ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1976

Seria: Elektryka z. 52 Nr kol. 488

Zbigniew GACEK, Wiktor KIŚ

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

PRÓBA OCENY ZAWODNOŚCI ZABRUDZENIOWEJ IZOLACJI WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Streszczenie. Opierając się na wynikach statystycznej analizy przeskoków zabrudzeniowych, proponuje się metodę obliczania rocznej zawodności izolatorów wysokiego napięcia w warunkach naturalnych. Podaje się sposób postępowania w przypadku estymacji sezonowej intensywności przeskoków, określania rocznego modelu zawodności i charakterystyk zawodności układów izolacyjnych. Wykonano przykładowe obliczenia dla izolatorów LPg 75/17, zawieszonych w III strefie zabrudzeniowej.

1. Wprowadzenie

Zawodność zabrudzeniową układu izolacyjnego określa prawdopodobieństwo przeskoku zabrudzeniowego w rozpatrywanych warunkach środowiskowych oraz w założonym okresie eksploatacji [1, 2]. Proces powstawania przeskoków na izolacji w naturalnych warunkach zabrudzeniowych ma charakter stochastyczny, bowiem jego realizacje zależą w istotny sposób od losowych czynników zewnętrznych, takich jak zabrudzenie, opady atmosferyczne itd. Częstość przeskoków zależy ponadto od przyjętego rozwiązania technicznego (typu, długości i położenia roboczego układu izolacyjnego), a w pewnych przypadkach również od skuteczności profilaktycznych zabiegów eksploatacyjnych (okresowego czyszczenia izolatorów lub stosowania powłok hydrofobowych).

Ze względu na losowy charakter procesu nie można zdeterminować chwili, w której wystąpi przeskok zabrudzeniowy; ocena strumienia zdarzeń losowych, jakimi są przeskoki zabrudzeniowe, możliwa jest przy pomocy metod statystycznych w oparciu o wyniki analiz i badań eksploatacyjnych. Opracowanie zawiera propozycję metody określania rocznej zawodności zabrudzeniowej izolatorów wysokiego napięcia w rzeczywistych warunkach na terenach uprzemysłowionych. Wydaje się, że proponowana metoda pozwala na określenie przybliżonych charakterystyk zawodnościowych różnych układów izolacyjnych w oparciu o uproszczony model zawodności rocznej. Stwarza to możliwość racjonalnego doboru izolacji, której zawodność zabrudzeniowa

nie będzie przekraczać założonego poziomu, uznanego za dopuszczalny w rocznym cyklu eksploatacji.

2. Prawdopodobieństwo przeskoku zabrudzeniowego w ciągu roku

Aby obliczyć prawdopodobieństwo przeskoku na układzie izolacyjnym w naturalnych warunkach zabrudzeniowych należy:

a) określić charakter procesu powstawania przeskoków,

b) stworzyć teoretyczny model sezonowych zmian zawodności, pozwalający na możliwie proste (ale odpowiadające rzeczywistości) obliczenia jej parametrów probabilistycznych.

W celu określenia podstawowych parametrów procesu przyjęto, że zbiór czynników środowiskowych, wpływających istotnie na wytrzymałość zabrudzeniową izolacji można opisać w przybliżeniu za pomocą stochastycznego parametru f(t), będącego zmienną losową czasu [1, 3, 4]. W obliczeniach praktycznych rolę tego parametru spełnia najczęściej zapas wytrzymałości układu izolacyjnego $z_i(t)$, wyrażony przy pomocy ilorazu zabrudzeniowego napięcia przeskoku i napięcia roboczego [2]. W miarę potrzeby można także rozpatrywać inne wielkości, jak np. konduktywność powierzchniową lub maksymalne wartości prądów upływu [3].

Powyższe ujęcie pozwala na określenie podstawowej charakterystyki procesu, jaką jest intensywność przeskoków zabrudzeniowych na konstrukcji izolacyjnej "i". Intensywność przeskoków λ_i odpowiada w przybliżeniu oczekiwanej liczbie przeskoków w małym przedziale czasu. Poprawniej, jest to prawdopodobieństwo przeskoku w krótkim czasie eksploatacji pod warunkiem, że do rozpatrywanej chwili przeskok nie nastąpił. Ze względu na wyraźnie sezonowy charakter zmian zawodności zabrudzeniowej izolacji, intensywność przeskoków jest stochastyczną funkcją czasu i zależy od losowych realizacji parametru f(t), czyli $\lambda_i = \lambda_i[f(t)]$.

