ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: ELEKTRYKA z. 174 Nr kol. 1472

Zbigniew GACEK

ZASADY WYMIAROWANIA IZOLACYJNYCH ODSTĘPÓW POWIETRZNYCH W SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono ogólne wymagania w zakresie wytrzymałości elektrycznej odstępów powietrznych, wynikające przede wszystkim z zasad współczesnej koordynacji izolacji. Zaproponowano sposób wymiarowania wybranych odstępów powietrznych w sieciach elektroenergetycznych o zróżnicowanych napięciach znamionowych oraz wykonano kilka przykładów obliczeniowych.

PRINCIPLES OF DIMENSIONING OF AIR INSULATING CLEARANCES IN POWER NETWORKS

Summary. The general requirements concerned electric strength of air insulating clearances, resulting above all from principles of contemporary insulation co-ordination, are presented in the paper. The dimensioning method relating to selected air insulating clearances in power networks of different rated voltages is proposed and several calculation examples are done.

1. WPROWADZENIE

Wymiarowanie izolacji elementów składowych sieci elektroenergetycznych jest procesem nadawania układom izolacyjnym określonych cech geometrycznych, tj. kształtu i charakteryzujących go wymiarów - w tym również odstępu między elektrodami. Stanowi ono jedno z zadań inżynierskich, będąc istotną częścią projektowania i konstruowania każdego obiektu technicznego. Cechy geometryczne, należące do klasy struktur zewnętrznych, mają doniosłe znaczenie również dla większości układów izolacyjnych. Warunkują one bowiem możliwość poprawnego działania izolacji w określonych warunkach eksploatacyjnych

Przedmiotem rozważań są zasady wymiarowania odstępów powietrznych w sieciach elektroenergetycznych wysokiego napięcia z przewodami gołymi. Zasady te są związane

przede wszystkim z wymaganiami wynikającymi ze współczesnej koordynacji izolacji, zawartymi w normach europejskich [7] i [8]. Polskie wersje tych norm są obecnie opracowywane w Polskim Komitecie Normalizacyjnym (NKP nr 80). W obliczeniach uwzględniono również wymagania wynikające z postanowień znowelizowanej normy [10] i przepisów [12]. Zakres rozważań nie obejmuje wymiarowania izolacyjnych odstępów powietrznych w sieciach z przewodami w osłonach izolacyjnych.

2. OGÓLNE WYMAGANIA W ZAKRESIE WYTRZYMAŁOŚCI ELEKTRYCZNEJ ODSTĘPÓW POWIETRZNYCH

Izolacyjne odstępy powietrzne w sieciach elektroenergetycznych są zróżnicowane pod względem ich długości, która zależy istotnie od następujących czynników:

- *napięcia roboczego sieci,* a dokładniej - determinującego go napięcia znamionowego (U_n), najwyższego napięcia sieci (U_s) i najwyższego napięcia urządzenia (U_m);
- *rodzaju elementu składowego sieci*, którym może być linia napowietrzna lub stacja elektroenergetyczna (napowietrzna lub wnętrzowa);
- *znamionowego poziomu izolacji*, czyli zestawu znormalizowanych napięć wytrzymywanych (U_w), które charakteryzują wytrzymałość elektryczną izolacji przy przepięciach [7, 8, 9];
- *rodzaju i kształtu elektrod*, najczęściej o charakterze "ostrzowym", np. przewód roboczy–słup.

Bardzo liczne odstępy powietrzne, występujące w każdym właściwie miejscu linii lub stacji decydują w znacznym stopniu o niezawodności całej sieci. Dlatego też poprawne wymiarowanie odstępów powietrznych jest ważnym zadaniem projektanta sieci rozdzielczej i przesyłowej. Ogólne wymagania w zakresie wytrzymałości elektrycznej odstępów powietrznych wynikają z *koordynacji izolacji* [2]. Umożliwia ona prawidłowy wybór oraz poprawne uszeregowanie wytrzymałości układów izolacyjnych i urządzeń ochronnych przed przepięciami w zależności od:

a) warunków pracy izolacji w określonych miejscach sieci (z uwzględnieniem sposobu pracy punktu neutralnego oraz stopnia zagrożenia przez przepięcia[1], zanieczyszczenia atmosfery i innych zmiennych oddziaływań środowiskowych),

---

[1]Dla celów koordynacji izolacji przepięcia dzieli się na:
- przepięcia dorywcze (powstające najczęściej podczas zwarć doziemnych i ich eliminowania oraz przy nagłych zmianach obciążenia),
- przepięcia udarowe o łagodnym czole, o stromym czole i o bardzo stromym czole (powstające najczęściej podczas stanów nieustalonych spowodowanych zwarciami, działaniami SPZ, uderzeniami piorunów, procesami łączeniowymi).

b) środków oraz sposobów ograniczania przepięć łączeniowych i dorywczych, np. poprzez synchronizację procesów łączeniowych oraz zastosowanie szeregowych dławików kompensacyjnych lub kondensatorów równoległych,

c) środków ograniczania przepięć piorunowych, np. za pomocą urządzeń osłonowych i ograniczników przepięć.

Zasadniczy wpływ na koordynację izolacji i ochronę sieci elektroenergetycznych przed przepięciami mają obecnie beziskiernikowe ograniczniki przepięć (z warystorami zawierającymi tlenki metali, głównie ZnO). Realizując zadania koordynacyjne dąży się zazwyczaj do uzyskania jak najlepszych efektów technicznych, przy jak najmniejszych nakładach inwestycyjnych i kosztach eksploatacyjnych [4].

Układy izolacyjne znajdujące się we współpracujących z sobą elementach składowych sieci nie są i najczęściej nie powinny być jednakowo wytrzymałe. Poziomy napięć wytrzymywanych przez układy izolacyjne podlegają zróżnicowaniu w zależności od miejsca ich zainstalowania (zadań funkcjonalnych) oraz zdolności do regeneracji własności elektroizolacyjnych po zaniku wyładowania zupełnego. Izolacyjne odstępy powietrzne zaliczane są do grupy tzw. izolacji zewnętrznej, która regeneruje się po każdym przeskoku.

