

Zbigniew GACEK
Marek SZADKOWSKI

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

METODA WSTĘPNEGO WYMIAROWANIA WYSOKONAPIĘCIOWYCH PRZEWODÓW SZYNOWYCH Z SF₆

Streszczenie. Artykuł zawiera opis metody wstępnego wymiarowania hermetyzowanych przewodów szynowych, izolowanych sprężonym sześciofluorkiem siarki. Rozważania obejmują izolację główną przewodów jednobiegunowych, w postaci odstępów gazowych oraz izolatorów wsporczych i przegrodowych, wymiarowaną ze względu na stawiane jej wymagania elektryczne.

Na podstawie danych empirycznych dokonano oceny wytrzymałości elektrycznej podstawowych układów izolacyjnych przy napięciu przemiennym i napięciach uderowych (piorunowym i łączeniowym). Określono kryteria i opracowano algorytm, służący do wymiarowania wysokonapięciowych przewodów szynowych izolowanych sprężonym SF₆. Przedstawiono sposób mikrokomputerowej realizacji zaproponowanego algorytmu oraz wykonano przykład obliczeniowy dla przewodu o napięciu roboczym 123 kV, stanowiącego połączenie transformatora blokowego z wysokonapięciową rozdzielnią napowietrzną. Stwierdzono, że zaproponowana metoda obliczeniowa umożliwiła szybkie wymiarowanie dostatecznie wytrzymałej izolacji głównej przewodów szynowych o zróżnicowanych napięciach roboczych, średnicach toru prądowego i ciśnieniach SF₆.

1. Wprowadzenie

Hermetyzowane przewody szynowe WN, izolowane sprężonym SF₆, są coraz częściej stosowane w elektroenergetyce ze względu na: niewielkie wymiary poprzeczne, niezależność od wpływów zewnętrznych, brak szkodliwego oddziaływania na otoczenie, dużą trwałość i niezawodność oraz bardzo dużą obciążalność prądową (roboczą i zwarciovą). Poniżej zaproponowano metodę wstępnego wymiarowania takich przewodów - wyłącznie ze względu na wymagania elektryczne stawiane odstępom gazowym oraz izolatorom wsporczym i przegrodowym. Rozważania obejmują izolację główną przewodów jednobiegunowych, natomiast nie obejmują izolacji ich odpływów i izolatorów przepustowych.

2. Ocena wytrzymałości elektrycznej izolacji przewodów

Izolacja główna hermetyzowanych przewodów szynowych składa się z wielu odstępów gazowych (sprężony SF_6) oraz współpracujących z nimi izolatorów: wsporczych (instalowanych co kilka metrów) i przegrodowych (instalowanych najczęściej co kilkadziesiąt metrów).

Na skutek uwarunkowań funkcjonalnych i konstrukcyjnych wszystkie gazowe układy izolacyjne są zbliżone do układu obliczeniowego w postaci dwóch walców współosiowych, o umiarkowanie nierównomiernym polu elektrycznym. Najbardziej wiarygodnych informacji o wytrzymałości takich układów dostarczają badania eksperymentalne [1,2,4]. Zakładając, że:

- ciśnienie robocze sześciofluorku siarki $p = 0,1 - 0,4$ MPa,
- średnica zewnętrzna toru prądowego $d = 38 - 200$ mm,
- chropowatość powierzchni toru prądowego nie przekracza $30 \mu\text{m}$,

w praktyce można posługiwać się następującymi wzorami empirycznymi, wyrażającymi wartości szczytowe:

a) 50-procentowego natężenia przeskoku (w kV/mm)

$$E_{50} = A_{1j}p + B_{1j}, \quad (1)$$

b) wytrzymywanego natężenia pola elektrycznego (w kV/mm)

$$E_w = E_{50}(1 - 3\delta), \quad (2)$$

c) napięcia wytrzymywanego (w kV)

$$U_w = E_w \frac{D}{\beta} = 0,5 d E_w \ln \frac{D}{d}, \quad (3)$$

gdzie: $\delta \leq 0,05$ - współczynnik zmienności natężenia przeskoku^{x)};

