



Zbigniew Gacek*, Kazimierz Kucharski**

METODYKA WYZNACZANIA WARTOŚCI GRANICZNYCH KONDUKTYWNOŚCI POWIERZCHNIOWEJ IZOLATORÓW W STREFACH ZABRUDZENIOWYCH

Streszczenie: Opisana jest metodyka wyznaczania wartości granicznych konduktywności powierzchniowej powłok zabrudzeniowych na izolatorach napowietrznych w umownych strefach zabrudzeniowych. Wartości te są niezbędne do poprawnego doboru izolatorów ze względu na narażenie zabrudzeniowe, zgodnie z wymaganiami aktualizowanej normy przedmiotowej.

Słowa kluczowe: konduktywność powierzchniowa, wytrzymałość zabrudzeniowa, niezawodność izolacji

1. Wprowadzenie

Elektroenergetyczne izolatory napowietrzne — zależnie od rodzaju, napięcia roboczego sieci i stopnia zanieczyszczenia atmosfery — muszą spełniać rozmaite wymagania techniczne. Oprócz wystarczającej wytrzymałości mechanicznej i odporności na oddziaływanie łuku zwarciovego, muszą one wykazywać dostateczną wytrzymałość elektryczną przy napięciu roboczym i przepięciach. W obszarach o znacznym zanieczyszczeniu atmosfery o doborze izolatorów decyduje zazwyczaj tzw. *wytrzymałość elektryczna zabrudzeniowa* przy napięciu roboczym.

W referacie omawiane jest jedynie jedno z istotnych zagadnień związane z doбором tradycyjnych izolatorów elektroenergetycznych do warunków zabrudzeniowych. Dotyczy ono metodyki wyznaczania wartości granicznych konduktywności powierzchniowej

* Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

** Górnośląski Zakład Elektroenergetyczny S.A. w Gliwicach

powłok zabrudzeniowych na izolatorach (κ_g), dopuszczalnych w kolejnych strefach zabrudzeniowych. Znajomość tych wartości jest niezbędna do doboru układów izolacyjnych o wystarczającej niezawodności w zadanych warunkach zabrudzeniowych. Wykorzystuje się w tym celu dane pochodzące z laboratoryjnych badań zabrudzeniowych niektórych izolatorów liniowych oraz wyniki analiz niezawodnościowych i badań terenowych rozmaitych izolatorów elektroenergetycznych wysokiego napięcia.

2. Wykorzystanie charakterystyk zabrudzeniowych i wyników analiz niezawodnościowych

Wartości graniczne konduktywności κ_g można wyznaczyć m.in. na podstawie odpowiednio udokumentowanych laboratoryjnych charakterystyk zabrudzeniowych i wymaganej częstości czyszczenia izolatorów. Dąży się przy tym do tego, aby każdy z układów izolacyjnych wykazywał się wystarczająco małą zawadnością zabrudzeniową i — praktycznie — nie wymagał czyszczenia [1, 4]. Miarą zawadności jest prawdopodobieństwo przeskoku zabrudzeniowego, uzależnionego od przypadkowości występowania oddziaływań środowiskowych i atmosferycznych. Rośnie ono w miarę zwiększania się konduktywności powierzchniowej powłok na izolatorach, która zmienia się losowo w czasie — zależnie m.in. od stopnia i charakteru zanieczyszczenia oraz intensywności większości opadów atmosferycznych. Wahania konduktywności podczas eksploatacji powodują losowe zmiany zabrudzeniowego napięcia przeskoku, zależnie od przypadkowych oddziaływań środowiskowych i atmosferycznych [2].