Współczesna koordynacja izolacji polega na wyborze odpowiednich napięć znamionowych i znormalizowanych, które charakteryzują wytrzymałość elektryczną izolacji w sieciach, urządzeniach i aparatach elektroenergetycznych [2, 7]. Ma ona na celu wyznaczenie kolejnych wielkości, którymi są:

1) *napięcia i przepięcia reprezentatywne* (U_{rp}), charakteryzujące (odtwarzające) typowe obciążenia elektryczne (napięciowe) izolacji,
2) *koordynacyjne napięcia wytrzymywane* (U_{cw}) w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych,
3) *wymagane napięcia wytrzymywane* (U_{rw}) podczas prób laboratoryjnych,
4) *znormalizowany poziom izolacji*, czyli taki znamionowy poziom izolacji, dla którego znormalizowane napięcia wytrzymywane (U_w) są skojarzone z najwyższym napięciem urządzenia (U_m), jak w tablicy 1.

Znamionowy poziom izolacji tworzy zestaw następujących znormalizowanych napięć wytrzymywanych, charakteryzujących wytrzymałość elektryczną izolacji:

- w sieciach o napięciu znamionowym nie przekraczającym 220 kV:
  - wytrzymywane napięcie krótkotrwałe o częstotliwości sieciowej (50 Hz),
  - wytrzymywane napięcie udarowe piorunowe, reprezentowane przez udar piorunowy o stromym czole (1,2/50 μs);
- w sieciach o napięciu znamionowym 400 kV i 750 kV:
  - wytrzymywane napięcie udarowe łączeniowe, reprezentowane przez udar łączeniowy o łagodnym czole (250/2500 μs),
  - wytrzymywane napięcie udarowe piorunowe, reprezentowane przez udar piorunowy o stromym czole (1,2/50 μs).

Tablica 1

Znormalizowane poziomy izolacji wg normy europejskiej [7]

U_n/U_m	Izolacja doziemna			Izolacja międzyfazowa
	Znormalizowane napięcie wytrzymywane U_w			
	krótkotrwałe o częstotliwości sieciowej	udarowe piorunowe	udarowe łączeniowe	
Wartość skuteczna w kV		Wartość szczytowa w kV		
3/3,6	10	20; 40	Zakres napięciowy I	
6/7,2	20	40; 60		
10/12	28	60; 75; 95		
15/17,5	38	75; 95		
30/36	70	145; 170		
60/72,5	140	325		
110/123	(185); 230	(450); 550		
220/245	(275); (325); 360; 395; 460	(650); (750); 850; 950; 1050		
400/420	Zakres napięciowy II	1050; 1175 1175; 1300 1300; 1450	850 950 1050	1360 1425 1575
750/765		1675;1800 1800; 1950 1950; 2100	1300 1425 1550	2210 2423 2480

Uwaga: Jeśli wartości podane w nawiasach są niewystarczające do wykazania, że wymagane międzyfazowe napięcia wytrzymywane są zadowalające, to konieczne jest wykonanie dodatkowych prób wytrzymałościowych dla izolacji międzyfazowej.

Zarówno znormalizowany, jak i znamionowy poziom izolacji odpowiadają dość dokładnie znamionowym napięciom probierczym izolacji wysokonapięciowych urządzeń elektrycznych, określonym w normie [9]. Norma ta ma być zastąpiona przez polską wersję normy [7], która wprowadzi niewielkie zmiany w odniesieniu do definicji napięć probierczych oraz ogólnych wskazówek wykonywania prób.

Procedura koordynacji izolacji, opisana szczegółowo w normach [7] i [8] oraz artykule [5], nie jest dalej rozpatrywana. W sieciach o napięciu znamionowym do 400 kV stosuje się powszechnie metodę deterministyczną (przyczynowo-skutkową) koordynacji izolacji. W sieciach o bardzo wysokich napięciach znamionowych podejmuje się zaledwie próby wprowadzenia metody statystycznej uproszczonej. W normach [7], [8] i [9] istnieją dwa wyraźnie zróżnicowane zakresy napięciowe: zakres I ($1\ \text{kV} \le U_m \le 245\text{kV}$) i zakres II ($U_m > 245\ \text{kV}$). Wynika to stąd, że w sieciach średnich i wysokich napięć decydującą rolę w procesie wymiarowania i doboru izolacji odgrywają przepięcia piorunowe. Długości izolacyjnych odstępów powietrznych w sieciach najwyższych napięć są uwarunkowane ich wytrzymałością elektryczną przy udarach łączeniowych, mniejszą o ok. 15% niż przy udarach piorunowych i porównywalną z wytrzymałością przy napięciu przemiennym.

Zarówno odstępy izolacyjne doziemne, jak i odstępy międzyfazowe muszą charakteryzować się wystarczającą wytrzymałością elektryczną przy napięciu roboczym (przemiennym) i rozmaitych przepięciach. Uproszczony warunek ogólny, będący podstawą wymiarowania odstępów powietrznych w sieciach elektroenergetycznych, można sformułować następująco: *średnie przemienne napięcie przeskoku* $\overline{U}_p$ *i 50-procentowe udarowe napięcie przeskoku* U_{p50} *(piorunowe i/lub łączeniowe) izolacyjnego odstępu powietrznego nie może być mniejsze od umownego napięcia obliczeniowego* $U_{obl(j=1,2,3,4)}$ *w zadanych warunkach pracy lub badania,* przy czym wskaźnik "*j*" oznacza rodzaj napięcia - zgodnie z poniższym zestawieniem:

rodzaj napięcia	robocze	probiercze		
	przemienne 50 Hz		udarowe piorunowe	udarowe łączeniowe
j	1	2	3	4

W dalszych rozważaniach świadomie różnicuje się formalny zapis wielkości $\overline{U}_p$ (napięcie przemienne) i U_{p50} (napięcie udarowe).

