciężarem własnym łańcuchów przelotowych lub naciągu przewodu w łańcuchach odciągowych.

Własności mechaniczne scharakteryzowane są wytrzymałością mechaniczną na rozciąganie, którą wg PN-64/E-02051 [4] określa się jako wartość obciążenia mechanicznego, wytrzymywaną przez izolator bez uszkodzenia mechanicznego w określonych warunkach przeprowadzania próby. Nie są stawiane wymagania, określające która ze składowych części ma ulec zniszczeniu. Konstrukcję i materiały dobiera się oczywiście tak, aby skoordynować wytrzymałość części składowych.



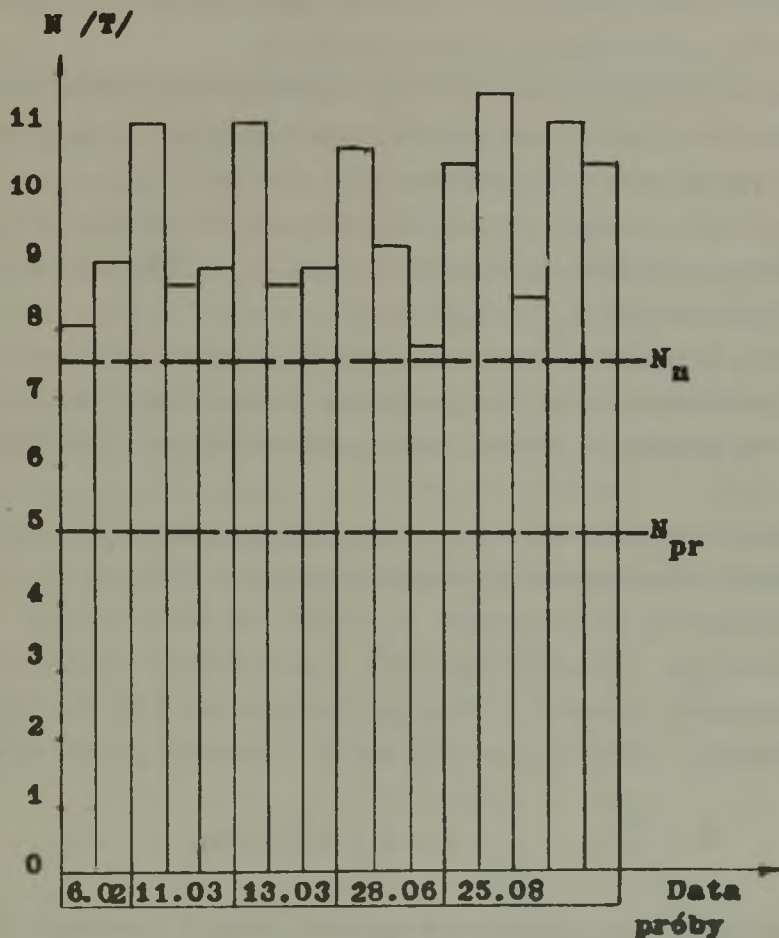
Rys. 1. Izolator długopniowy LP 75/12

1 - część izolacyjna, 2 - kołpaki, 3 - spoiwo

Praktycznie najczęściej występuje zniszczenie części ceramicznej, zwykle w pobliżu kołpaka, rzadziej zniszczenie okuć. Przy niewłaściwym montażu lub złym spoiwie możliwe jest jednak również i zniszczenie spoiwa.

Wytrzymałość mechaniczną izolatorów określonej konstrukcji i wykonanych zgodnie z wymaganiami odnośnie materiałów i technologii, przeprowadza wytwórca na podstawie niszczących prób wyrywkowych (rys. 2). Określona nominalna wartość wytrzymało-

ści mechanicznej N_n nie gwarantuje jednak wytrzymałości wszystkich sztuk izolatorów odbieranych przez odbiorcę, na skutek znacznych rozrzutów wytrzymałości poszczególnych sztuk.



Rys. 2. Przykład zestawienia obciążeń zrywających dla izolatorów LP 75/12 produkowanych w 1960 roku w Zakładach Porcelany Elektrotechnicznej w Boguchwale

Aby wyeliminować sztuki obciążone wadami materiałowymi lub usterkami technologicznymi i zapewnić użytkownikowi wartość obciążeń mechanicznych, które można uznać za pewne (gwarantowane)

przeprowadza się próbę mechaniczną wyrobu, przez obciążenie każdej sztuki naciągiem probierczym N_{pr} . Wartość obciążenia probierczego przyjmuje się możliwie wysoko, ale przyjęta wartość nie może powodować trwałych odkształceń okuć lub spoiwa, któreby nadwyrężyły badane izolatory.