D - średnica wewnętrzna osłony przewodu, w mm;

$a = 0,5(D - d)$ - długość odstepu międzyelektrodowego, w mm;

$\beta (D/d) > 1$ - współczynnik nierównomierności pola elektrycznego;

A_{1j}, B_{1j} - empiryczne współczynniki obliczeniowe o następujących wartościach:

rodzaj napięcia (i)	przemienne		udarowe piorunowe		udarowe łączeniowe	
	+ i -	+	-	+	-	
biegunowość napięcia (j)						
A_{1j} (w kV/mm. MPa)	44	88	63	74	45	
B_{1j} (w kV/mm)	3,5	1,5	2,4	3	4,5	

^{x)} Największe rozrzuty natężenia przeskoku rejestruje się podczas prób udarami łączeniowymi [2,4].

Wytrzymałość odstępów gazowych jest zmienną losową, o rozkładzie prawdopodobieństwa zbliżonym do podwójnie wykładniczego - dokładniej - do rozkładu wielkości minimalnych I typu [1]. "Trzysignowy" zapas wytrzymałości, założony we wzorze (2), odpowiada w przybliżeniu kwantylowi natężenia przeskoku, o stopniu, wynoszącym zaledwie 0,001 (ryzyko przeskoku w pojedynczym przedziale gazowym nie przekracza więc 0,1%). Zapewnia to dostateczną niezawodność izolacji całego przewodu jako struktury szeregowej.

Bardzo ważnymi elementami funkcjonalnymi izolacji głównej hermetyzowanych przewodów szynowych są również wporcze i przegrodowe izolatory epoksydowe. Najczęściej mają one postać tarczy (dysku) lub kielicha (uciętego stożka). Wytrzymałość powierzchniowa takich specyficznych izolatorów jest silnie uzależniona od rodzaju i stanu ich powierzchni, a nawet od obecności śladowych zanieczyszczeń [1,4].

Pomimo stosowania różnych zabiegów konstrukcyjnych pole elektryczne wokół izolatorów jest dość silnie nierównomierne. Ze względu na znaczne uzależnienie od cech geometrycznych, materiałowych i jakościowych wytrzymałość elektryczną izolatorów można "a priori" jedynie oszacować. Jeśli izolatory są poprawnie skonstruowane (w uzasadnionych przypadkach wyposażone w ekran sterujące), to wartość skuteczną największego roboczego natężenia pola elektrycznego (w kV/mm) wewnątrz takich konstrukcji określa przybliżony wzór^{x)}:

$$E_{iz} \cong \frac{2 \beta_{iz} U_m}{\sqrt{3} (D-d)} = \frac{\beta_{iz} U_m}{\sqrt{3} a} \quad (4)$$

w którym:

U_m - największe dopuszczalne długotrwałe napięcie robocze przewodu szynowego, w kV;

$\beta_{iz} \leq 1,3 - 1,6$ - współczynnik nierównomierności pola elektrycznego, odpowiednio dla izolatorów tarczowych i kielichowych [4].

3. Kryteria i algorytm wstępnego wymiarowania przewodów szynowych

Podstawowym kryterium wymiarowania rozpatrywanych przewodów jest warunek, aby odstęp gazowy przy ciśnieniu roboczym SF_6 wytrzymywał wszystkie znamionowe napięcia probiercze, zadane w normach [5] i [6]. Przyjmując, że $d = \text{var}$ oraz uwzględniając wzory (1), (2) i (3), najmniejsza średnica osłony przewodu (w mm), dopuszczalna ze względu na wymaganą wytrzymałość statyczną i udarową odstępów gazowych, wynika z zależności:

^{x)} W rozważaniach pominięto skrośną i powierzchniową wytrzymałość udarową, znacznie większą od wytrzymałości przy napięciu przemiennym.