Napięcie obliczeniowe traktuje się albo jako doziemne napięcie robocze sieci lub urządzenia (o wartości skutecznej w kV)[2]

[2]Dla izolacji międzyfazowej jest to międzyprzewodowe napięcie robocze U_m.

$$U_{obl(j=1)} = k_z \frac{U_m}{\sqrt{3}}, \tag{1a}$$

albo jako średnie lub jedno z 50-procentowych napięć przeskoku (o wartości szczytowej w kV):

$$U_{obl(j2,3,4)} = k_{popr}\, U_{w(j=2,3,4)}, \tag{1b}$$

gdzie:

U_m - największe napięcie urządzenia (międzyprzewodowe, wartość skuteczna w kV),

$k_z = 1 \div \sqrt{3}$ - współczynnik zwarcia doziemnego, uwzględniający sposób pracy punktu neutralnego sieci (odpowiednio dla idealnie uziemionego i odizolowanego punktu neutralnego),

$U_{w(j=2,3,4)}$ - jedno ze znamionowych napięć wytrzymywanych z tabl. 1 (wartości skuteczne lub szczytowe w kV),

$k_{popr} = 1{,}1\,(1{,}2)$ - współczynnik poprawkowy.

Współczynnik k_{popr} uwzględnia szacunkowo szerokość przedziału między średnim (50-procentowym) napięciem przeskoku a umownym statystycznym napięciem wytrzymywanym, które nie może być mniejsze od znormalizowanego napięcia wytrzymywanego. Oznacza to, że napięcia obliczeniowe $U_{obl(j=2,3,4)}$ powinny być większe o ok. 10% od znormalizowanych napięć wytrzymywanych, którymi - dla izolacji regenerującej się - są statystyczne (10-procentowe) napięcia wytrzymywane U_{w10}. Wynika to z następujących relacji:

- dla napięcia probierczego przemiennego

$$\overline{U}_p = \frac{U_{w10}}{1 - 1{,}3\,c_w} \approx 1{,}07\, U_{w10}, \tag{2a}$$

- dla napięć probierczych udarowych (piorunowego i łączeniowego)

$$U_{p50} = \frac{U_{w10}}{1 - 1{,}3\,c_w} \approx (1{,}08 \div 1{,}12)\, U_{w10}, \tag{2b}$$

w których $c_w \approx 0{,}05;\ 0{,}06;\ 0{,}08$ - współczynnik zmienności (stosunek odchylenia standardowego do średniego lub 50-procentowego napięcia przeskoku) odpowiednio dla przemiennego oraz udarowego piorunowego i łączeniowego napięcia przeskoku w umiarkowanych i długich odstępach powietrznych [4].

Większe wartości współczynnika k_{popr} (nie przekraczające jednak poziomu 1,2) można przyjmować dla krótkich odstępów powietrznych (do kilkudziesięciu milimetrów) oraz wtedy, gdy napięcie przeskoku charakteryzuje się znacznym rozrzutem.

Uwzględniając powyższe wymagania, warunek ogólny dotyczący wymiarowania izolacyjnych odstępów powietrznych można zapisać formalnie następująco:

• dla doziemnego napięcia roboczego

$$\overline{U}_p \geq U_{obl(j=1)} = k_z \frac{U_m}{\sqrt{3}}, \tag{3a}$$

• dla napięcia probierczego przemiennego

$$\overline{U}_p \geq U_{obl(j=2)} = k_{popr}\, U_{w(j=2)}, \tag{3b}$$

• dla napięcia probierczego udarowego piorunowego

$$U_{p50} \geq U_{obl(j=3)} = k_{popr}\, U_{w(j=3)}, \tag{3c}$$

• dla napięcia probierczego udarowego łączeniowego

$$U_{p50} \geq U_{obl(j=4)} = k_{popr}\, U_{w(j=4)}, \tag{3d}$$

Napięcia obliczeniowe $U_{obl(j=2,3,4)}$ wyznacza się bezpośrednio na podstawie kolejnych znormalizowanych napięć wytrzymywanych $U_{w(j=2,3,4)}$, zestawionych w tabl. 1. Należy uwzględnić ograniczenia w zbiorach powyższych napięć, wynikające z przynależności sieci do jednego z dwóch zakresów napięciowych (I lub II).

3. WYMIAROWANIE ODSTĘPÓW POWIETRZNYCH W SIECIACH Z PRZEWODAMI GOŁYMI

Przed przystąpieniem do wymiarowania izolacyjnych odstępów powietrznych w sieciach elektroenergetycznych należy:

- wytypować rozważany element składowy sieci (w stacji lub linii napowietrznej),
- podać napięcie robocze sieci (np. poprzez zadeklarowanie napięcia U_m),
- określić znormalizowany poziom izolacji, czyli skojarzyć znamionowy poziom izolacji z napięciem U_m),
- wybrać układy zastępcze elektrod, jako modele obliczeniowe dla rzeczywistych układów izolacyjnych.

Powyższe układy zastępcze elektrod służą do obliczania wytrzymałości elektrycznej odstępów powietrznych w niesymetrycznych układach elektrod, której miarami są:

- średnie przemienne napięcie przeskoku $\overline{U}_p$,
- 50-procentowe udarowe napięcie przeskoku U_{p50} (piorunowe lub łączeniowe, o zadanej biegunowości).

Napięcia przeskoku $\overline{U}_p$ i U_{p50} można wyznaczyć posługując się wynikami badań eksperymentalnych odstępów powietrznych między rozmaitymi zastępczymi elektrodami oraz powstałymi na tej podstawie wzorami empirycznymi. Dla małych i umiarkowanych długości odstępów (do ok. 2500÷3000 mm) wzory te mają najczęściej następującą ogólną postać:

$$\overline{U}_p = A_j a + B_j \qquad (j = 2), \tag{4a}$$

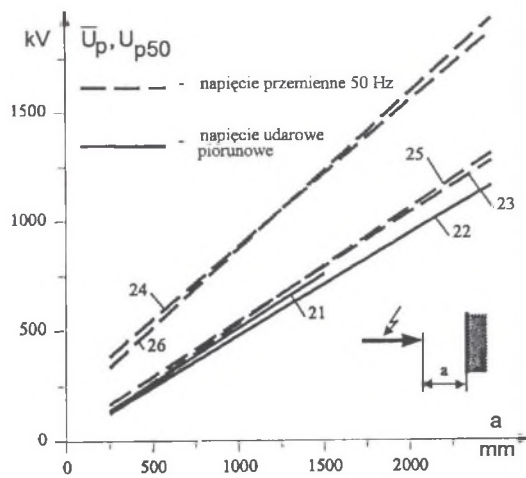
$$U_{p50} = A_j a + B_j \qquad (j = 3), \tag{4b}$$

gdzie:

a - długość izolacyjnego odstępu powietrznego (w mm);

A_j, B_j - stałe obliczeniowe dla przedziałami linearyzowanych empirycznych krzywych wytrzymałościowych (odpowiednio w kV/mm i kV).