Z powodu braku wiarygodnych danych o rozkładach prawdopodobieństwa powyższych oddziaływań ocenę skutków narażenia zabrudzeniowego izolacji napowietrznej oparto na analizie krótkotrwałych lecz skrajnych przypadków tego narażenia w liniach i stacjach 110÷220 kV, występujących niekiedy w obszarze Górnego Śląska. Pominięto skomplikowane i słabo udokumentowane procesy starzenia się izolatorów. W modelu obliczeniowym przyjęto świadomie najcięższe warunki pracy izolacji w zadanych warunkach środowiskowych, określone przez dwa najistotniejsze czynniki decydujące o zawadności zabrudzeniowej izolatorów:

- najwyższe dopuszczalne fazowe napięcie robocze U_{fr} (w kV),
- najwyższą (maksymalną) spodziewaną w danej strefie konduktywność powierzchniową powłoki zabrudzeniowej κ_g (w μS),

zakładając jednocześnie, że:

- wytrzymałość powierzchniowa izolatorów wynika z laboratoryjnych charakterystyk zabrudzeniowych obniżonych o 10% [7],
- rozkład prawdopodobieństwa zabrudzeniowego napięcia przeskoku (U_{pz}) opisuje rozkład normalny [1, 2].

Prawdopodobieństwo przeskoku zabrudzeniowego na izolatorze lub łańcuchu izolatorów w założonych najniekorzystniejszych warunkach pracy wynika ze wzoru:

$$P_1(U_{pz} \leq U_{fr}) = P_1(U_{fr}; \kappa_g) = P_1(z) = \int_{-\infty}^z \varphi(w) dw = 0,5 + \phi(w) \quad (1)$$

gdzie:

$$\varphi(w) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}w^2\right) \text{ — gęstość funkcji Gaussa,}$$

$$w = \frac{U_{fr} - U_{p50}^*}{\sigma} = \frac{U_{fr} - U_{p50}^*}{cU_{p50}^*} = \frac{1 - \bar{z}}{c\bar{z}} \text{ — standaryzowana zmienna losowa,}$$

$$U_{fr} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \text{ — najwyższe dopuszczalne fazowe napięcie robocze (w kV),}$$

$U_{p50}^* = 0,9 \cdot U_{p50}$ — pięćdziesięcioprocentowe napięcie przeskoku wynikające z laboratoryjnej charakterystyki zabrudzeniowej izolatora lub łańcucha izolatorów, obniżone o 10% (w kV),

$\bar{z} = \frac{U_{p50}^*}{U_{fr}}$ — wartość średnia względnej wytrzymałości zabrudzeniowej (z) izolatora lub łańcucha izolatorów,

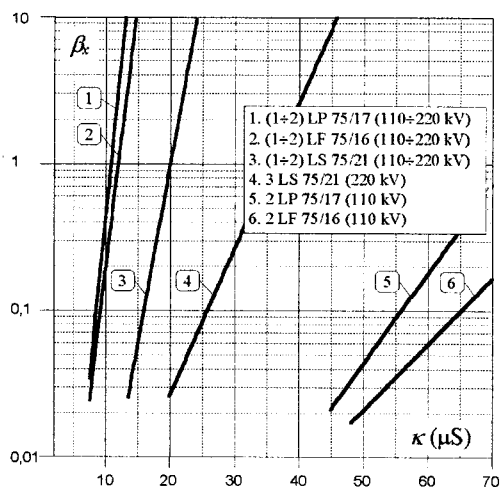
$$c = \frac{\sigma}{U_{p50}^*} = 0,1(0,15) \text{ — współczynnik zmienności napięcia przeskoku,}$$

$$\Phi(w) = \int_0^w \varphi(w)dw = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^w \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right)dx \text{ — funkcja Laplace'a.}$$

Jednym ze sposobów zwiększenia niezawodności zabrudzeniowej izolacji w rejonach o największym zanieczyszczeniu atmosfery jest okresowe czyszczenie izolatorów. Skuteczność takiej czynności eksploatacyjnej jest związana z jej częstością, która zależy z kolei od takich czynników, jak: natężenie i rodzaj zanieczyszczeń oraz wytrzymałość (niezawodność) powierzchniowa izolacji. W praktyce była ona ustalana w zasadzie arbitralnie — na podstawie długotrwałych doświadczeń eksploatacyjnych i obserwacji wyładowań niepełnych na izolatorach w bardzo niekorzystnych warunkach atmosferycznych. W największym w kraju Zakładzie Energetycznym Gliwice, w tym również w obszarze Górnego Śląska, do końca lat 70-tych obowiązywały następujące częstości czyszczenia izolacji:

wymagana częstość czyszczenia β [1/rok]	0,33	0,5	1	1÷2
strefa zabrudzeniowa wg PN-68/E-06303	I	II	III	IV