Zgodnie z wymaganiami PN-66/E-06308 [5] obciążenie probiercze 1 minutowe izolatorów długopniowych przyjmuje się w wysokości ok. 70% znamionowej wytrzymałości mechanicznej.

Dla stosowanych najczęściej w kraju izolatorów LP75/12 [6] wytrzymałość mechaniczna znamionowa $N_n = 7500$ kG, a obciążenie probiercze $N_{pr} = 5000$ kG.

Dla określenia dopuszczalnego obciążenia mechanicznego przy projektowaniu linii przyjmuje się współczynnik bezpieczeństwa σ ; wg przepisów budowy linii napowietrznych (PN-67/E-05100) $\sigma = 2,5$.

Przy odbiorze partii izolatorów przeprowadzane są próby kontrolne na losowo pobranych próbkach o liczności n sztuk, uzależnionej od liczności N_0 partii izolatorów, pod którą rozumie się izolatory wykonane w jednakowych warunkach technologicznych. Zgodnie z obecnymi wymaganiami [5] dla partii o liczności $4000 \leq N_0 \leq 20\ 000$ sztuk, licznosc próbki wynosi

$$n = 6 + 0,0015 N_0 \quad (1)$$

W przypadku nie spełnienia wymagań przez 1 izolator w czasie próby mechanicznej przeprowadza się próbę powtórna na podwójnej liczbie izolatorów w stosunku do liczby izolatorów próby pierwszej. W przypadku ujemnego wyniku prób powtórnych choćby na jednym izolatorze, partię izolatorów uznaje się za nieodpowiadającą warunkom wykonania.

Obecny sposób określenia i sprawdzania wytrzymałości mechanicznej nie jest wystarczający, gdyż nie daje dostatecznie

ściślej oceny odbieranej partii i ryzyka wytwórcy i odbiorcy. Potrzebna jest ocena jakościowa odbieranej partii izolatorów, która zapewniałaby, że wadliwość partii nie przekroczy z góry założonej wartości przy określonym ryzyku popełnienia błędu.

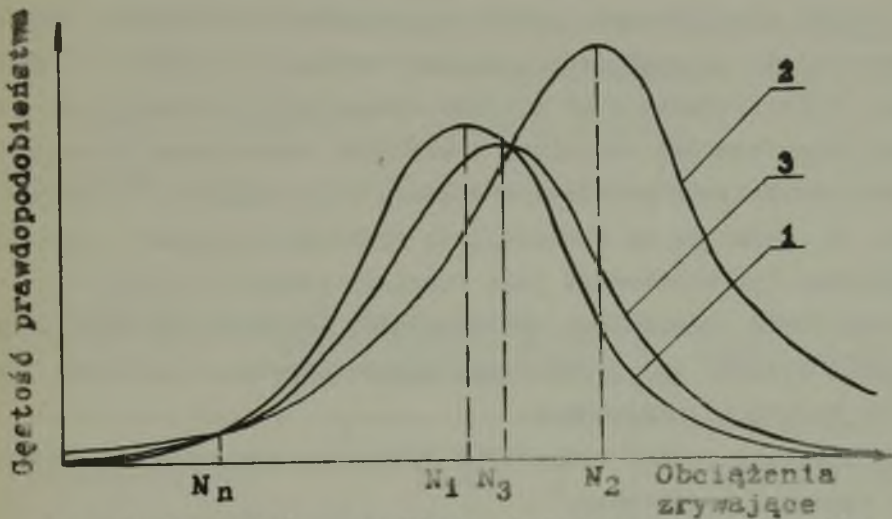
2. Zasady statystycznej oceny wytrzymałości mechanicznej

Różnice własności mechanicznych składowych części izolatora wynikają z układu konstrukcyjnego, różnych własności materiałowych i procesów technologicznych.

Dla każdej z części składowych występują znaczne rozrzuty własności średnich, będące wynikiem wpływów losowych, występujących w postaci odchyłek wymiarów, niejednorodności i wad w materiale, odchyłek w procesach produkcyjnych i innych.

Na rysunku 3 przedstawiono poglądowo gęstość prawdopodobieństwa naciągów zrywających części składowych izolatora.

