

Zbigniew GACEK

WYMIAROWANIE IZOLATORÓW ODSTĘPNIKOWYCH W GAZOSZCZELNYCH PRZEWODACH SZYNOWYCH

Streszczenie. Artykuł zawiera opis metody efektywnego wymiarowania izolatorów odstępnikowych w wysokonapięciowych przewodach szynowych 123-420 kV, izolowanych SF₆. Pożądane własności techniczne i kryteria doboru tych izolatorów określono ze względu na wymagania elektryczne.

Opierając się na oryginalnych programach komputerowych wykonano wielo-wariantowe obliczenia rozkładu pola elektrycznego i zaproponowano sposób wyznaczania wymiarów geometrycznych izolatorów.

DIMENSIONNING OF SOLID DIELECTRIC SPACERS FOR SF₆-INSULATED BUSES

Summary. This paper presents the method of an effective designing process of solid dielectric spacers for 123-420 kV conductors, insulated with compressed SF₆. The technical properties and criteria of the spacer's dimensioning were defined with respect to the electrical requirements.

On the base of original microcomputer programs and the multivariant numerical calculations of electrical field distribution the method of spacers was proposed.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ МЕЖЭЛЕКТРОДНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ В ГЕРМЕТИЗИРОВАННЫХ ШИНОПРОВОДАХ

Резюме. В статье предложен эффективный метод определения размеров межэлектродных изоляторов в герметизированных шинопроводах 123-420 кВ с элегазовой изоляцией. Технические свойства и критерии подбора этих изоляторов разработано с точки зрения электрических требований. Опираясь на оригинальные компьютерные программы сделано многовариантные расчеты распределения электрического поля и предложено метод определения геометрических размеров изоляторов.

1. WPROWADZENIE

Izolacja gazoszczelnego przewodu szynowego składa się z odstępów gazowych (sprężony SF₆) oraz specyficznych izolatorów odstępnikowych: wsporczych i

grodziowych. Izolatory te są ważnymi, lecz newralgicznymi elementami składowymi układu izolacyjnego przewodu.

W artykule rozważa się zagadnienie wymiarowania i kształtowania geometrycznego izolatorów odstępnikowych w jednobiegunowych gazoszczelnych przewodach szynowych 123-420 kV. Zagadnienie to jest rozpatrywane ze względu na wymagania w zakresie wytrzymałości elektrycznej izolatorów. Podstawą rozważań są wyniki wielowariantowych obliczeń numerycznych rozkładu pola elektrycznego, zrealizowanych na podstawie dwóch oryginalnych programów komputerowych.

2. WYMAGANE WŁAŚCIWOŚCI I KRYTERIA WYMIAROWANIA IZOLATORÓW

Izolatory odstępnikowe muszą spełniać określone wymagania w zakresie wytrzymałości elektrycznej skrośnej i powierzchniowej, a ponadto w zakresie: odporności cieplnej, wytrzymałości mechanicznej (statycznej i dynamicznej) oraz jakości wykonania. Współdecydują one o niezawodności, masie, koszcie i warunkach montażu przewodu szynowego. Ze względu na możliwość wystąpienia bardzo niekorzystnych zjawisk powierzchniowych i procesów starzeniowych, izolatory odstępnikowe są najsłabszym ogniwem izolacji przewodu (patrz [2]).

Dalsze rozważania są ograniczone tylko do wymagań związanych z wytrzymałością elektryczną długotrwałą izolatorów przy przemiennym napięciu roboczym. Pominięto skrośną i powierzchniową wytrzymałość udarową izolatorów, na ogół znacznie większą od wytrzymałości przy napięciu przemiennym. Kryteria i algorytm wymiarowania izolacji gazowej przewodów szynowych, ze względu na wytrzymałość krótkotrwałą (przy napięciach probierczych), są przedstawione w artykule [3] i referacie [4].