$$(D_{ij})_{\max} = d \exp \left\{ \frac{2 U_{pri}}{d(A_{1j} p + B_{1j})(1 - 36)} \right\}_{\max} \leq D_{oblI}, \quad (5)$$

w której:

U_{pri} - wartości szczytowe znamionowego napięcia probierczego i-tego rodzaju, w kV;

D_{oblI} = $d + \Delta D$ - średnica wewnętrzna osłony w I etapie obliczeń, zaokrąglona do najbliższej wartości całkowitej z szeregu wymiarowego, w mm;

ΔD = 10 mm - założony skok zmienności;

$k > 0$ - liczba całkowita, równa połowie wartości stosunku długości obliczonego odstępu gazowego do skoku ΔD .

Następny krok w I etapie obliczeń ma na celu sprawdzenie, czy odstęp gazowy o długości $s_{oblI} = 0,5 (D_{oblI} - d)$ wykazuje dostateczną wytrzymałość przy napięciu roboczym i awaryjnym obniżeniu się ciśnienia SF_6 do wartości 0,1 MPa. Wartość skuteczną napięcia przemienne (w kV), wytrzymawanego przez rozhermetyzowany odstęp gazowy, oblicza się ze wzoru (3), przekształconego do postaci:

$$U_w^* = \frac{1}{\sqrt{2}} (0,1 A_1 + B_1)(1-36) \frac{s_{oblI}}{\beta_I} \approx 2,37 d \ln \frac{D_{oblI}}{d} \quad (6)$$

$$\text{przy czym } \beta_I = \frac{2s_{oblI}}{d \ln \frac{D_{oblI}}{d}}.$$

Jeśli napięcie obliczone ze wzoru (6) nie jest mniejsze od napięcia $U_m \sqrt{3}$, to nie ma potrzeby dokonywania zmian D_{oblI} . W przeciwnym przypadku należy zwiększyć średnicę osłony do wartości:

$$D_{oblI}^* = D_{oblI} + k \Delta D \geq D^* = d \exp \frac{U_m}{4,1 d}, \quad (7)$$

gdzie D^* - najmniejsza dopuszczalna średnica wewnętrzna osłony ze względu na wytrzymałość rozhermetyzowanego odstępu gazowego, w mm.

Drugi etap obliczeń polega na sprawdzeniu, czy odstęp gazowy o długości s_{oblI}^* nie narzuca zbyt małej średnicy zewnętrznej izolatora^{x)}. Ze względu na brak wiarygodnych danych o wytrzymałości skrośnej i powierzchniowej izolatorów epoksydowych SF_6 można postawić jedynie wymaganie, aby natężenie pola elektrycznego obliczone wg wzoru (4) nie przekraczało wartości dopuszczalnej, skąd:

^{x)} Gwiazdką w nawiasie oznacza się dalej rozwiązania alternatywne, wynikające albo z wymagań wytrzymałościowych przy ciśnieniu roboczym (bez gwiazdki), albo po rozhermetyzowaniu się przedziału gazowego (z gwiazdką).

$$D_{oblI}^{(*)} \geq D_{iz} = \frac{2\beta_{iz} U_m}{\sqrt{3} E_d} + d, \quad (8)$$

przy czym: $E_d \geq 2$ kV/mm - wartość skuteczna największego dopuszczalnego długotrwałe natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatora ^{x)}; D_{iz} - minimalna średnica osłony, dopuszczalna ze względu na dostateczną wytrzymałość elektryczną długotrwałą izolatora, w mm.

Jeśli warunek (8) jest spełniony, to średnicę obliczeniową osłony wyznacza się ze zbioru wartości $D_{oblI}^{(*)}$. W przeciwnym przypadku należy ją zwiększyć do wartości $D_{oblII}^{(*)} = D_{oblI}^{(*)} + k \Delta D$.