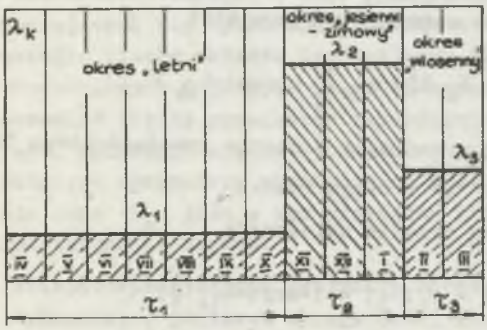
Niezawodność zabrudzeniową układu izolacyjnego "i", wyrażoną poprzez prawdopodobieństwo jego poprawnej pracy w czasie t, opisuje ogólnie zależność:

$$R_i(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda_i\left[f(\tau)\right] d\tau\right\} \tag{1}$$

Upraszcza się ona znacznie, gdy stochastyczny proces zmian wytrzymałości zabrudzeniowej można uznać w przybliżeniu za stacjonarny w pewnych okresach roku kalendarzowego. Weryfikacja powyższego założenia możliwa jest przy pomocy zawodnościowego modelu obliczeniowego, uwzględniającego sezonową zmienność intensywności przeskoków zabrudzeniowych w pewnym cyklu eksploatacji.

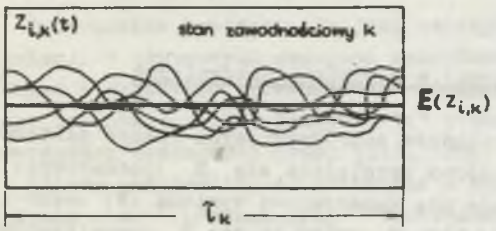
Ze względu na wyraźną cykliczność wielkości oddziaływań zabrudzenio-

wych i meteorologicznych, decydujących o zawodności zabrudzeniowej izolatorów, proponuje się przyjąć roczny okres obliczeniowy [3, 4]. Przykład trójstanowego modelu sezonowego, otrzymanego na podstawie wieloletniego materiału statystycznego z terenów zabrudzeniowych ZEOPd, przedstawiony jest na rys. 1. Okres letni charakteryzuje się najmniejszą intensywnością przeskoków na skutek samooczyszczania się izolatorów pod wpływem deszczu oraz najłagodniejszych w skali rocznej warunków zabrudzeniowych. Największe zagrożenie stwarza sezon jesienno-zimowy, głównie z powodu dużej liczby mgieł i mżawek natomiast koniec zimy i początek wiosny stanowią okres przejściowy. W opisany powyżej sposób można stworzyć modele sezonowe, składające się z s = 1,2,..,k, ,..,n stanów zawodności rocznej.



Rys. 1. Przykład sezonowego modelu rocznej zawodności zabrudzeniowej izolacji w warunkach naturalnych

W celu analitycznego obliczenia sezonowej niezawodności zabrudzeniowej należy także uwzględnić dodatkowe informacje, związane z charakterem procesu powstawania przeskoków w warunkach naturalnych. Na podstawie wieloletnich obserwacji można przyjąć, że losowe realizacje wielkości zapasów wytrzymałości zabrudzeniowej układu izolacyjnego $z_{ik}(t)$ w cyklicznie powtarzającym się stanie zawodnościowym "k" oscylują wokół pewnej wartości ustalonej (rys. 2).



Rys. 2. Przykład realizacji sezonowego zapasu wytrzymałościowego izolacji

Nie jest to oczywiście słuszne w każdym przypadku, np. dla izolacji wyraźnie źle dobranej do warunków terenowych, gdy przeskok może nastąpić przed osiągnięciem stanu "nasycenia" warstwy zabrudzeniowej. Należy jednak podkreślić, że zarówno konduktywność powierzchniowa warstwy jak i zapas wytrzymałościowy mogą w danej strefie osiągnąć jedynie pewne wartości maksymalne [2, 3]. Dla wieloletniego okresu obserwacji można przyjąć, że wartości oczekiwane zapasu wytrzymałościowego i intensywności przeskoków w zawodnościowym stanie "k"

są w przybliżeniu stałe, czyli $E[z_{ik}] \cong z_{ik} = \text{const}$, oraz $E[\lambda_{ik}] \approx \lambda_{ik} = \text{const}$.