Najtrudniejsze problemy techniczne i technologiczne związane z konstruowaniem izolatorów odstępnikowych polegają na:

- niedopuszczeniu do powstania jakichkolwiek wyładowań niezupełnych,

- zapewnieniu dostatecznej wytrzymałości elektrycznej skrośnej i powierzchniowej.

Problemy te rozwiązuje się poprzez: dobór odpowiedniego materiału izolacyjnego stałego, odpowiednie ukształtowanie geometryczne izolatorów i - niekiedy - stosowanie wewnętrznych lub zewnętrznych ekranów sterujących rozkładem pola elektrycznego.

Większość wymagań technicznych i technologicznych stawianych materiałom służącym do wytwarzania izolatorów odstępnikowych spełniają w dużym stopniu różnorodne kompozycje żywic epoksydowych z odpowiednio dobranymi napełniaczami nieorganicznymi [5]. W uzasadnionych przypadkach stosuje się również inne nieceramiczne materiały izolacyjne, szczególnie plastyczne kopolimery o małej względnej przenikalności elektrycznej.

Wytrzymałość elektryczna izolatorów odstępnikowych wykonanych z określonego materiału zależy również od:

- jakości wykonania i montażu elementów konstrukcji (szczególnie na styku izolatorów z szyną prądową),
- stanu powierzchni izolacyjnej, tj. stopnia szorstkości i zdolności do adhezji cząstek zanieczyszczeń,
- kształtu geometrycznego izolatorów.

Kształt geometryczny izolatorów odstępnikowych jest uzależniony od rodzaju konstrukcji przewodu, poziomu jego napięcia roboczego i innych czynników. W praktyce stosuje się najczęściej izolatory dyskowe i kielichowe. Izolatory dyskowe są prostsze do wykonania, ale ich niektóre właściwości elektryczne i mechaniczne są zwykle gorsze od analogicznych właściwości izolatorów kielichowych. Ma to istotne znaczenie w przypadku przewodów szynowych bardzo wysokich napięć.

Ogólna zasada obowiązująca w zakresie optymalnego kształtowania izolatorów odstępnikowych polega na wyborze kombinacji ich odpowiednio skoordynowanych wymiarów geometrycznych (średnic, profili krawędzi bocznych itd.) oraz

- ewentualnie - wymiarów geometrycznych ekranów sterujących. Dobierając kształt izolatora ze względu na wymagania elektryczne należy stosować następujące kryteria:

- 1) rozkład przestrzenny pola elektrycznego wewnątrz i wokół izolatora powinien być jak najmniej nierównomierny,
- 2) natężenie pola elektrycznego wewnątrz izolatora powinno być możliwie małe, a jego największa wartość nie może przekraczać poziomu uznawanego za dopuszczalny długotrwałe,
- 3) największe natężenie pola elektrycznego w dowolnym punkcie powierzchni izolatora nie może przekraczać największego natężenia pola w odstępnie gazowym.

Powyższe kryteria są sformułowane szerzej w tabelicy 1.

Pierwsze kryterium ma na celu zapewnienie możliwie efektywnego wykorzystania właściwości izolacyjnych sprężonego SF_6 i uwarstwionego z nim dielektryku stałego. Jest to o tyle istotne, że wytrzymałość elektryczna tego gazu nie różni się zbytnio od wytrzymałości kompozycji izolatorowych. Kryterium jest trudne do jednoznacznego sformułowania pod względem ilościowym, ponieważ pole elektryczne wewnątrz i wokół izolatora jest zawsze bardziej nierównomierne niż pole elektryczne w przestrzeni międzyelektrodowej. Kryterium to ma charakter ogólny i pomocniczy.