Koordinację mechaniczną uzyskuje się przez odpowiednie rozwiązanie konstrukcyjne, pociągające za sobą przesunięcia krzywych



Rys. 3. Przykładowe rozkłady obciążeń zrywających dla:
1 - części porcelanowej, 2 - okuć, 3 - spoiwa

gęstości prawdopodobieństwa przy zmianie średnich naciągów zrywających. Odbiorcę interesuje izolator jako układ o określonej znamionowej wytrzymałości mechanicznej N_n .

Określenie tej wytrzymałości może być przeprowadzone na podstawie badania niewielkiej liczby próbek reprezentujących losowo produkcję o ustalonej technologii. Wartość znamionową wytrzymałości mechanicznej nie jest wartością gwarantowaną, a obarczona jest możliwością zniszczenia izolatora przy naciągu mniejszym od znamionowego. Jako znamionową wytrzymałość mechaniczną na rozciąganie należy więc przyjąć wartość obciążenia, które izolator wytrzymuje bez uszkodzenia części izolacyjnej, okuć lub spoiwa w określonych warunkach próby i przy określonej wadliwości nominalnej.

Warunki próby i wartość nominalnej wadliwości powinny być określone w warunkach technicznych, uzgodnionych między wytwórcą i zamawiającym, a w przypadku wyrobów znormalizowanych, wymagają określenia w normach przedmiotowych.

W celu wykorzystania pomiarów naciągów zrywających izolatorów należy uporządkować posiadane wyniki naciągów w próbkach. Wykorzystanie tych wyników wymaga potwierdzenia, że rejestrowany rozkład odpowiada rozkładowi normalnemu. Przeprowadzone weryfikacje rozkładu w oparciu o kryterium χ^2 Pearsona oraz λ Kołmogorowa wykazały, że rozkłady naciągów zrywających mogą być traktowane jako rozkłady normalne (tabl. 4).

Ustalenie znamionowej wytrzymałości mechanicznej wymaga założenia ryzyka, tj. prawdopodobieństwa zerwania izolatora poniżej wartości znamionowej.

Przy odbiorze partii izolatorów występują sprzeczności interesów wytwórcy i odbiorcy.

Wytwórca broni się przeciwko możliwości odrzucenia sztuk dobrych, które mogą być zakwalifikowane jako wadliwe, natomiast odbiorca wymaga wysokiej jakości i związanej z tym niezawodno-

ści pracy izolatorów, co wiąże się z obawą przed odbiorem partii zawierającej sztuki złej jakości.

Uwzględniając praktyczne pogodzenie interesów odbiorcy i wytwórcy przyjmowane są w różnych przypadkach wadliwości nominalne w granicach $w_n = 0,46 - 1,5\%$, przy czym wyższa wartość wydaje się najbardziej odpowiednią.

Wartość nominalna wymaga zapewnienia, że ryzyko dostawcy nie przekroczy $\alpha = 0,05$ a ryzyko odbiorcy $\beta = 0,10$.

Statystyczna ocena wytrzymałości mechanicznej izolatorów sprowadza się do postawienia i zweryfikowania hipotezy statystycznej, że dowolnie wybrany z partii izolatorów ulegnie zerwaniu, gdy wartość naciągu przekroczy wartość naciągu znamionowego, przy założonym z góry współczynniku ryzyka. Metoda oceny wytrzymałości mechanicznej izolatorów na zasadach statystycznych jest przedmiotem dyskusji międzynarodowej w ramach Komitetu 36 IEC.

Poniżej podano przebieg obliczeń przy przyjęciu licznosci partii i próbki wg tabl. 1 i nominalnej wadliwości $w_n = 1,5\%$.

1. Określić licznosc N_0 partii izolatorów.
2. Wybrać losowo z partii próbkę o licznosci n (tabl. 1).

Tablica 1

Proponowana licznosc próbki (n) w zaleznosci od licznosci partii (N_0) i stała przyjęcia partii k przy znamionowej wadliwości $w_n = 1,5\%$ [7]

Licznosc partii	Licznosc próbki n	Stala przyjęcia k
$N_0 < 300$	wynaga uzgodnienia między wytwórcą a odbiorcą	
$300 \leq N_0 \leq 1200$	5	1,4

cd. tablicy 1

Liczność partii	Liczność próbki n	Stała przyjęcia k
$1200 < N_0 \leq 3000$	10	1,58
$3000 < N_0 \leq 10000$	15	1,65
$10000 < N_0$	odbieraną liczbę izolatorów dzieli się na partie < 10000	