W tablicy 2 zestawiono rozmaite wzory empiryczne, służące do obliczania średnich i 50-procentowych napięć przeskoku w powietrzu dla różnych obliczeniowych układów zastępczych elektrod oraz małych i umiarkowanych długości odstępów izolacyjnych. Posługując się wzorami empirycznymi należy zwracać uwagę na warunki ograniczające zakres ich stosowalności. Są one związane przede wszystkim ze stopniem nierównomierności pola elektrycznego między elektrodami, zależącego m.in. od długości odstępów międzyelektrodowych. Średnie i 50-procentowe napięcia przeskoku, wyrażone w zależności od długości odstępu elektrod zastępczych pręt–płyta, przedstawione są przykładowo w postaci zbiorczych wykresów na rys. 1.



Rys.1. Zależności napięcia przeskoku w powietrzu (średnie wartości szczytowe) od długości odstępu elektrod pręt–płyta uziemiona według wzorów empirycznych 21...26 z tabl. 2

Fig. 1. Relationships between the flashover voltage in air (mean peak values) and the gap spacing of the electrode system rod–grounded plate according to empirical formulae 21...26 from the Table 2

Najmniejszą dopuszczalną długość izolacyjnego odstępu powietrznego w sieciach rozdzielczych (SN) można oszacować również z ogólnego wzoru:

$$a \geq \frac{\beta U_{pr(j=2,3)}}{E_{d(j=2,3)}}, \tag{5}$$

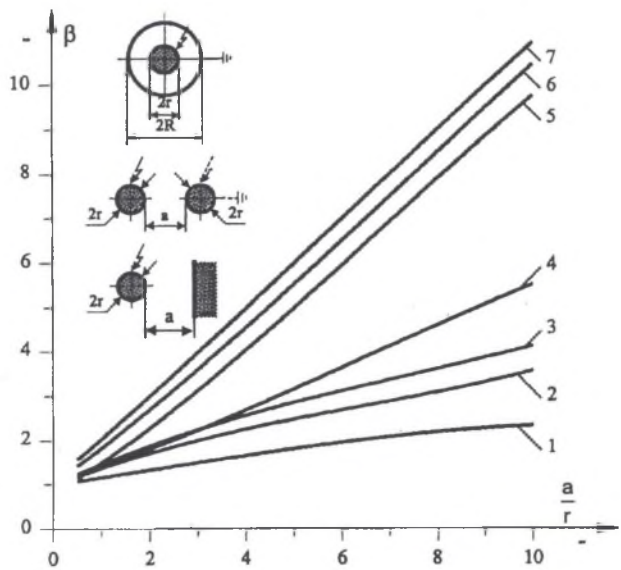
gdzie:

$\beta = \frac{E_{max}}{E_{sr}} \geq 1$ - współczynnik nierównomierności pola elektrycznego w obszarze międzyelektrodowym (rys. 2),

E_{max} - największe natężenie pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej,

$E_{śr} = U/a$ - średnie natężenie pola elektrycznego przy napięciu U między elektrodami,

$E_{d(j=2,3)}$ - dopuszczalne natężenie pola elektrycznego przy napięciu przemiennym ($j = 2$) i udarowym piorunowym ($j = 3$).



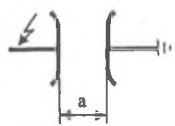
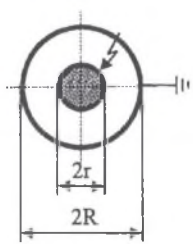
Rys. 2. Współczynnik nierównomierności pola elektrycznego dla kilku układów elektrod: 1- walce ekscentryczne, 2 - walec–płyta uziemiona, 3 - walce koncentryczne, 4 - kule ekscentryczne, 5 - kule ekscentryczne (jedna z kul uziemiona), 6 - kula–płyta uziemiona, 7 - kule koncentryczne (wg [1])

Fig. 2. Non-uniformity electric field factor for several electrode systems: 1 - eccentric cylinders, 2 - cylinder–grounded plate, 3 - concentric cylinders, 4 - eccentric spheres, 5 - eccentric spheres (one sphere grounded), 6 - sphere–grounded plate, 7 - concentric spheres (acc. to [1])

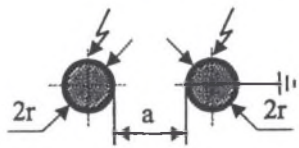
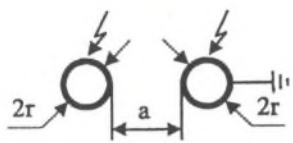
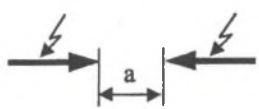
Ze względu na bardzo szacunkowy charakter danych dotyczących elementów składowych, wzór (5) może być przydatny jedynie we wstępnej fazie wymiarowania odstępów izolacyjnych o niewielkich długościach (do ok. 1000 mm). W powyższym wzorze nie uwzględnia się wytrzymałości elektrycznej odstępów izolacyjnych przy udarach łączeniowych ($j = 4$), ponieważ dotyczy on sieci o napięciu znamionowym niższym niż 220 kV.