Drugie kryterium wynika z konieczności zapewnienia izolatorom dostatecznej trwałości i odporności na różnorodne procesy starzeniowe. Największe dopuszczalne długotrwałe natężenie pola elektrycznego wewnątrz izolatora odstępnikowego jest obecnie przyjmowane na dość niskim poziomie, gdyż średnio $E_d = 2,5 \text{ kV/mm}$ (wartość skuteczna). Jest to spowodowane głównie trudnościami związanymi z wytwarzaniem dostatecznie jednolitych materiałowych kompozycji izolatorowych.

Tablica 1

Kryteria wymiarowania izolatorów odstępnikowych w gazoszczelnym przewodzie szynowym

KRYTERIUM OBLICZENIOWE

Rodzaj kryterium		Sformułowanie
1	Minimalne zakłócenie rozkładu pola elektrycznego w przewodzie	Rozkład przestrzenny pola elektrycznego w obszarze zainstalowania izolatora zbliżony do rozkładu w odstepie gazowym
2	Dostateczna wytrzymałość elektryczna skrośna długotrwała izolatora przy napięciu roboczym	Największe natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatora: $\text{Max } E_i \leq E_d$ 1)
3	Dostateczna wytrzymałość elektryczna powierzchniowa przy napięciu roboczym	Największe natężenie pola elektrycznego na powierzchni izolatora: $\text{Max } E_s \leq 0,95 \text{ Max } E_g$ 2)
Uwagi: 1) $E_d = 2,5 \text{ kV/mm}$ - największe dopuszczalne długotrwałe natężenie pola elektrycznego wewnątrz izolatora; 2) $\text{Max } E_g$ - największe natężenie pola elektrycznego w odstepie gazowym		

Trzecie kryterium wynika z konieczności ograniczenia do minimum ryzyka wystąpienia przeskoku powierzchniowego. Należy w tym celu kierować się praktyczną zasadą, aby maksimum natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatora było mniejsze o co najmniej kilka procent od największego natężenia pola w odstepie gazowym (tj. poza obszarem oddziaływania izolatora).

Obraz pola elektrycznego w pobliżu i wewnątrz izolatora można zmieniać nie tylko poprzez zmianę jego kształtu i dobór odpowiedniej kompozycji materiałowej (istotna jest przenikalność elektryczna materiału), ale również poprzez zastosowania elektrostatycznych ekranów sterujących. Jest to jednak

uzasadnione w odniesieniu do niektórych przewodów szynowych, o napięciu roboczym 420 kV i wyższym [2].

3. OBLICZENIA NUMERYCZNE I DOPUSZCZALNE ROZWIĄZANIA WYMIAROWE IZOLATORÓW ODSTĘPNIKOWYCH

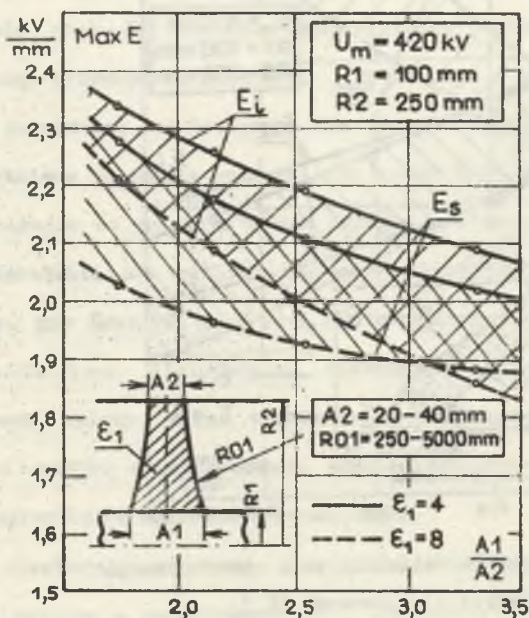
Dalsze rozważania oparte są na wynikach obliczeń numerycznych pola elektrycznego w jednobiegunowych przewodach szynowych 123-420 kV, wyposażonych w izolatory dyskowe lub kielichowe. Konstrukcje te odwzorowywano za pomocą uproszczonych modeli obliczeniowych, zróżnicowanych pod względem ukształtowania geometrycznego.