3. Określić naciągi zrywające poszczególnych sztuk z próbki:

$$N_1, N_2, \dots, N_n.$$

4. Obliczyć sumę pomierzonych naciągów:

$$N_i = N_1 + N_2 + \dots + N_n$$

5. Obliczyć sumę kwadratów pomierzonych naciągów:

$$N_i^2 = N_1^2 + N_2^2 + \dots + N_n^2$$

6. Obliczyć współczynnik korekcyjny W_k :

$$W_k = \frac{(\sum N_i)^2}{n}$$

7. Obliczyć skorygowaną sumę kwadratów:

$$\sum N_i^2 - W_k$$

8. Obliczyć wartość W :

$$W = \frac{\sum N_i^2 - W_k}{n-1}$$

9. Obliczyć odchylenie standartowe s :

$$s = \sqrt{W} = \sqrt{\frac{\sum N_i^2 - W_k}{n-1}}$$

10. Obliczyć średnią wartość naciągu zrywającego w próbkach \bar{N} :

$$\bar{N} = \frac{N_1 + N_2 + \dots + N_n}{n}$$

11. Podać znamionową wartość wytrzymałości mechanicznej N_n (z warunków technicznych)

12. Obliczyć wskaźnik jakości Q_s :

$$Q_s = \frac{\bar{N} - N_n}{s}$$

13. Określić stałą przyjęcia k (tab. 1).

14. Kryterium akceptacji:

a) zgodność z wymaganiami gdy $Q_s \geq k$ - przyjęcie partii,

b) niezgodność z wymaganiami gdy $Q_s < k$ - odrzucenie partii.

3. Obliczenie funkcji rozkładu dla izolatorów LP 75/12

Obliczenia przeprowadzono na podstawie wyników pomiaru naciągów zrywających dla $n = 98$ izolatorów długopniowych LP 75/12 wyprodukowanych w Zakładach Porcelany w Boguchwale w latach 1964-1965.

Uporządkowane wyniki pomiarów dla 11 przedziałów o szerokości 500 kG oraz podstawowe zależności statystyczne zestawiono w tablicy 2 i 3. W tablicy 4 zestawiono obliczenia weryfikacji rozkładu wg kryterium χ^2 (Pearsona), które pozwalają na przyjęcie hipotezy, że rozkład prawdopodobieństwa naciągów zrywających jest normalny. Zostało to potwierdzone również obliczeniem wg kryterium λ (Kolmogorowa).

Na podstawie danych statystycznych z próbek izolatorów określiła się parametry rozkładu teoretycznego.

Tablica 2

Przedziały zmiennej losowej naciągów zrywających, podstawowe funkcje i statystyki próbeki 98 sztuk izolatorów długopniowych LP 75/12

Nr przedziału	Granice przedziału	Środek przedziału N_i	Częstość empiryczna n_i	Częstość względną $w_i = \frac{n_i}{n}$	Dystrybuanta empiryczna $\bar{w}_j = \frac{\sum_{i=1}^j n_i}{n}$	Wartość średnia z próbeki $N_{\bar{sr}}$	Odchylenie średnie z próbeki S
-	$\times 10^3$ kg	kg		-	-	kg	kg
1	7,5-8,0	7,75	2	0,020	0,020	10,189	1142
2	8,0-8,5	8,25	5	0,051	0,071		
3	8,5-9,0	8,75	10	0,102	0,173		
4	9,0-9,5	9,25	13	0,133	0,306		
5	9,5-10,0	9,75	11	0,112	0,418		
6	10,0-10,5	10,25	18	0,184	0,602		
7	10,5-11,0	10,75	12	0,122	0,724		
8	11,0-11,5	11,25	14	0,143	0,867		
9	11,5-12,0	11,75	8	0,082	0,949		
10	12,0-12,5	12,25	4	0,041	0,990		
11	12,5-13,0	12,75	1	0,010	1,000		

Tablica 3

Unormowana częstość względna, gęstość prawdopodobieństwa i dystrybuanta teoretyczna rozkładu naciągów zrywających izolatorów LP 75/12

Nr prze- działu	Środki prze- działu N_i	Unormowana częstość względna $w_i \frac{s}{\Delta N}$	Gęstość prawdopo- dobieństwa $f(N_i^0)$	Dystrybuanta teoretyczna $F(N_i^0)$
-	$\times 10^3$ KG	-	-	-
1	7,75	0,0457	0,040	0,016
2	8,25	0,1170	0,094	0,055
3	8,75	0,2330	0,180	0,104
4	9,25	0,3060	0,284	0,206
5	9,75	0,2560	0,370	0,305
6	10,25	0,4200	0,396	0,549
7	10,75	0,2790	0,354	0,688
8	11,25	0,3270	0,261	0,824
9	11,75	0,1188	0,157	0,914
10	12,25	0,0937	0,070	0,964
11	12,75	0,0229	0,032	0,984