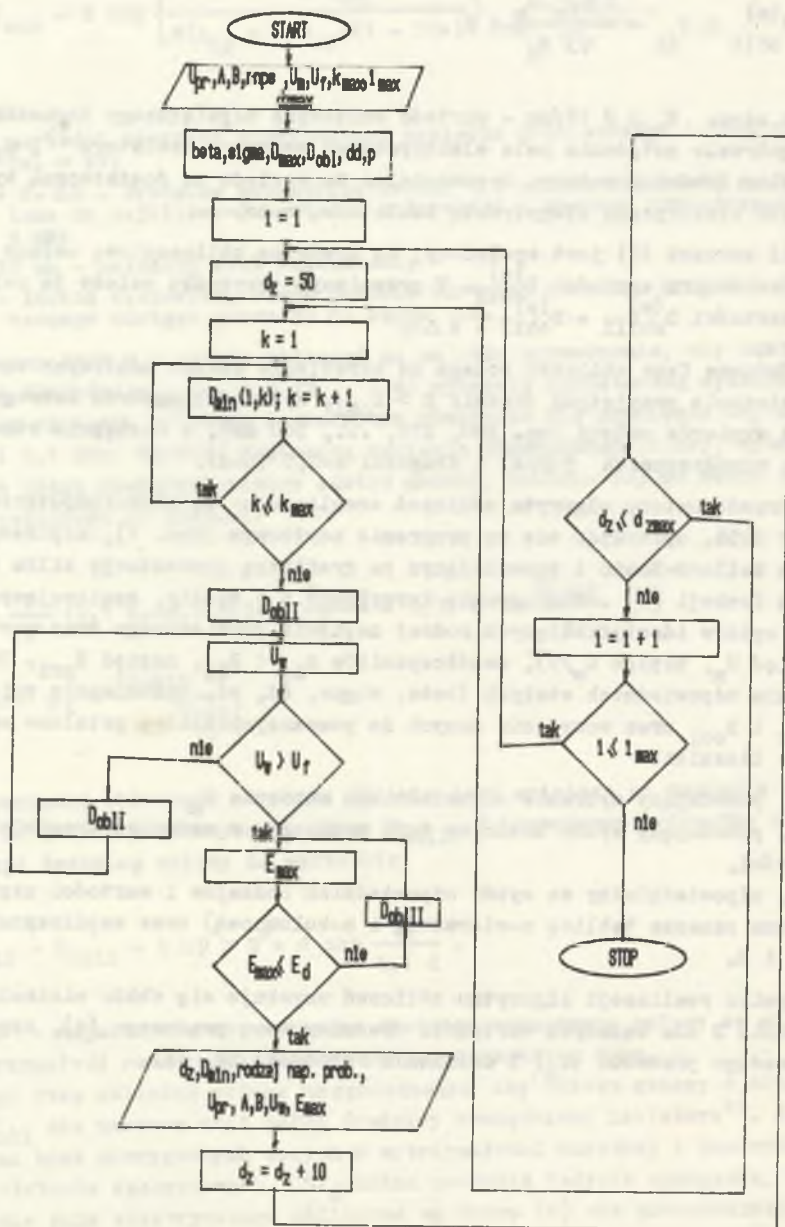
Końcowa faza obliczeń polega na określeniu zbioru możliwych wartości ostatecznie przyjętych średnic $D > D_{obl}$, wybranych spośród szeregu typowych wymiarów osłony (np. 200, 250, ..., 500 mm), a następnie stosunku D/d , współczynnika $\beta (D/d)$ i długości $a=0,5 (D-d)$.