Algorytm obliczeń parametrów pola elektrycznego oparty jest na metodzie równań całkowo-brzegowych. Operatorem całkowym w tych równaniach jest potencjał warstwy pojedynczej, zadany na powierzchniach izolacyjnych i aproksymowany metodą funkcji sklejaných [1]). Pozwoliło to zalgebraizować, a następnie rozwiązać numerycznie powyższe równania metodą elementów brzegowych.

Obliczenia numeryczne zrealizowano opierając się na dwóch mikrokomputerowych programach użytkowych IZO_DYSK (izolatory dyskowe) i IZO_KIEL (izolatory kielichowe). Programy te służą również do wykonywania obliczeń dla izolatorów odstępnikowych z wewnętrznymi lub zewnętrznymi ekranami sterującymi [2].

Rezultatem obliczeń numerycznych dla modelu izolatora o założonych danych wejściowych jest zbiór przestrzennie uporządkowanych wartości: potencjału elektrycznego oraz składowych i modułów wektora natężenia pola. Można w ten sposób wyznaczyć największe wartości modułów wektora natężenia pola wewnątrz i na powierzchniach bocznych izolatora (E_1 i E_S wyszczególnione w tabelicy 1). Natężenia te zależą nie tylko od napięcia roboczego, średnic szyny prądowej i osłony przewodu oraz przenikalności elektrycznej materiału izolatorowego, lecz również od kształtu geometrycznego izolatora.

Na podstawie wielu obliczeń numerycznych wyznaczono zależności przydatne do projektowania izolatorów odstępnikowych. Niektóre z tych zależności pokazane są przykładowo na rysunkach 1 i 2. Dotyczą one modelu przewodu szynowego 420 kV o określonych wymiarach poprzecznych i parametrach materiałowych ($\epsilon_1 = 4-8$). Są to zależności między natężeniami pola E_1 i E_s a następującymi parametrami geometrycznymi izolatorów^{*)}:



Rys. 1. Największe spodziewane natężenie pola elektrycznego:

- wewnątrz izolatora dyskowego (E_1),
- na powierzchni izolatora dyskowego (E_s),

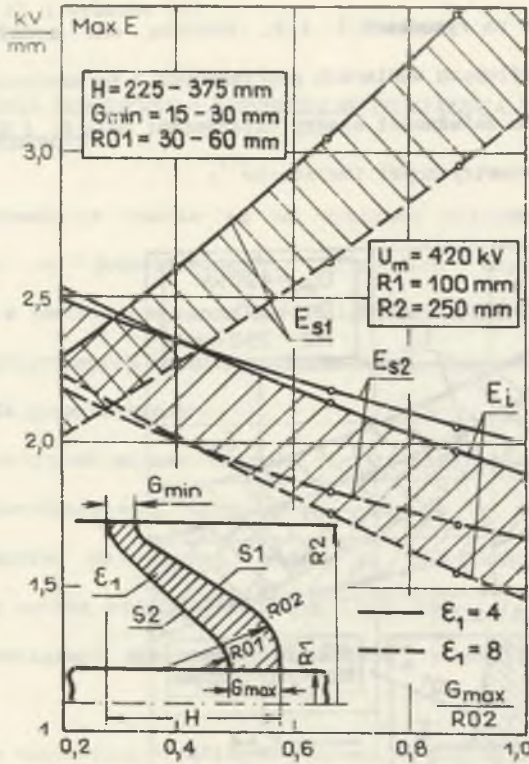
w zależności od parametru geometrycznego A_1/A_2 (wg [2])

Fig. 1. The utmost expected electric strength moduli:

- inside a disc-type spacer (E_1),
- on the surface of a disc-type spacer (E_s),

according to the geometrical parameter A_1/A_2 [2]

^{*)} Izolator klelichowy ma dwie powierzchnie boczne: zewnętrzną (S_1) i wewnętrzną (S_2). Stąd dwa różne natężenia pola elektrycznego: E_{s1} i E_{s2} (rys. 2).