Założenie to potwierdzają wstępne oceny statystyczne częstości przeskoków zabrudzeniowych w liniach 110 i 220 kV oraz w stacjach doświadczalnych 110 kV w ZEOPd.

Po uwzględnieniu powyższych ustaleń, sezonową niezawodność zabrudzeniową układu izolacyjnego "i" można określić następująco:

$$r_i(\tau_k) = \exp\left\{-\tau_k E[\lambda(z_{ik})]\right\} = \exp(-\lambda_{ik}\tau_k) \tag{2}$$

gdzie: λ_{ik} - stała intensywność przeskoków w stanie zawodnościowym "k",

τ_k - czas trwania stanu "k" w ciągu roku.

Sezonową zawodność zabrudzeniową określa zależność:

$$p_i(\tau_k) = 1 - r_i(\tau_k) = 1-\exp(-\lambda_{ik}\tau_k) \tag{3}$$

natomiast roczną zawodność:

$$P_i = 1 - R_i = 1 - \prod_{s=1}^{n} r_{ik} = 1 - \prod_{s=1}^{n}(1 - p_{ik}) = 1 - \prod_{s=1}^{n} \exp(-\lambda_{ik}\tau_k) =$$

$$= 1 - \exp\left(-\sum_{s=1}^{r} \lambda_{ik}\tau_k\right) \tag{4}$$

Wynika stąd, że roczna zawodność zabrudzeniowa posiada w przybliżeniu rozkład wykładniczy. Wielkościami, które ją określają jednoznacznie są sezonowe intensywności przeskoków dla rozpatrywanych konstrukcji izolacyjnych oraz czasy trwania stanów zawodnościowych w ciągu roku.

3. Ocena zawodności zabrudzeniowej w warunkach naturalnych

Estymacja intensywności przeskoków zabrudzeniowych wymaga zastosowanie planu badania typu N,W,T_b, w którym uwzględnia się N jednakowych elementów izolacyjnych "i", stosuje się każdorazowo wymianę (W) uszkodzonych izolatorów, natomiast analizę zakłóceń wykonuje się w ograniczonym czasie badania T_b [1].

Przybliżony estymator intensywności przeskoków wynosi w tym przypadku:

$$\lambda_i(t) \cong \frac{n_i(T_b)}{N\,T_b} \tag{5}$$

gdzie: $n_i(T_b)$ - liczba przeskoków zabrudzeniowych, zarejestrowanych w czasie T_b.

N - liczba analizowanych układów izolacyjnych,

T_b - łączny czas wykonywania analizy zawodności.

Z powodu bardzo małej intensywności przeskoków w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych jednostkowym okresem zbierania informacji może być 1 miesiąc kalendarzowy, lub 10 dni w przypadku dysponowania danymi z okresu kilkunastoletniego. W celu praktycznego określenia zmian zawodności w zmieniających się cyklicznie warunkach środowiskowych należy:

- ustalić liczbę układów izolacyjnych "i" w poszczególnych strefach zabrudzeniowych i przyjąć okres wykonywania analizy,
- określić liczbę przeskoków zabrudzeniowych w poszczególnych miesiącach roku, opierając się na co najmniej pięcioletnim okresie obserwacji,
- obliczyć estymatory miesięcznych intensywności przeskoków wg wzoru (5), ale czas T_b jest w tym przypadku iloczynem liczby godzin w miesiącu i lat zbierania danych.

Przedstawiona metoda estymacji napotyka w praktyce na znaczne trudności wykonawcze, ponieważ wymaga dużej liczby informacji przy bardzo małej częstości przeskoków zabrudzeniowych na rozpatrywanych konstrukcjach izolacyjnych. Można temu częściowo zaradzić, przyjmując nieco inny sposób postępowania:

- określić sezonowy model rocznej zawodności zabrudzeniowej dla wszystkich elementów izolacyjnych na rozpatrywanym terenie,
- obliczyć intensywność przeskoków dla układu izolacyjnego "i" na podstawie średniego czasu do przeskoku, nagromadzonego w każdym z "k" stanów sezonowego modelu zawodności rocznej, korzystając z własności, że:

$$\lambda_{ik} \cong \frac{1}{\bar{T}_{ik}} \cong \text{const} \qquad (6)$$

gdzie: $\bar{T}_{ik}$ - średni czas do przeskoku układu izolacyjnego "i" w zawodnościowym sezonowym stanie "k" i w danych warunkach terenowych.