Tablica 2

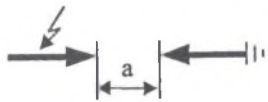
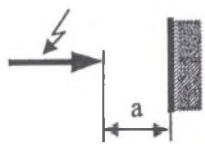
Niektóre wzory empiryczne do obliczania napięć przeskoku w powietrzu dla różnych obliczeniowych układów elektrod oraz małych i umiarkowanych długości odstępów izolacyjnych (wg [1] i [3])

L.p.	UKŁAD ELEKTROD	Napięcie		ŚREDNIA WARTOŚĆ SZCZYTOWA PRZEMIENNEGO I UDAROWEGO NAPIĘCIA PRZESKOKU [1]	Warunki ograniczające [2]	Numer porządkowy wzoru
		przemienne 50 Hz	udarowe piorunowe			
-	-	-	-	kV	-	-
1	2	3	4	5	6	7
1	Płyta – płyta uziemiona 	×		$\overline{U}_p = 3a + 1{,}35 = \sqrt{2}(2{,}12a + 0{,}95)$	$a \le 1$ mm	1
		×		$\overline{U}_p = 2{,}45a + 2{,}2\sqrt{a} = \sqrt{2}(1{,}73a + 1{,}56)$	$10\ \text{mm} \le a \le 200$ mm	2
2	Walce koncentryczne 	×		$\overline{U}_p = \sqrt{2} \cdot 1{,}8 \cdot r\left(1 + \frac{1{,}8}{\sqrt{r}}\right)\ln\frac{R}{r}$	$\frac{R}{r} \le 5$	3
		×		$\overline{U}_p = \sqrt{2} \cdot 2{,}2 \cdot r\left(1 + \frac{0{,}97}{\sqrt{r}}\right)\ln\frac{R}{r}$	$\frac{R}{r} \le 10$	4

cd. tablicy 2

1	2	3	4	5	6	7
3	Walce ekscentryczne 	×		$\overline{U}_p = \frac{\sqrt{2}\cdot 2{,}12\cdot(a-2r)}{\sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2-1}}\left(1-\frac{0{,}03a}{r\sqrt{r}}\right)\operatorname{ar\,cosh}\frac{a}{r}$ 3)	$\frac{a}{r} \le 30$	5
		×		$\overline{U}_p = \sqrt{2}\cdot 2{,}12\cdot\left(1+\frac{0{,}95}{\sqrt{r}}\right)\ln\frac{a}{r}$	$\frac{a}{r} > 30$	6
4	Kule ekscentryczne 	×		$\overline{U}_p = 3a + 1{,}36 = \sqrt{2}(2{,}12a + 0{,}96)$	$\frac{a}{r} \le 2$	7
5	Pręt – pręt 	×		$\overline{U}_p = \sqrt{2}(0{,}37a + 10)$	90 mm ≤ a ≤ 1000 mm	8
		×		$\overline{U}_p = \sqrt{2}(0{,}38a + 15)$	300 mm ≤ a ≤ 2000 mm	9
		×		$\overline{U}_p = \sqrt{2}(0{,}34a + 14)$	80 mm ≤ a ≤ 2500 mm	10
		×		$\overline{U}_p = 0{,}52a + 70 = \sqrt{2}(0{,}37a + 49{,}5)$	a > 400 mm	11
			×	$U^{+}_{p50} = 0{,}6a + 50$	300 mm ≤ a ≤ 2000 mm	12
			×	$U^{-}_{p50} = 0{,}67a + 50$		13

cd. tablicy 2

1	2	3	4	5	6	7
6	Pręt – pręt uziemiony 	×		$\overline{U}_p = \sqrt{2}(0{,}37a + 5)$	80 mm ≤ a ≤ 2500 mm	14
		×		$\overline{U}_p = \sqrt{2}(0{,}36a + 15)$	300 mm ≤ a ≤ 2000 mm	15
		×		$\overline{U}_p = \sqrt{2}(0{,}32a + 14)$	80 mm ≤ a ≤ 2500 mm	16
			×	$U^{+}_{p50} = 0{,}7a + 50$	300 mm ≤ a ≤ 2000 mm	17
			×	$U^{+}_{p50} = 0{,}56a + 75$	400 mm ≤ a ≤ 2500 mm	18
			×	$U^{-}_{p50} = 0{,}6a + 110$		19
			×	$U^{-}_{p50} = 0{,}64a + 81{,}6$	400 mm ≤ a ≤ 2000 mm	20
7	Pręt – płyta uziemiona 	×		$\overline{U}_p = \sqrt{2}(0{,}35a + 10)$	90 mm ≤ a ≤ 1500 mm	21
		×		$\overline{U}_p = \sqrt{2}(0{,}33a + 7)$	80 mm ≤ a ≤ 2500 mm	22
			×	$U^{+}_{p50} = 0{,}5a + 40$	400 mm ≤ a ≤ 2500 mm	23
			×	$U^{-}_{p50} = 0{,}67a + 215$		24
			×	$U^{+}_{p50} = 0{,}53a$	300 mm ≤ a ≤ 3000 mm	25
			×	$U^{-}_{p50} = 0{,}72a + 153{,}6$	400 mm ≤ a ≤ 2000 mm	26

Uwagi: [1] Średnia arytmetyczna $\overline{U}_p$ dla napięcia przemiennego 50 Hz, 50-procentowe napięcie przeskoku U_{p50} dla napięcia udarowego; powietrze o gęstości $\delta = 1$, wymiary elektrod (r, R) i długości odstępów międzyelektrodowych (a) wyrażone w mm.

[2] Z wyjątkiem układu płyta – płyta uziemiona, warunki ograniczające związane są ze stopniem nierównomierności pola elektrycznego.