Ze względów gospodarczych i organizacyjnych służby eksploatacyjne są zainteresowane jednak nie tyle wydłużaniem przedziału czasu między kolejnymi czyszczeniami, ile całkowitą rezygnacją z kosztownego i kłopotliwego czyszczenia. Oznacza to konieczność doboru układów izolacyjnych o na tyle dużej niezawodności zabrudzeniowej, aby nie wymagały w ogóle czyszczenia. W ramach prac nad nowelizacją obecnie już nieaktualnej normy PN-68/E-06303 wykonano analizę wymagań częstości czyszczenia typowych łańcuchów izolatorów w liniach 110 i 220 kV. W analizie wykorzystano wyniki obliczeń prawdopodobieństw przeskoku zabrudzeniowego na pojedynczych izolatorach lub łańcuchach izolatorów, przyjmując, że wytrzymałość powierzchniowa izolatorów wzrasta proporcjonalnie do długości łańcucha. Prawdopodobieństwa te



Rys. 1. Obliczeniowa częstość czyszczenia izolatorów liniowych wg wzoru (2)

oszacowano wg wzoru (1), czyli również na podstawie laboratoryjnych charakterystyk zabrudzeniowych wybranych izolatorów (nie zamieszczonych w referacie) i wartości konduktywności κ_g dla obowiązujących wtedy częstości czyszczenia. Obliczeniową (wymaganą) częstość czyszczenia izolacji liniowej w ciągu wyznaczono wg wzoru:

$$\beta_x = \beta \frac{P_1(z)}{P_\beta} \quad (2)$$

gdzie:

β — wymagana częstość czyszczenia, obowiązująca w okresie wykonywania analizy (1/rok),

$P_1(z)$ — prawdopodobieństwo przeskoku zabrudzeniowego wg wzoru (1),

$P_\beta = 1 \cdot 10^{-4}$ — przybliżone prawdopodobieństwo przeskoku zabrudzeniowego na pojedynczym układzie izolacyjnym zawieszonym pionowo, pod warunkiem przestrzegania obowiązującej częstości czyszczenia (wg [5]).

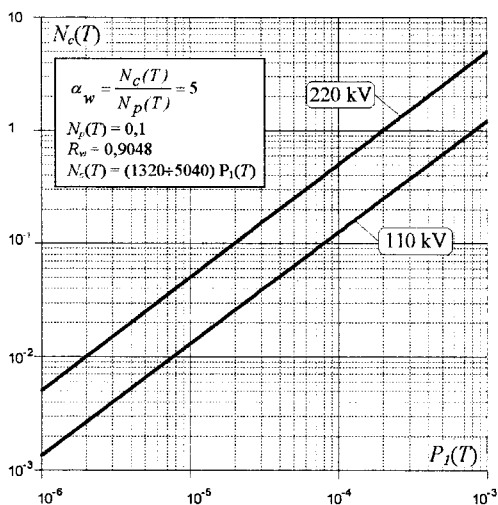
Analizowano następujące pojedyncze łańcuchy przelotowe złożone z różnych izolatorów długopniowych (rys. 1). Pominięto łańcuchy odciągowe, ze względu na ich znacznie większą niezawodność zabrudzeniową w porównaniu z analogicznymi łańcuchami przelotowymi [1]. Analiza częstości czyszczenia izolacji liniowej pozwoliła na wyznaczenie poniższych wartości granicznych:

konduktywność κ_g (w μs)	$\kappa_g \leq 8$	$8 < \kappa_g \leq 15$	$15 < \kappa_g \leq 30$	$\kappa_g > 30$
strefa zabrudzeniowa wg [8] i [9]	I	II	III	IV