Przedstawiony algorytm obliczeń zrealizowano na mikrokomputerze Schneider 8256, opierając się na programie użytkowym (rys. 1), napisanym w języku Mallard-Basic i pozwalającym na graficzną prezentację kilku wybranych funkcji [3]. W programie korzystano z 5 tablic, zawierających zbiory: opisów identyfikujących rodzaj napięcia probierczego oraz wartości napięć U_m , napięć $U_m/\sqrt{3}$, współczynników A_{ij} i B_{ij} , napięć U_{pr} . Po oznaczeniu odpowiednich stałych (beta, sigma, dd, p), wyzerowaniu zmiennych D_{max} i D_{obl} oraz wczytaniu danych do powyższych tablic ustalono następujące liczniki:

- r, powodujący wybranie odpowiedniego napięcia U_m ,
- d, powodujący wybór średnicy toru prądowego z zadanego przedziału wartości,
- t, odpowiedzialny za wybór odpowiednich rodzajów i wartości napięć U_{pr} (nxm oznacza tablicę n-wierszową i m-kolumnową) oraz współczynników A i B.

W wyniku realizacji algorytmu obliczeń uzyskuje się zbiór minimalnych średnic D dla zadanych wartości: średnicy toru prądowego (d), napięcia roboczego przewodu (U_m) i ciśnienia roboczego SF_6 (p).

^{x)} Obecnie, w obawie przed zbyt szybką degradacją własności izolatorów epoksydowych, przyjmuje się dość niski poziom tego natężenia ($E_d=2-2,5$ kV/mm)



Rys. 1. Schemat blokowy programu obliczeń mikrokomputerowych

Fig. 1. Block diagram of the program of microcomputer calculations

4. Przykład obliczeniowy

Rozważa się 3-fazowy hermetyzowany przewód szynowy o napięciu $U_m = 123$ kV i długości ok. 150 m, stanowiący połączenie transformatora blokowego z wysokonapięciową rozdzielnią napowietrzną. Przewód, składający się z 3 jednobiegunowych torów prądowych (rury aluminiowe), otoczonych uziemionymi osłonami koncentrycznymi (rury aluminiowe o grubości 5 mm), jest ułożony na estakadzie i zawiera 15 przedziałów gazoszczelnych, wypełnionych SF_6 o ciśnieniu roboczym $p = 0,25$ MPa. Przewód jest wyposażony w 12 izolatorów przegrodowych oraz 180 izolatorów wsporczych tarczowych. Średnice złączy stykowych nie różnią się wyraźnie od średnicy toru prądowego przewodu.

Do obliczeń przyjęto następujące założenia:

- 1) napięcie robocze izolacji doziemnej $U_m/\sqrt{3} = 71$ kV (wg normy [6]),
- 2) wartości szczytowe znamionowego napięcia probierczego przemiennego $U_{pr1} = 262$ kV i znamionowego napięcia probierczego piorunowego $U_{pr2} = 450$ kV^{x)},
- 3) zbiór typowych średnic zewnętrznych toru prądowego $d = 80, 100, 120$ mm, a średnic wewnętrznych osłony $D = 150, 200, 250, 300$ mm.

Na podstawie wyników obliczeń, zestawionych w tabl. 1, przewód szynowy o średnicy toru prądowego $d = 80-120$ mm powinien być wyposażony w osłonę o średnicy 200-250 mm, co odpowiada długości odstepu międzyelektrodowego $a = 60-75$ mm. Efektywność wykorzystania własności elektroizolacyjnych sprężonego SF_6 oraz zapasy wytrzymałości izolacji głównej takiego przewodu można ocenić następująco:

- stosunki D/d są mniejsze od liczby Eulera, co nie pozwala w pełni wykorzystać własności elektroizolacyjnych gazu,
- najefektywniejszy pod tym względem jest przewód o średnicy toru prądowego 100 mm i średnicy osłony 250 mm,
- pole elektryczne wewnątrz osłony nie wykazuje znaczącej nierównomierności ($\beta < 2$),
- współczynniki zapasu wytrzymałości odstepów gazowych są wystarczająco duże (przy probierczym napięciu przemiennym $k_1 = 1,6 - 2,1$ a przy probierczym napięciu udarowym $k_2 = 1,2 - 1,5$),
- zapas wytrzymałości rozhermetyzowanego odstepu gazowego przy napięciu roboczym jest wysoki ($k_1 = 2,3 - 3,1$), natomiast zapas długotrwałej wytrzymałości elektrycznej skrośnej izolatorów jest mniejszy niż w większości pozostałych przypadków ($k_{1z} = 1,1 - 1,6$).