Rys.2. Największe spodziewane natężenie pola elektrycznego:

- wewnątrz izolatora kielichowego (E_i),
- na powierzchni zewnętrznej (E_{s1}) i powierzchni wewnętrznej (E_{s2}) izolatora kielichowego,

w zależności od parametru geometrycznego $G_{max}/RO2$ (wg [2])

Fig.2. The utmost expected electric strength moduli:

- inside a conical-type spacer (E_i),
- on external surface (E_{s1}) and internal surface (E_{s2}) of a conical-type spacer,

according to the geometrical parameter $G_{max}/RO2$ [2]

- największą względną grubością ścianki izolatora dyskowego ($A1/A2$),
- względną krzywizną zewnętrznej powierzchni bocznej izolatora kielichowego ($G_{max}/RO2$).

Z wykonanych obliczeń numerycznych dla różnych modeli izolatora dyskowego (rys.1) wynika, że:

- największe spodziewane wartości natężenia pola elektrycznego wewnątrz i na powierzchni izolatora występują bezpośrednio przy powierzchni lub w pobliżu szyny prądowej i maleją nieliniowo ze wzrostem parametru $A1/A2$,
- natężenie pola E_1 nie przekracza poziomu dopuszczalnego według kryterium 2, a natężenie pola E_S poziomu dopuszczalnego według kryterium 3 (dla analizowanego przewodu 2,52 kV/mm).

Podobne zależności stwierdzono dla modeli izolatora kielichowego z wyjątkiem maksimum natężenia pola na jego zewnętrznej powierzchni bocznej E_{S1} (rys.2). Natężenie to wykazuje bowiem wyraźną tendencję nieliniowego wzrostu w miarę zwiększania się wartości parametru $G_{max}/RO2$, przekraczając poziom dopuszczalny, gdy $G_{max}/RO2 \geq 0,46-0,72$ (odpowiednio dla $\epsilon_1 = 4-8$). Chcąc zapewnić izolatorowi kielichowemu dostateczną wytrzymałość elektryczną powierzchniową należy więc starannie wyprofilować jego powierzchnię zewnętrzną w okolicy szyny prądowej, gdyż możliwości zmniejszenia grubości ścianki są ograniczone względami mechanicznymi.

Badania symulacyjne wykonane w znacznie szerszym, niż zaprezentowany, zakresie są opisane w sprawozdaniu [2]. Pozwoliły one sformułować niektóre zasady dotyczące wymiarowania izolatorów odstępnikowych w gazoszczelnych przewodach szynowych 123-420 kV:

- podstawowym rodzajem konstrukcji izolatora wsporczego i grodziowego, szczególnie w przewodach 123 i 245 kV, powinien być izolator dyskowy bez ekranu sterującego,
- średnica zewnętrzna izolatora dyskowego nie może być mniejsza od minimalnej dopuszczalnej średnicy osłony przewodu, wyznaczonej w procesie wymiarowania izolacji gazowej ([3] i [4]),
- ukształtowanie geometryczne izolatora dyskowego powinno wynikać z warunków: $A1/A2 \geq 1,5$ i $RO1 > 300\text{mm}$ (patrz szkic na rys.1),

- izolator kielichowy może być uzasadnionym rozwiązaniem alternatywnym dla izolatora dyskowego w przewodzie o napięciu roboczym 420 kV (głównie jako izolator grodziowy),
- minimalna średnica zewnętrzna izolatora kielichowego powinna być równa minimalnej średnicy zewnętrznej izolatora dyskowego,
- izolator kielichowy powinien być tak ukształtowany w pobliżu szyny prądowej, aby względna krzywizna jego zewnętrznej powierzchni bocznej $G_{max}/R_{O2} \leq 0,5$ (dla materiału izolacyjnego o przenikalności $\epsilon_1 = 6$),
- izolatory odstępnikowe w przewodzie szynowym o napięciu roboczym 420 kV mogą być wyposażone w odpowiednio ukształtowane zewnętrzne ekrany sterujące, przy czym nie zaleca się stosowania mało efektywnych ekranów wewnętrznych.