Sposób wykorzystania udokumentowanych charakterystyk zabrudzeniowych do wyznaczania konduktywności κ_g opiera się na założeniu, że prawdopodobieństwo przeskoku zabrudzeniowego na pojedynczym łańcuchu izolatorów w liniach 110÷220 kV

spełnia warunek $P_1(z) \leq 10^{-5}$, wynikający z uzasadnień techniczno-ekonomicznych [1, 2]. Izolacja linii jest wtedy racjonalnie dobrana pod względem wytrzymałości powierzchniowej w każdej ze stref i nie wymaga praktycznie czyszczenia.

Większość wyników analizy częstości czyszczenia i obliczeń niezawodnościowych potwierdzają również obliczenia sprawdzające wykonane na podstawie modelu obliczeniowego obsługi eksploatacyjnej układów izolacyjnych, zaproponowanego m.in. w referacie [3]. Model ten umożliwia oszacowanie wymaganej częstości zapobiegawczych czynności obsługowych zależnie od spodziewanej liczby uszkodzeń izolatorów i ich dopuszczalnej niezawodności między kolejnymi obsługami eksploatacyjnymi. Obliczenia wykonano dla linii 110÷220 kV o średnich długościach zastępczych $l_z = 40 \div 70$ km i zastępczej liczbie łańcuchów obliczeniowych $m_z n_z = 6,6 \div 14,4$ 1/km oraz przy założeniu dostatecznie dużej względnej częstości czyszczenia w odniesieniu do liczby przeskoków $\alpha_w = 5$, oczekiwanej liczby przeskoków w okresie odnowy $N_p(\tau) = 0,1$ i wymaganej niezawodności izolacji liniowej między kolejnymi czyszczeniami $R_w(\tau) = 0,9048$. Wyniki obliczeń wymaganej częstości czyszczenia izolacji liniowej w ciągu roku są przedstawione na rysunku 2 ($P_1(T)$ jest prawdopodobieństwem przeskoku zabrudzeniowego w ciągu roku na jednym łańcuchu obliczeniowym).



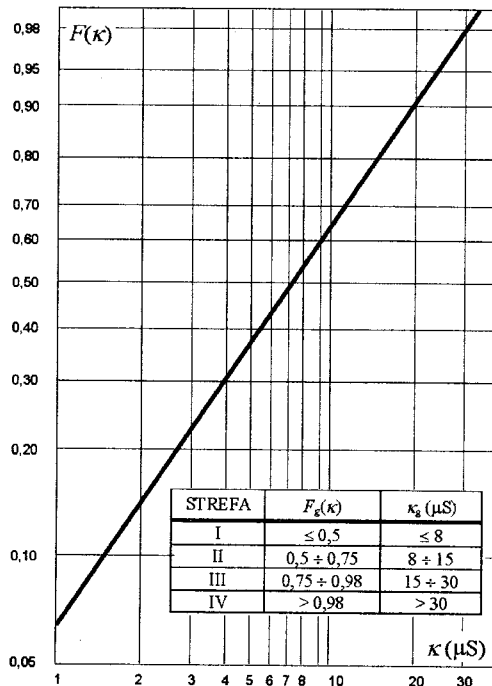
Rys. 2. Wymagane roczne częstości czyszczenia izolacji na odcinku typowych linii 110÷220 kV w zależności od zawadności zabrudzeniowej obliczeniowego łańcucha izolatorów (wg [3])

Analizy wykonywane w oparciu o częstości czyszczenia izolacji β_x i $N_c(T)$ prowadzą do praktycznie takich samych wartości granicznych konduktywności κ_g , jeśli nie przekracza się poziomu $40 \mu\text{S}$. Powyżej tej wartości, tzn. w warunkach ekstremalnego narażenia zabrudzeniowego, posługiwanie się wynikami obliczeń na podstawie modelu obsługi eksploatacyjnej prowadziłyby do zbyt łagodnych wymagań, tj. zbyt małych częstości czyszczenia przy zadanej zawadności zabrudzeniowej obliczeniowego łańcucha

cha izolatorów $P_1(z)$. Nie ma to jednak większego znaczenia praktycznego, ponieważ największą wartością graniczną jest $\kappa_g = 30 \mu\text{S}$ (w IV strefie zabrudzeniowej).