Tabela 4

Przebieg stosowania kryterium χ^2 Pearsona dla sprawdzenia hipotezy o normalności rozkładu naciągów zrywających badanych izolatorów LP 75/12

Nr przedziału i	Granice przedziału	Środek przedziału	Częstość empiryczna	Unormowany środek przedziału	Gęstość prawdopodobieństwa	np_i	$(n_i - n \cdot p_i)^2$	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
-	$\times 10^3$ kg	$\times 10^3$ kg	szt.	-	-	-	-	-
1	7,5-8,0	7,75	2	2,14	0,040	1,935	8,250	0,53
2	8,0-8,5	8,25	5	1,70	0,094	4,243		
3	8,5-9,0	8,75	10	1,26	0,180	7,950		
4	9,0-9,5	9,25	13	0,82	0,284	12,410		
5	9,5-10,0	9,75	11	0,39	0,370	15,800		
6	10,0-10,5	10,25	18	0,12	0,396	17,200		
7	10,5-11,0	10,75	12	0,49	0,354	15,390		
8	11,0-11,5	11,25	14	0,93	0,261	11,440		
9	11,5-12,0	11,75	8	1,36	0,157	6,960		
10	12,0-12,5	12,25	4	1,80	0,078	3,560		
11	12,5-13,0	12,75	1	2,24	0,032	1,122		
							$\chi^2 = 3,22$	

Przy założonym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ i stopniu swobody $r = 7-3 = 4$; $\chi^2_d = 3,36 > \chi^2 = 3,22$, czyli brak podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu.

Przyjmując rozkład normalny, przedział ufności dla środka zgrupowania naciągów zrywających przy nieznanym odchyleniu średnim wynosi

$$\bar{N}_{\text{śr}} - t_{q,k-1} \frac{s}{\sqrt{k-1}} < \bar{N} < \bar{N}_{\text{śr}} + t_{q,k-1} \frac{s}{\sqrt{k-1}} \quad (2)$$

Z tablic statystycznych dla poziomu ufności $q = 5\%$ i $l = k - 1 = 10$; $t_{q,k-1} = 3,581$

$$10189 - 3,581 \cdot \frac{1142}{\sqrt{10}} < \bar{N} < 10189 + 3,581 \cdot \frac{1142}{\sqrt{10}}$$

$$8963 < \bar{N} < 11415 \quad (\text{kg})$$

Przedział ufności dla odchylenia średniego σ wynosi

$$\frac{\sqrt{k} s}{\chi_2} < \sigma < \frac{\sqrt{k} s}{\chi_1} \quad (3)$$

Na poziomie ufności $q = 5\%$, przy $k = 11$.

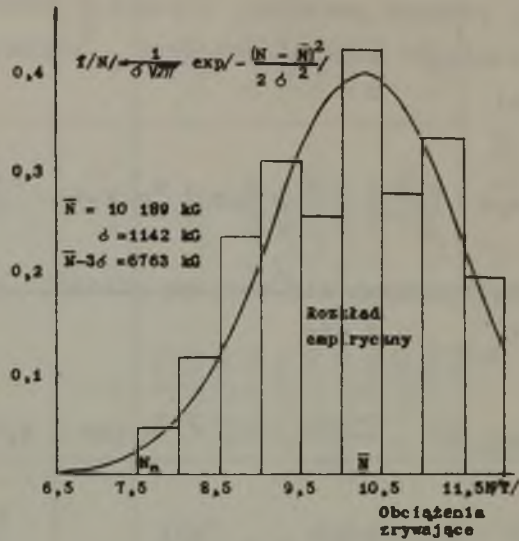
Z tablic statystycznych $\chi_2^2 = 20,2$ $\chi_1^2 = 7,72$