Proponowane postępowanie jest szczególnie efektywne w przypadku badań izolacji w terenowych stacjach zabrudzeniowych, gdzie rejestruje się m.in. długości czasów do przeskoku dla różnych izolatorów. Znajomość tych czasów, nagromadzonych w każdym z "k" stanów modelu, umożliwia obliczenie zawodności sezonowych (wzór (3)), oraz zawodności rocznej (wzór (4)).

Należy podkreślić, że obliczone w ten sposób zawodności odnoszą się jedynie do przebadanych zestawów konstrukcyjnych izolatorów. Określenie pełnej (konstrukcyjnej) charakterystyki zawodnościowej izolatorów w funkcji, np. długości drogi upływu łańcucha lub kolumny izolacyjnej jest praktycznie niemożliwe nawet na drodze długotrwałych badań w naturalnych warunkach zabrudzeniowych. Odnosi się to szczególnie do układów, dla których roczne prawdopodobieństwa są mniejsze niż 1%, a więc osiągają rzędy wielkości najbardziej interesujące dla racjonalnego doboru izolacji

Przybliżone określenie tak rozumianych charakterystyk możliwe jest na

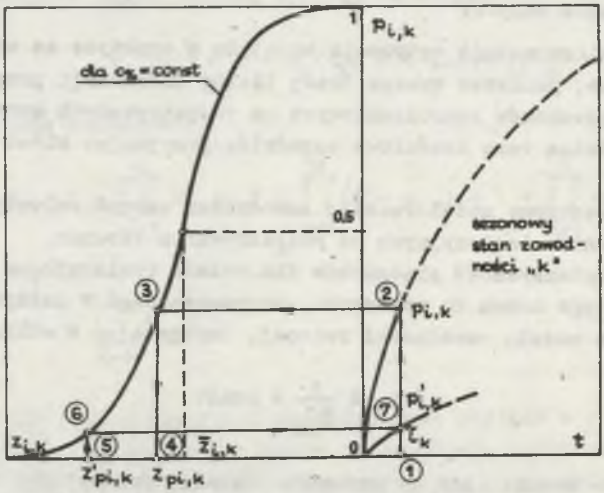
drodze analitycznej w oparciu o znane sezonowe zawodności izolatorów w naturalnych warunkach zabrudzeniowych oraz przy następujących założeniach:

a) zawodność sezonową opisuje wykładniczy rozkład prawdopodobieństwa (wzór (3)),

b) sezonowe zabrudzeniowe napięcia przeskoku izolatorów posiadają normalny rozkład prawdopodobieństwa [2, 3],

c) zabrudzeniowe napięcia przeskoku rosną praktycznie liniowo z długościami dróg upływu izolatorów dla napięć znamionowych nie większych od 400 kV [3,4].

Sposób wykonywania obliczeń przedstawia poglądowo rys. 3, gdzie poszczególne punkty oznaczają kolejne etapy postępowania:



Rys. 3. Kolejność obliczania sezonowej zawodności zabrudzeniowej układu izolacyjnego "i" o określonej drodze upływu

1. Przyjąć czas trwania τ_k stanu "k" w rocznym sezonowym modelu zawodności.

2. Obliczyć sezonową zawodność układu izolacyjnego o drodze upływu a_{ui} z zależności (6) i (3), znając z prób terenowych średni czas do przeskoku.

3. Przyrównać obliczoną zawodność sezonową i sezonowe prawdopodobieństwo przeskoku zabrudzeniowego, które jest zależne od zapasu wytrzymałości badanego układu izolacyjnego z_{ik} i wynika z rozkładu normalnego:

$$p_{ik} = 1 - \exp(-\lambda_{ik}\tau_k) = F\left(\frac{1 - \bar{z}_{ik}}{\sigma\, z_{ik}}\right) \qquad (7)$$

gdzie: $\bar{z}_{ik} = \frac{\bar{U}_{ik}}{U_f}$ - średni zapas wytrzymałościowy, jako iloraz 50 procentowego zabrudzeniowego napięcia przeskoku i napięcia fazowego,

$F(\frac{1 - \bar{z}_{ik}}{c\ \bar{z}_{ik}})$ - sezonowe prawdopodobieństwo przeskoku, określone przy pomocy dystrybuanty rozkładu normalnego zapasu wytrzymałości,

$c = \frac{\sigma}{U_{ik}}$ - względne odchylenie standardowe zabrudzeniowego napięcia przeskoku w warunkach naturalnych.