[3] $\operatorname{ar\,cosh}\frac{a}{r} = \ln\left(\frac{a}{2r} + \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1}\right)$

Napięcie przeskoku dla dużych i bardzo dużych izolacyjnych odstępów powietrznych, o długości co najmniej 2 m, można wyznaczyć posługując się w zasadzie tylko wzorami empirycznymi (tabl. 3). Najbardziej znany jest wzór Galleta-Leroya:

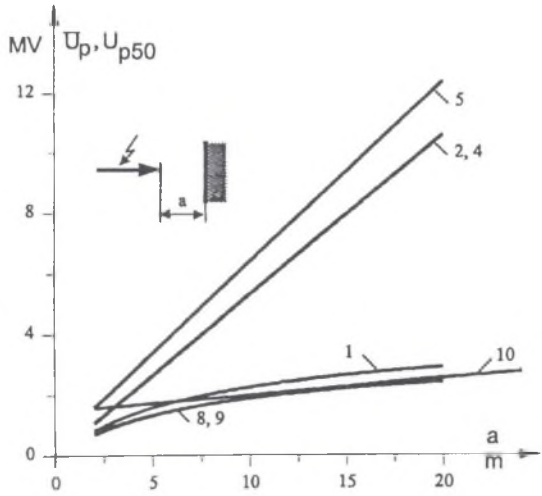
$$U_{p50} = k_i \frac{3400}{1 + \frac{8}{a}}, \tag{6}$$

w którym:

a - długość odstępu powietrznego (w m);

$k_i = 1 \div 1{,}5$ - współczynnik przerwy iskrowej, tj. stosunek wytrzymałości krytycznej (minimalnej) rozważanego odstępu powietrznego do wytrzymałości iskiernika pręt–płyta uziemiona [6].

Większość wzorów zestawionych w tabl. 3 służy do obliczania tzw. krytycznych, czyli minimalnych 50-procentowych napięć przeskoku (U_{kr50}). Jest to szczególnie istotne w przypadku napięć udarowych łączeniowych. Istnieją również wzory empiryczne o postaci analitycznej zbliżonej do wzorów (4). Średnie i 50-procentowe napięcia przeskoku dla długich odstępów powietrznych, wyrażone w zależności od długości odstępu elektrod pręt–płyta uziemiona, przedstawione są w postaci zbiorczych wykresów na rys. 3.



Rys. 3. Zależności napięcia przeskoku w powietrzu (średnie wartości szczytowe) od długości odstępu elektrod pręt–płyta uziemiona według wzorów empirycznych 1...10 z tabl. 3

Fig. 3. Relationships between the flashover voltage in the air (mean peak values) and the gap spacing of the electrode system rod–grounded plate according to empirical formulae 1...10 from the Table 3

Tablica 3

Niektóre wzory empiryczne do obliczania napięć przeskoku w powietrzu dla długich i bardzo długich odstępów powietrznych (wg [4] i [6])

Rodzaj napięcia	Średnia wartość szczytowa napięcia przeskoku	Warunki ograniczające	Uwagi	Nr wzoru
-	kV	-	-	-
Przemienne 50 Hz	$U^{+}_{p50} = U_{kr50} = k_i' \frac{3\,400}{1+\frac{8}{a}}$ *)	$2m \le a \le 20m$	W oparciu o wzór Gafleta-Leroya wartości współczynnika k_i' podane poniżej	1
Udarowe piorunowe	$U^{+}_{p50} = U_{kr50} = (150k_i + 380)a$ *)	$2m \le a \le 20m$	Wg Parisa i in.; wartości k_i podane poniżej	2
	$U^{+}_{p50} = U_{kr50} = E_{kr50}$ *)			3
	$U^{+}_{p50} = 530a + 20{,}4$	$0{,}4m \le a \le 10m$	Układ pręt-płyta uziemiona	4
	$U^{-}_{p50} = 600a + 400$	$2m \le a \le 8m$		5
	$U^{+}_{p50} = 550a + 67{,}8$	$0{,}4m \le a \le 8m$	Układ pręt-pręt uziemiony	6
	$U^{-}_{p50} = 540a + 387$	$3m \le a \le 8m$		7
Udarowe łączeniowe	$U^{+}_{p50} = U_{kr50} = k_i \frac{3\,400}{1+\frac{8}{a}}$ *)	$2m \le a \le 20m$	Wg Galleta i Leroya	8
	$U^{+}_{p50} = U_{kr50} = k_i \frac{1\,350 \cdot a^{0,33}}{1{,}31+\frac{2{,}11}{a}}$ *)	$2m \le a \le 25m$	Wg Harbeca i Manemenlisa	9
	$U^{+}_{p50} = U_{kr50} = (55a + 1\,450)\,k_i$ *)	$13m \le a \le 27m$	Wg Piginiego i in.	10

Rodzaj odstępu powietrznego		Współczynnik przerwy iskrowej przy napięciu: przemiennym 50 Hz k_i	Współczynnik przerwy iskrowej przy napięciu: udarowym k_i	Minimalne udarowe piorunowe napięcie przeskoku E_{kr50}
-		-	-	kV/m
Przewód–słup	fazy skrajne	1,4	1,25	550 ÷ 640
	okno słupa	1,3	1,2	
Przewód–ziemia		1,3	1,1	
Przewód–obiekt uziemiony		1,45	1,35	
Przewód roboczy–przewód roboczy		-	1,5	
Przewód odgromowy–przewód odgromowy		-	1,6	
Pręt–płyta uziemiona		1,2	1	480 ÷ 530

*) Wartość szczytowa średniego (50-procentowego) napięcia przeskoku jest równa – z założenia – minimalnemu (krytycznemu) napięciu przeskoku

4. PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

Przykład 1. Należy oszacować minimalne długości odstępów powietrznych w rozdzielniach wnętrzowych o górnych napięciach znamionowych 6 kV i 110 kV.

W pierwszej kolejności wykorzystano wzór (5) i przyjęto zastępczy układ elektrod walec–płyta uziemiona, a wartość współczynnika nierównomierności pola $\beta \approx 3{,}5$ dla $a/r = 10$ (z krzywej 2 na rys. 2). Dotyczy to napięcia przemiennego i - w znacznym uproszczeniu - napięcia udarowego piorunowego. Na podstawie danych zawartych w [1] i [3] oszacowano, że $E_{d(j=2)} \approx 1{,}41$ kV/mm (wartość skuteczna) i $E_{d(j=3)} \approx 2{,}6$ kV/mm (wartość szczytowa), jeśli współczynnik udaru dla "ostrzopodobnego" układu elektrod $k_u = 1{,}3$.