^{x)} Normy [5] i [6] nie przewidują badań izolacji urządzeń 123 kV napięciem udarowym łączeniowym.

Tablica 1

Wyniki obliczeń wymiarów poprzecznych i niektórych parametrów elektrycznych hermetyzowanego przewodu szynowego 123 kV

Srednica zewnetrzna toru przewodowego d (w mm) ¹⁾	80	100	120
Minimalna srednica wewnetrzna oslony D_{1j} (w mm)	1,136	1,53	1,71
przy napięciu probierczym ²⁾	1,48	1,64	1,81
udarowym piorunowym dodatnim	1,66	1,79	1,95
udarowym piorunowym ujemnym	1,16	1,35	1,54
Minimalna srednica wewnetrzna oslony D_{1z}^* (w mm) ³⁾	1,172	1,52	1,71
Minimalna srednica wewnetrzna oslony D_{1z} (w mm) ⁴⁾	1,200	1,50	1,70
Przyjeta srednica wewnetrzna oslony D (w mm) ⁵⁾	60	75	65
Przyjeta dlugosc odstępu miedzyelektrodowego $a=0,5(D-d)$ (w mm)	2,5	2,5	2,1
Stosunek srednicy oslony i toru przewodowego $m = D/d$	1,64	1,44	1,64
Wspolczynnik nierównomiernosci pola elektrycznego $\beta = (m-1)/\ln m$ ⁶⁾	1,72	1,63	2,15
Wspolczynnik zapasu wytrzymałości odstępu gazowego	1,25	1,19	1,51
$k_1 = U_{1i}/U_{1p}$ przy napięciu probierczym ⁷⁾	2,45	2,31	3,06
Wspolczynnik zapasu wytrzymałości odstępu rozhermetyzowanego $k_1^* = \sqrt{3} U_{1i}^*/U_{1m}$ ⁸⁾	1,3	1,08	1,41
Wspolczynnik zapasu wytrzymałości elektrycznej skrośnej izolatorów $k_{1z} = E_d/E_{1z}$ ⁹⁾			

Uwagi: 1) Wartości przyjęte arbitralnie. 2) Kryterium dostatecznej wytrzymałości odstępu gazowego przy napięciach probierczych (wg [5] i [6]) i ciśnieniu roboczym SP. 3) Kryterium dostatecznej wytrzymałości rozhermetyzowanego przedziału gazowego przy napięciu roboczym. 4) Kryterium dopuszczalnej długotrwałej wytrzymałości elektrycznej skrośnej izolatorów. 5) Wartości wybrane z szeregu wymiarowego średnio osłony. 6) Dla odstępu gazowego. 7) Napięcie wytrzymałowe U_{1i} ma $E_{1i} \beta$, przy czym E_{1i} - największe natężenie pola elektrycznego wytworzone przez odstęp gazowy przy ciśnieniu roboczym i napięciu przemienowym lub udarowym piorunowym ujemnym. 8) Dla odstępu gazowego przy przemienowym napięciu roboczym i ciśnieniu 0,1 MPa. 9) Największe natężenie pola elektrycznego wewnątrz izolatora tarozowego $E_{1z} = \beta_{1z} U_{1m}/\sqrt{3}a$, przy czym $\beta_{1z} = 1,3$.

5. Wnioski

1. Podstawowym kryterium wstępnego wymiarowania izolacji głównej hermetyzowanych przewodów szynowych jest dostateczna wytrzymałość elektryczna:

- odstępów gazowych przy ciśnieniu roboczym SF_6 i znamionowych napięciach probierczych,
- chwilowo rozhermetyzowanego przedziału gazowego (przy napięciu roboczym),
- izolatorów wsporczych i przegrodowych przy napięciu roboczym.