4. Określić zapas wytrzymałościowy z_{pik}, odpowiadający prawdopodobieństwu (7) przy pomocy tablic rozkładu normalnego, uwzględniając, że:

$$p_{ik}(z \leqslant z_{pik}) = F(\frac{1 - \bar{z}_{pik}}{c\ \bar{z}_{pik}}) = 0,5 + \Phi(w_p) = \alpha \qquad (8)$$

gdzie: z_{pik} - zapas wytrzymałościowy, odpowiadający prawdopodobieństwu (7) czyli kwantyl rozkładu normalnego rzędu α,

$w_p = \frac{1 - \bar{z}_{pik}}{c\ \bar{z}_{pik}}$ - unormowana zmienna zapasu wytrzymałościowego z_{pik},

$\Phi(w_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{w_p} \exp(1 - \frac{1}{2}v^2)\,dv$ - stabelaryzowana funkcja Laplace'a

Przy obliczaniu kwantyli zapasu z_{pik} korzysta się z następujących zależności:

Zawodność $p_i = \alpha$	$0 \leqslant \alpha < 0,5$	$\alpha = 0,5$	$0,5 < \alpha \leqslant 1$
Zmienna $w_p = -w_r$	ujemna	zero	dodatnia
Kwantyl z_{pik} rzędu α	$\bar{z}_{ik} - w_r c = \bar{z}_{ik} + w_p c$	$\bar{z}_{ik}$	$\bar{z}_{ik} + w_r c = \bar{z}_{ik} - w_p c$

5. Obliczyć zapas wytrzymałości układu izolacyjnego o drodze upływu $a'_{ui} > a_{ui}$, opierając się na założeniu, że w określonych warunkach zabrudzeniowych rośnie on proporcjonalnie z długością drogi upływu. Zapas $z'_{pik} = \eta_i\ z_{pik}$, gdzie η_i jest krotnością drogi upływu izolatora badanego w warunkach rzeczywistych.

6. Odczytać prawdopodobieństwo $p'_{ik} = f(z'_{pik})$ z tablic rozkładu normalnego.

7. Przenieść wartość p'_{ik} na wykres sezonowej zawodności zabrudzeniowej.

Można w ten sposób obliczyć kolejne wartości sezonowych zawodności konstrukcji izolacyjnej, a następnie określić charakterystykę zawodności rocznej (wykorzystując zależność (4)), która pozwala na:

- porównywanie rzeczywistych własności zabrudzeniowych różnych typów izolatorów oraz ocenę wpływu rodzaju konstrukcji na wytrzymałość w warunkach naturalnych,
- określenie wymaganych parametrów konstrukcyjnych, np. długości jednostkowych dróg upływu, niezbędnych dla zapewnienia odpowiedniej niezawodności układów izolacyjnych, a więc umożliwia racjonalny dobór izolacji pod względem technicznym.