Dla zbiorów wartości znormalizowanych napięć wytrzymywanych skojarzonych z $U_m = 7{,}2$ kV i $U_m = 123$ kV (tabl. 1) oraz współczynnika poprawkowego $k_{popr} = 1{,}1$ oblicza się kolejne napięcia obliczeniowe $U_{obl(j=2,3,4)}$, uzyskując ze wzoru (5) następujące minimalne długości odstępów powietrznych:

a_{min} (w mm)	dla znormalizowanego napięcia wytrzymywanego	
	krótkotrwałego o częstotliwości sieciowej	udarowego piorunowego
rozdzielnia 6 kV	54	59 ÷ 89
rozdzielnia 110 kV	505 ÷ 625	667 ÷814

Najmniejsze dopuszczalne długości odstępów izolacyjnych w powietrzu, występujące w sieciach rozdzielczych prądu przemiennego, są podane w przepisach [12] i wskazówkach [11]. Z nieformalnego punktu widzenia są to odstępy o małych i umiarkowanych długościach. Najmniejsze dopuszczalne długości odstępów izolacyjnych w powietrzu między elementami toru prądowego a uziemionymi konstrukcjami w rozdzielnicach wnętrzowych o napięciach znamionowych 6 kV i 110 kV wynoszą odpowiednio: $a_{min\,1} = 90$ mm i $a_{min\,2} = 900 \div 1100$ mm (zależnie od przyjętej wartości znormalizowanego napięcia wytrzymywanego udarowego piorunowego). Największe oszacowane długości odstępów powietrznych są więc mniejsze od obecnie dopuszczalnych:

- tylko o ok. 1% w przypadku rozdzielni 6 kV,
- aż o ok. 20% w przypadku rozdzielni 110 kV.

Znaczne zróżnicowanie długości odstępów powietrznych w rozdzielni 110 kV, wynikających z rezultatów obliczeń i wymagań przepisów, może być spowodowane zbyt optymistycznym szacowaniem wartości parametrów we wzorze (5). Oznacza to zaniżenie wartości współczynnika β i/lub zawyżenie wartości dopuszczalnego natężenia pola elektrycznego przy napięciach probierczych (dość arbitralnie przyjęto wartość współczynnika udaru k_u). Może to być również efektem przyjęcia niezbyt odpowiedniego układu zastępczego elektrod. Świadczą

o tym wyniki obliczeń długości odstępów powietrznych w rozdzielni 110 kV, wykonane na podstawie danych dla układu zastępczego elektrod pręt–płyta uziemiona (tabl. 3 i rys. 1). W obliczeniach posługiwano się również wzorami z tabl. 2 (o kolejnych numerach porządkowych 22 i 23) oraz wzorami (3b) i (3c). Z obliczeń tych wynika, że minimalne długości odstępów powietrznych w rozdzielni wnętrzowej o napięciu znamionowym 110 kV wynoszą:

dla znormalizowanego napięcia wytrzymywanego

krótkotrwałego o częstotliwości sieciowej	udarowego piorunowego
595 ÷745 mm	910 ÷ 1130 mm

Obliczone powtórnie długości odstępów powietrznych są więc w zasadzie zgodne z najmniejszymi dopuszczalnymi odstępami w powietrzu w rozdzielni o najwyższym napięciu urządzenia 123 kV.

W stacyjnych urządzeniach rozdzielczych przyjmuje się na ogół takie same długości odstępów izolacyjnych powietrznych doziemnych i międzyfazowych, wynikających przede wszystkim z wymagań w zakresie wytrzymałości udarowej piorunowej. Minimalne odległości między elementami należącymi do różnych obwodów są uzależnione od tego, czy dopuszcza się lub wyklucza pracę ludzi przy urządzeniach jednego obwodu, gdy sąsiedni obwód jest pod napięciem. W celu zapewnienia bezpiecznej obsługi i eksploatacji rozdzielni stosuje się jednak zazwyczaj ogrodzenia ochronne.

Przykład 2. Dla linii napowietrznej o napięciu znamionowym 400 kV i znormalizowanych napięciach wytrzymywanych $U_{w(j=3)} = 1300$ kV (napięcie udarowe piorunowe) oraz $U_{v(j=4)} = 1050$ kV i $U'_{w(j=4)} = 1575$ kV (napięcia udarowe łączeniowe, odpowiednio dla izolacji doziemnej i międzyfazowej) należy obliczyć najmniejsze długości odstępów powietrznych przewód - słup i przewód - przewód roboczy).

Długości izolacyjnych odstępów powietrznych przewód - słup można obliczyć ze wzorów (3c) i (3d). Wyrażają one warunki, aby 50-procentowe napięcie przeskoku przy udarach piorunowych i łączeniowych (tabl. 3, wzory o numerach porządkowych 2 i 8) były nie mniejsze od odpowiadających im napięć obliczeniowych $U_{obl(j=3)}$ i $U_{obl(j=4)}$. Wartości współczynnika przerwy iskrowej we wzorach Parisa i Galleta-Leroya dla odstępu przewód–słup mieszczą się w przedziale $k_i = 1{,}2 \div 1{,}25$ (odpowiednio dla okna słupa i faz skrajnych). Obliczenia wykonuje się przy założeniu upraszczającym, że rozpatrywane części obwodu nie zmieniają swojego położenia, tzn. nie wychylają się pod wpływem wiatru lub zwarciowych sił elektromagnetycznych. Z obliczeń wynika, że długości minimalnego odstępu powietrznego przewód - słup wynoszą:

a_{min} (wm)	dla znormalizowanego napięcia wytrzymywanego	
	udarowego piorunowego	udarowego łączeniowego
fazy skrajne	2,4	3,0
okno słupa	2,5	3,2

Minimalny odstęp powietrzny przewód roboczy–słup powinien mieć więc długość co najmniej 3 m w fazach skrajnych i 3,2 m w oknie słupa.