3. Wykorzystanie wyników badań terenowych

Po zdeterminowaniu wartości granicznych konduktywności κ_g należy wyznaczyć rzędy kwantyla jej rozkładu prawdopodobieństwa w kolejnych strefach zabrudzeniowych. Dokonano tego na podstawie licznych (722) wyników pomiarów konduktywności powłok zabrudzeniowych na wysokonapięciowych izolatorach liniowych i stacyjnych w warunkach rzeczywistych. Metodyka pomiarów (sondą „kołkową”) i sposób opracowania danych (wartość średnia) są opisane m. in. w pracach [5] i [7]. Wyznaczono tzw. *dystrybuantę zbiorczą* konduktywności powierzchniowej powłok zabrudzeniowych na rozmaitych izolatorach w obszarze Górnego Śląska, zbliżoną do rozkładu Weibulla (rys. 3) i opisaną na siatce funkcyjnej zależnością $\log \kappa_p = 0,83Z + 0,99$, przy czym $Z = \log\{-\ln[1 - (\kappa)]\}$ jest transformatą punktu dystrybuanty. Wynika stąd, że wartościom granicznym κ_g wyszczególnionym w p. 2 odpowiadają w przybliżeniu prawdopodobieństwa ich przekroczenia $F_g(\kappa)$ (rzędy kwantyla) jak na rysunku 3. Powyższe poziomy prawdopodobieństwa współdecydują o podziale terenu na umowne strefy zabrudzeniowe [4, 5, 7].



Rys. 3. Dystrybuanta zbiorcza konduktywności powierzchniowej powłok na izolatorach w obszarze Górnego Śląska (wg [5, 7])

Wartości graniczne konduktywności κ_g są traktowane jako najwyższe dopuszczalne wartości w danej strefie zabrudzeniowej. Porównano je z wynikami prawie 100 pomiarów konduktywności powierzchniowej powłok zabrudzeniowych na wybranych izolatorach liniowych długopniowych i kołpakowych oraz niektórych izolatorów wsporczych [5, 7]. Uzyskane wyniki pomiarów przypisano kolejno I-szej i III-ciej strefie zabrudzeniowej — zgodnie z przyjętymi kryteriami zróżnicowania narażenia zabrudzeniowego. Dane te wykorzystano do obliczenia wartości granicznych konduktywności κ_g dla powyższych stref, w oparciu o rozkłady prawdopodobieństwa Weibulla i — alternatywnie — Gumbela. Obliczenia wykonano dla kilku wartości kwantyla wysokiego rzędu i obciążonych estymatorów odchylenia standardowego w próbce (tabela 1).

Tabela 1. Wartości graniczne konduktywności powierzchniowej powłok na izolatorach w I i III strefie zabrudzeniowej (wg [7])

Przyjęty rozkład prawdopodobieństwa	strefa zabrudzeniowa wg [8] i [9]	Wartości graniczne konduktywności κ_g (w μS) jako kwantyla rzędu $F_g(\kappa)$:		
		0,90	0,95	0,98
Rozkład Gumbela	I	6,2	7,4	8,9
	III	19,6	23,5	28,6
Rozkład Weibulla	I	6,0	7,0	8,1
	III	19,4	22,9	27,1

Wartości graniczne κ_g dla strefy I i III, wyszczególnione w p. 2 i tabeli 1 dla najwyższego rzędu kwantyla ($F_g(\kappa) = 0,98$), są do siebie zbliżone. Świadczy to o wystarczającym dopasowaniu tego kwantyla do spodziewanych wartości κ_g . Uzyskane rezultaty są również zbieżne z wynikami analizy ilościowej, mającej na celu ocenę przydatności tzw. *wskaźnika przyrostu konduktywności* wody do podziału terenu pod względem stopnia narażenia zabrudzeniowego [7].