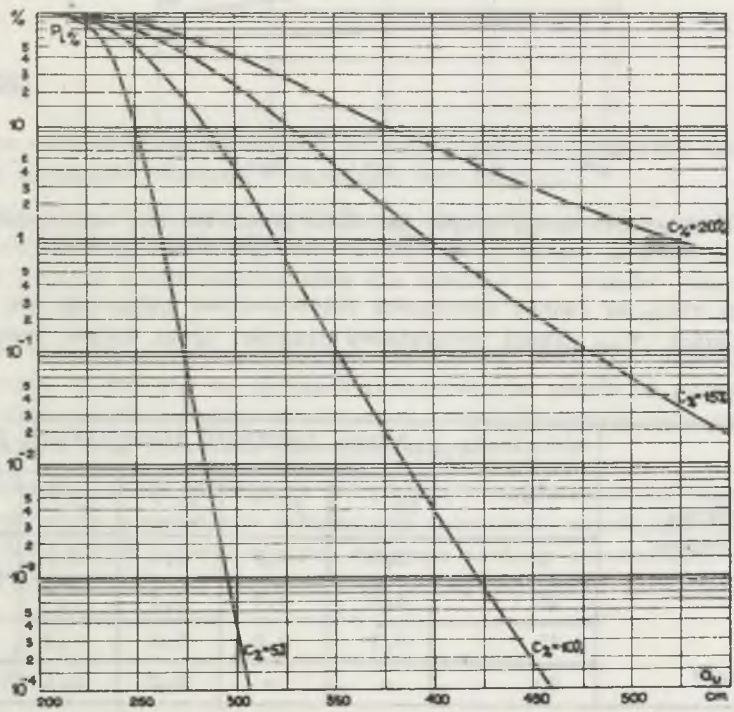
4. Przykład obliczeniowy

Przykładowe obliczenia zawodnościowe wykonano dla łańcucha przelotowego, złożonego z izolatorów LPg 75/17, posiadających drogę upływu 225 cm. Materiał doświadczalny stanowią wyniki kilkuletnich badań izolatora w stacji doświadczalnej 110 kV w Zabrzu (III strefa zabrudzeniowa). Zarejestrowano 9 przeskoków zabrudzeniowych i ustalono, że średni czas do przeskoku wynosi około 13 miesięcy, co nie pozwala jednak na bezpośrednie obliczenie zawodności rocznej izolatora, ze względu na sezonowy charakter jej zmian. Roczny model sezonowych zmian zawodności, powstały w oparciu o analizę częstości przeskoków, wartości konduktywności powierzchniowej izolatorów oraz intensywności opadów atmosferycznych przedstawiony jest na rys. 1. Ze względu na przykładowy charakter obliczeń nie podaje się szczegółów jego weryfikacji statystycznej.

Rozkładając łączny czas do przeskoku dla izolatora LPg 75/17 na składowe, wynikające z przyjętego modelu zawodności rocznej, otrzymano następujące wyniki:

Sezonowy stan zawodności	1	2	3	Uwagi
Czas trwania stanu „k" w ciągu roku τ_k godz.	5136	2208	1416	Razem 8760 godz., zgodnie z modelem zawodności rocznej (rys. 1)
Średnie czasy do „przeskoku w stanie „k", T_{ik} mies.	7,8	3,7	2,6	Nagromadzone czasy do przeskoku, określone w stacji zabrudzeniowej
Sezonowe zawodności zabrudzeniowe p_{ik} %	59,2	55,6	63,2	Zależność (3)
Roczna zawodność zabrudzeniowa $P_{i\%}$ %	93,3			Zależność (4)

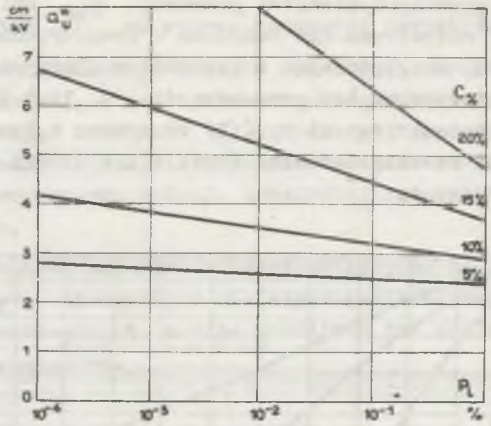
Znając sezonowe prawdopodobieństwa przeskoku p_{ik} obliczono następnie sezonowe zawodności rozpatrywanego łańcucha o teoretycznie coraz większych drogach upływu, uwzględniając 4 wartości względnych odchyleń standardowych zabrudzeniowych napięć przeskoku (5, 10, 15 i 20%). Kolejność wykonania obliczeń podana jest na rys. 3. Otrzymano w ten sposób charakterystykę zawodności rocznej łańcucha (rys. 4), z której wynika, że roczna zawodność zabrudzeniowa:



Rys. 4. Charakterystyka rocznej zawodności zabrudzeniowej łańcucha przelotowego złożonego z izolatorów LPg 75/17 w III-ciej strefie zabrudzeniowej

- maleje wyraźnie w miarę wzrostu drogi upływu izolatora, przy czym ilościowy efekt tych zmian zależy od odchylenia standardowego napięcia przeskoku,
- wykazuje praktycznie liniową zależność od długości drogi upływu w półlogarytmicznym układzie współrzędnych dla $P_{i\%} \leqslant 1\%$.