2. Zaproponowana metoda obliczeniowa umożliwia szybkie wymiarowanie dostatecznie wytrzymałej izolacji głównej przewodów szynowych o zróżnicowanych napięciach roboczych, średnicach toru prądowego i ciśnieniach SF_6 .

3. Wstępne i cząstkowe wyniki obliczeń powinny być zweryfikowane eksperymentalnie, szczególnie w zakresie rzeczywistej wytrzymałości skrośnej i powierzchniowej konkretnych izolatorów epoksydowych.

LITERATURA

- [1] АФАНАСИЕВ В.В. и ин.: Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения. "Энергоатомиздат", Ленинград 1987.
- [2] BARGIGIA A. i in.: Study of the dielectric strength of SF_6 insulated metal-enclosed substitions and application to their design and testing. CIGRE 33-12, 1982 Session.
- [3] GACEK Z., SZADKOWSKI M.: Analiza kryteriów wymiarowania układów izolacyjnych przewodów szynowych. Oprac. IEISU w ramach tematu CPBP 1.4.3. Gliwice 1987 (nie publik.).
- [4] ПОЛТИЕВ А.И.: Конструкции и расчёт элегазовых аппаратов высокого напряжения. Энергия, Ленинград 1979.
- [5] PN-81/E-05001 Urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Znamionowe napięcia probiercze izolacji.
- [6] PN-86/E-05155 Urządzenia elektroenergetyczne. Wysokonapięciowa aparatura rozdzielcza i sterownicza. Wspólne wymagania i badania.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Zbigniew Pohl

Wpłynęło do redakcji dnia 4 kwietnia 1989 r.

МЕТОД ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ШИНОПРОВОДОВ ОЗОЛИРОВАННЫХ ЭЛЕГАЗОМ

Резюме

Статья содержит описание метода предварительного определения размеров герметизированных шинопроводов, изолированных слатой гестифтористой серой

/элегазом/. Рассуждения касаются главной изоляции однополюсных шинопроводов, в виде элегазовых промежутков, а также опорных и перегораживающих изоляторов, рассмотренной с точки зрения требований электрической прочности. Опираясь на эмпирические данные, определена электрическая прочность главной изоляции в условиях переменного и ударного напряжения /коммутационные и молниевые удары/. На основе этого приведены критерии, а затем метод составления алгоритма определения размеров высоковольтных шинопроводов изолированных элегазом. Предложен способ реализации алгоритма с применением микрокомпьютера и в качестве примера проведён расчёт для шинопровода 123 КВ, как соединения блочного трансформатора с наружной высоковольтной подстанцией. Отмечено, что предложенный метод вычисления даёт возможность быстрого определения размеров достаточно прочной главной изоляции герметизированных шинопроводов для разных значений рабочего напряжения, разных диаметров токопровода и разных рабочих давлений элегаза.

METHOD OF PRELIMINARY DIMENSIONING OF THE HIGH-VOLTAGE SF₆ INSULATED BUSES

S u m m a r y

The article comprises a description of the method of preliminary dimensioning of the high-voltage SF₆ - insulated buses. The subject under consideration is the main insulation of one-phase tubular buses, consisting of pressurized SF₆ gaps as well as stand-off and barrier insulators, which overall dimensions are calculated with regard to their electric requirements. Basing on empirical data the electric strength of gas-tight bus insulation systems (under alternating voltage, lightning surge and switching impulse voltage) is evaluated. These results have allowed to determine the suitable criteria and algorithm of dimensioning of high-voltage SF₆ - insulated buses. Besides, microcomputer embodiment of the proposed algorithm has been presented and a practical calculation example, for a tubular bus with an operating voltage 123 kV linking a unit transformer with a high-voltage switching overhead substation, has been made. It has been found that the above calculation method allows rapid dimensioning of a sufficiently strong gas-tight bus insulation under different working voltages, diameters of current conductor and SF₆ pressures.