4. Podsumowanie

Referat zawiera syntetyczne informacje dotyczące sposobu wyznaczania wartości granicznych konduktywności powierzchniowej powłok zabrudzeniowych (κ_g) na elektroenergetycznych izolatorach napowietrznych w umownych strefach zabrudzeniowych. Wykorzystuje się w tym celu dane o różnym charakterze, będące rezultatami laboratoryjnych badań zabrudzeniowych niektórych izolatorów liniowych, wybranych analiz niezawodnościowych (w tym również związanych z częstością czyszczenia izolatorów) oraz licznych pomiarów konduktywności powłok zabrudzeniowych na izolatorach liniowych i stacyjnych w warunkach rzeczywistych. Na podstawie charakterystyk zabrudzeniowych i wyników analiz niezawodnościowych zostały oszacowane poszukiwane wartości κ_g , natomiast na podstawie wyników pomiarów terenowych wyznaczono tzw. dystrybuantę zbiorczą rozważanej wielkości losowej i przypisano jej

określone rzędy kwantyli w strefach zabrudzeniowych. Opisany sposób postępowania wykorzystano m. in. w pracach nad nowelizacją normy [8].

Literatura

- [1] **Gacek Z.:** *Niezawodność izolacji linii napowietrznych wysokiego napięcia na terenach przemysłowych.* ZN Pol. Śląskiej nr 462 „Elektryka” z. 67, Gliwice 1980 (monografia)
- [2] **Gacek Z.:** *Zarys metodyki obliczania niezawodności zabrudzeniowej izolatorów napowietrznych.* „Rozprawy Elektrotechniczne” nr 35 (z. 2) 1989, ss. 437–447
- [3] **Gacek Z.:** *Model obliczeniowy obsługi eksploatacyjnej układów izolacyjnych w wybranych obiektach sieciowych.* Mat. III Symp. „Metody Matematyczne w Elektrotechnice”, sekcja I, ref. 10, Zakopane 1993, ss. 59–62
- [4] **Gacek Z., Kucharski K., Pohl Z.:** *Criteria for selection of high voltage outdoor insulators in respect of polluted conditions.* CIGRE 1994 Session. Rep. 33–102
- [5] **Gacek Z., Kucharski K.:** *Możliwości oceny narażenia zabrudzeniowego izolatorów napowietrznych na podstawie konduktywności powierzchniowej.* „Przegląd Elektrotechniczny” 12/1995, ss. 317–326
- [6] **Kucharski K.:** *Czasokresy czyszczeń łańcuchów izolatorów długopniowych linii napowietrznych 110–220 kV pracujących na terenach GOP-u.* Mat. Symp. Naukowego „Izolacja w Liniach Napowietrznych i Stacjach Najwyższych Napięć”. Prace Nauk. Inst. Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Pol. Wrocławskiej nr 14, seria 2 (konferencje). Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław 1976, ss. 62–74
- [7] **Kucharski K.:** *Kryteria podziału terenu na strefy zabrudzeniowe ze względu na dobór izolacji wysokonapięciowej.* Praca doktorska. Politechnika Śląska. Gliwice 1992
- [8] PN-79/E-06303. *Narażenia zabrudzeniowe izolacji napowietrznej i dobór izolatorów do warunków zabrudzeniowych;* wydanie 3 (1985)
- [9] IEC Publ. 815 (1986): *Guide for the Selection of Insulators in Respect of Polluted Conditions*

THE METHOD APPLIED TO DETERMINATION OF SURFACE LAYER CONDUCTIVITY LIMITING VALUES FOR INSULATORS IN POLLUTION ZONES

The method applied to determination of surface layer conductivity limiting values for overhead insulators in successive pollution zones is described. These values are necessary for correct selection of insulators in respect of polluted conditions according to requirements of the updated standard specification.