Długości jednostkowych dróg upływu (w odniesieniu do napięcia znamionowego), które zapewniają niezawodną pracę rozpatrywanej izolacji z ryzykiem nie większym od (100 - $P_{i\%}$), przedstawione są w formie graficznej na rys. 5.



Rys. 5. Jednostkowe drogi upływu łańcucha przelotowego, złożonego z izolatorów LPg 75/17 w III-ciej strefie zabrudzeniowej

Wynika stąd, że roczne zawodności zabrudzeniowe łańcuchów nie przekroczą wielkości $P_{i\%}$, jeżeli jednostkowe długości drogi upływu będą następujące:

	Odchylenie standardowe $C_{\%}$	ROCZNA ZAWODNOŚĆ ZABRUDZENIOWA $P_{i\%}$				
JEDNOSTKOWA DROGA UPŁYWU		10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1
	5	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4
	10	4,2	3,8	3,5	3,2	2,9
	15	6,7	6,0	5,2	4,3	3,6
a_u^* cm/kV	20	-	-	8,0	6,3	4,6

Określenie optymalnej zawodności rocznej oraz oszacowanie standardowego odchylenia napięcia przeskoku w naturalnych warunkach zabrudzeniowych wymagają oddzielnego opracowania, ale wydaje się, że:

- optymalna zawodność roczna, wynikająca z obliczeń techniczno-ekonomicznych, powinna być zawarta między 10^{-3} i 10^{-2}% [2],
- odchylenie standardowe jest rzędu 10 (15)%; wartości mniejsze spotykane są jedynie podczas prób laboratoryjnych, natomiast przyjęcie wartości większych wskazywałoby na bardzo małe zapasy wytrzymałościowe izolatorów, co nie odpowiada dotychczasowym doświadczeniom eksploatacyjnym [3]

Przyjmując optymalną zawodność roczną 10^{-2}% i odchylenie standardowe 10%, otrzymuje się np. że jednostkowa droga upływu łańcucha, złożonego z

izolatorów LPg 75/17 powinna wynosić 3,5 cm/kV w III strefie zabrudzeniowej, czyli o 35% więcej od wymagań aktualnej normy [5]. W praktyce wymaga to zastosowania łańcucha przelotowego, złożonego z dwóch rozpatrywanych izolatorów. Przedstawione obliczenia mają charakter przykładowy i ewentualne zmiany wymagań, dotyczących doboru izolatorów do warunków zabrudzeniowych możliwe będą dopiero po ukończeniu obszernej analizy zawodności różnych typów izolatorów.

5. Wnioski

1) Roczna zawodność zabrudzeniowa izolacji wysokiego napięcia wskazuje wyraźną zmienność sezonową w warunkach naturalnych.

2) Analityczne obliczenie przybliżonej zawodności rocznej możliwe jest na podstawie uproszczonego modelu sezonowego oraz w oparciu o wykładniczy rozkład prawdopodobieństwa dla każdego ze stanów zawodnościowych w ciągu roku.

3) Metoda wyznaczania charakterystyk zawodności izolacji w warunkach naturalnych opiera się na wynikach rejestrowania czasów do przeskoku oraz ocenie zapasów wytrzymałościowych, odpowiadających sezonowym prawdopodobieństwom przeskoku zabrudzeniowego.

4) Proponowana metoda pozwala na pełniejszą ocenę techniczną konstrukcji izolatorowych w warunkach naturalnych zabrudzeń, określenie jednostkowych dróg upływu zapewniejących wymagane poziomy zawodności, oraz na ocenę wpływu kształtu izolatorów na ich wytrzymałość zabrudzeniową.

LITERATURA

[1] Gniedenko B.W. i inni: Metody matematyczne w teorii niezawodności. WNT Warszawa 1968 r.

[2] Gacek Z.: Aspekty ekonomiczne doboru izolacji wysokiego napięcia na terenach o silnym zanieczyszczeniu atmosfery. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1972 r.

[3] Gacek Z.: Défiabilité des isolateurs de lignes sous pollution naturelle á la station de Martigues-Ponteau. Doc. de trav. HM-72/2898/ZG. Direction des Etudes et Recherches d'EdF Clamart 1974 r.

[4] Gacek Z.: Quelques paramétres d'isolation de lignes aériennes du point de vue de défiabilité sous pollution naturelle. Doc.de trav.HM-72/2922/ZG. Direction des Etudes et Recherches d'EdF. Clamart 1974 r.