Długość odstępu przewód - przewód można obliczyć ze wzoru (6) dla współczynnika przerwy iskrowej $k_i = 1{,}5$, a następnie z warunku: $U^{+}_{p50} \geq U_{obl(j=4)} = 1{,}1\, U^{+}_{w(j=4)}$, przy czym $U_{w(j=4)}$ jest znormalizowanym napięciem wytrzymywanym udarowym łączeniowym dla izolacji międzyfazowej (tabl. 1)..Wynika stąd, że minimalna długość odstępu powietrznego przewód–przewód powinna wynosić co najmniej 4,1 m, czyli zaledwie o ok. 30% więcej niż w oknie słupa linii.

O długościach izolacyjnych odstępów powietrznych - zwłaszcza w liniach wysokich i najwyższych napięć - decydują również długość i sposób zawieszenia łańcuchów izolatorów. Długość tych łańcuchów może być uwarunkowana ich wymaganą wytrzymałością powierzchniową (zabrudzeniową), a sposób ich zawieszenia decyduje z kolei o wychyleniach pod wpływem wiatru. Konieczność uwzględnienia tych czynników powoduje, że długości rzeczywistych odstępów powietrznych są większe niż wynikałoby to z obliczeń wykonanych według zastosowanych wzorów empirycznych. Ze względu na przybliżony charakter takich obliczeń, ostatecznym sprawdzianem rezultatów wymiarowania izolacji powietrznej są wyniki prób i badań eksperymentalnych.

5. PODSUMOWANIE

- Ogólne wymagania w zakresie wytrzymałości elektrycznej odstępów powietrznych w sieciach elektroenergetycznych wynikają z postanowień aktualnych norm europejskich dotyczących koordynacji izolacji. Istotne jest wyraźne zróżnicowanie wymagań w zależności od przynależności sieci do tzw. I lub II grupy napięciowej ($U_m \leq 245$ kV i $U_m \geq 245$ kV).
- Podstawą wymiarowania odstępów powietrznych w sieciach elektroenergetycznych wysokiego napięcia jest uproszczony warunek ogólny, aby średnie przemienne napięcie przeskoku oraz 50-procentowe udarowe napięcie przeskoku (piorunowe i/lub łączeniowe) nie było mniejsze od właściwego napięcia obliczeniowego.
- Średnie przemienne napięcia przeskoku i 50-procentowe udarowe napięcia przeskoku dla izolacyjnych odstępów powietrznych można obliczyć za pomocą odpowiednio wybranych wzorów empirycznych (dla zastępczych układów elektrod). Napięcia obliczeniowe wyznacza

się ze zbioru znormalizowanych napięć wytrzymywanych, które identyfikują znamionowy poziom izolacji

• Rezultaty przykładów obliczeniowych wskazują, że kryterium dostatecznej wytrzymałości elektrycznej jest wprawdzie warunkiem koniecznym, ale nie jedynym i wystarczającym do wymiarowania odstępów powietrznych w sieciach elektroenergetycznych. Istotne są również inne uwarunkowania, m.in. bezpieczeństwo ludzi, maszyn i pojazdów przemieszczających się pod liniami napowietrznymi, a ponadto długość i sposób zawieszenia łańcuchów izolatorów. Ostatecznym sprawdzianem poprawności wymiarowania izolacji są wyniki badań.

LITERATURA

1. Afanasjew W.W.: Sprawocznik po elektriczeskim apparatam wysokogo napriażenija. Energoatomizdat, Leningrad 1987.
2. Flisowski Z., Kosztaluk R.: Współczesne metody koordynacji izolacji. „Przegląd Elektrotechniczny" 1998, nr 2, ss. 36-40.
3. Gacek Z.: Przykłady obliczeniowe z techniki wysokich napięć. Skrypt Uczelniany Pol. Śląskiej nr 1831, Gliwice 1994.
4. Gacek Z.: Wysokonapięciowa technika izolacyjna. Wyd. Pol.. Śląskiej, Gliwice 1996.
5. Kosztaluk R., Flisowski Z.: Koordynacja izolacji polskich sieci wysokich napięć. „Przegląd Elektrotechniczny" 1998 nr 2, ss.41-45.
6. Kosztaluk R. i in.: Technika badań wysokonapięciowych, t.I. WNT, Warszawa 1985.
7. EN 600 71-1:1995 (IEC 71-1:1993, Seventh edition). Insulation co-ordination. Part 1: Definitions, principles and rules (w opracowaniu przez NKP nr 80).
8. EN 600 71-2:1997 (IEC 71-2:1996, Third edition). Insulation co-ordination. Part 2: Application Guide (w opracowaniu przez NKP nr 80).
9. PN-81/E-05001 Urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Znamionowe napięcia probiercze izolacji.
10. Ochrona sieci elektroenergetycznych od przepięć; wskazówki wykonawcze. Cz. I: Sieci o napięciu znamionowym od 1 do 110 kV. Polskie Tow. Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, Poznań 1998.
11. Przepisy eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych. Inst. Energetyki,. Wyd. WEMA, cz. I - Warszawa 1989, cz. II - Warszawa 1991.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Skubis

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 maja 2000 r.

Abstract

Principles relating to dimensioning of air insulating clearances in high voltage power stations and overhead lines equipped with bare conductors are the subject area of the paper. Such principles are first of all connected with requirements resulting from a contemporary co-ordination insulation, presented in European standards. Dimensioning of air insulating clearances in overhead power lines with covered conductors, as a different problem, is not considered.

General requirements regarding electric strength of air clearances at the working voltage and various overvoltages are presented. The most important quantities appled in contemporary co-ordination insulation are presented: representative voltages and overvoltages, co-ordinational withstand voltages, required withstand voltages, and standard insulation level.

The simplified general condition, as a base of dimensioning of air clearances in high voltage power networks, is proposed. This condition associates the mean alternative flashover voltage and 50-percent surge flashover voltages with the so called computational voltages which correspond to standard withstand ones.

The method useful to calculation of the mean alternative flashover voltage and 50-percent surge flashover voltages for air insulating clearances in MV, HV and VHV power networks is proposed. Two calculation examples regarding estimation of air-gap minimal distances are presented. These examples concern the following air insulating distances: in 6 kV and 110 kV inside switching stations, in the support of 400 kV overhead power line (conductor–support and conductor–conductor distance).