a więc

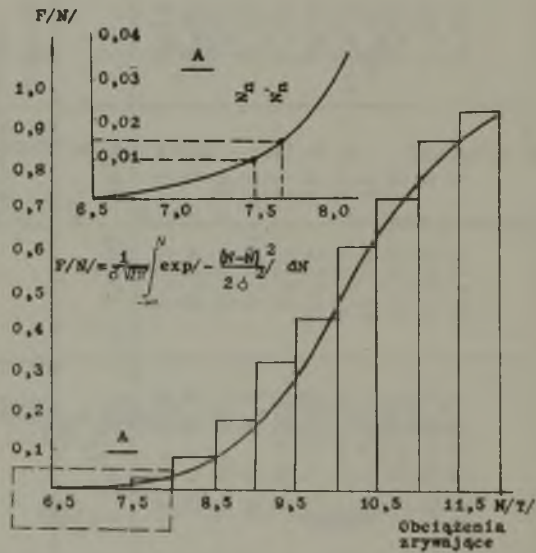
$$\frac{3,32 \cdot 1142}{4,5} < \sigma < \frac{3,32 \cdot 1142}{2,78}$$

$$843 < \sigma < 1365 \quad (\text{kg})$$

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono graficznie przebiegi funkcji gęstości prawdopodobieństwa i dystrybuanty teoretycznej nacią-



Rys. 4. Gęstość prawdopodobieństwa rozkładu obciążeń dla izolatorów LP 75/12



Rys. 5. Dystrybuanta rozkładu obciążeń zrywających dla izolatorów LP 75/12

gów zrywających. Przebiegi teoretyczne funkcji nałożono na rozkłady empiryczne. Z rys. 5 wynika, że wartość wytrzymałości znamionowej przy wadliwości nominalnej $w_n = 1\%$ wynosi $N'_n = 7500$ kG, a przy $w_n = 1,5\%$ wynosi $N'_n = 7650$ kG. Wyniki obliczeń potwierdzają słuszność wartości $N_n = 7500$ kG przyjętej w normie [6].

4. Wnioski

Dotychczasowy sposób określania wytrzymałości znamionowej izolatorów długopniowych wg obowiązujących norm [4] i [6] oraz metody oceny jakości odbieranych partii [5] wymagają oparcia o metodę statystyczną.

Jako wytrzymałość znamionową należy przyjąć wartość obciążenia zrywającego przy określonej wadliwości, którą proponuje się przyjąć równą 1,5%.

W związku z wprowadzaniem nowych typów izolatorów długopniowych i przeprowadzaną nowelizacją normy [6] określanie wytrzymałości znamionowej należy oprzeć na metodzie statycznej i opracować metodę oceny wytrzymałości mechanicznej izolatorów w próbkach kontrolnych, nawiązując do aktualnych prac IEC.

Uaktualnienia wymaga również sposób doboru wytrzymałości mechanicznej izolatorów długopniowych i elektromechanicznej izolatorów kołpakowych do obciążeń obliczeniowych, przy czym jako podstawę doboru proponuje się przyjąć naciąg probierczy.

LITERATURA

- [1] Ciszak J., Czernicki St.: Statystyczna kontrola jakości w normach i praktycznym zastosowaniu. Wydawn. Norm. W-wa 1967.

- [2] Chorafas D.N.: Procesy statystyczne i niezawodność urządzeń. WNT Warszawa 1965.
- [3] Smirnow N.W.: Krótki kurs statystyki matematycznej dla zastosowań technicznych. Warszawa 1965.
- [4] PN-64/E-02051 Elektroenergetyczne izolatory wysokiego napięcia. Określenia, oznaczenia i klasyfikacja.
- [5] PN-66/E-06308 Elektroenergetyczne izolatory wysokiego napięcia. Izolatory liniowe. Wymagania ogólne i metody badań.
- [6] PN-61/91056 Elektroenergetyczne izolatory wysokiego napięcia. Izolatory liniowe wiszące długopniowe typu LP.
- [7] IEC 36B (Secretariat) 30 - May 1969. Draft - Sampling rules concerning tests of the second Group of Publication 274.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЫСОКИХ
ИЗОЛЯТОРОВ СТЕРЖНЕВОГО ТИПА

Р е з ю м е

В статье представлено способы оценки механического сопротивления изоляторов стержневого типа. Указано принципы статистической оценки. Новый метод оценки представлен численным примером для изоляторов типа ЛП 75/12. Подано предложения изменений обзывающих распоряжений.

THE STATISTICS APPRECIATION TO MECHANICAL ENDURANCE
FOR LONG ROD INSULATORS

S u m m a r y

The statistical methods of appreciation of mechanical endurance for long rod insulators are discussed.

New statistical methods for appreciation long rod insulators have been given and application of this method to the type LP 75/12 insulators shown.

The proposition to the change of valid standards have been given.