Powyższe zasady wymiarowania izolatorów odstępnikowych nie uwzględniają wpływu wielu istotnych czynników konstrukcyjnych i wykonawczych. Szczegóły w tym zakresie można rozważać jedynie po dokonaniu jednoznacznych ustaleń materiałowych, technologicznych i konstrukcyjnych dla konkretnego rozwiązania przewodu szynowego.

4. WNIOSKI

1. Z obliczeń numerycznych wykonanych dla modeli gazoszczelnych przewodów szynowych wynika, że najważniejszymi parametrami geometrycznymi izolatorów odstępnikowych, decydującymi o ich właściwościach elektrycznych, są:
 - największa względna grubość ścianki A1/A2 (izolatory dyskowe),
 - największa krzywizna zewnętrznej powierzchni bocznej G_{max}/R_{O2} (izolatory kielichowe).
2. Badania symulacyjne dowodzą, podstawowym rodzajem konstrukcji izolatorów odstępnikowych dla przewodów szynowych 123-420 kV powinny być odpo-

wiednio uprofilowane izolatory dyskowe bez ekranów sterujących, o względnej grubości ścianki $A1/A2 \geq 1,5$. Rozwiązaniem alternatywnym dla przewodów o napięciu 420 kV mogą być izolatory kielichowe, lecz tak ukształtowane w pobliżu szyny prądowej, aby $G_{max}/R02 \leq 0,5$ (dla materiału izolacyjnego o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1 = 6$).

3. Sformułowane zasady wymiarowania izolatorów dyskowych i kielichowych ze względu na wymagania elektryczne mogą być wykorzystane we wstępnych fazach projektowania jednobiegunowych gazoszczelnych przewodów szynowych 123-420 kV.

LITERATURA

- [1] Baron B., Gacek Z.: Modelowanie matematyczne pola elektrycznego w wysokonapięciowych hermetyzowanych przewodach szynowych. ZN Pol. Śl. serii Elektryka, z.124. Gliwice 1991.
- [2] Gacek Z.: Analiza kryteriów wymiarowania i kształtowania układów izolacyjnych przewodów szynowych 123-420 kV. CBPB 02.18-1.4.3.2 (etap V). Pol. Śl. Gliwice 1990 (praca niepublikowana).
- [3] Gacek Z.: Wymiarowanie izolacji gazowej hermetyzowanych przewodów szynowych 123-420 kV. ZN Pol. Śl. serii Elektryka, z.124. Gliwice 1991.
- [4] Gacek Z., Paszek G.: Preliminary Dimensioning of High Voltage SF₆-Insulated Buses. 3rd Intern. Conf. ICPADM-91. Rep. 52.7 (GIS). Tokyo, July 1991.
- [5] Rygał R.: Próba uzyskania krajowego napełniacza korundowego dla kompozycji epoksydowej stosowanej jako izolacja stała szynoprzewodu izolowanego SF₆. Pr. dokt., Pol. Śl., Gliwice 1991.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Romuald Wiodek

Wpłynęło do redakcji dnia 2 marca 1992 r.

DIMENSIONING OF SOLID DIELECTRIC SPACERS FOR SF₆-INSULATED BUSES

A b s t r a c t

This paper presents the results of an effective designing process of specific post-type dielectric spacers and barrier spacers for high voltage buses which are insulated with compressed SF₆. The problem was realized with algorithmic methods by using computer programs. Spacers considered were those produced from any material and with any geometrical shape so long as they indicate rotary symmetry. The spacers are designed with respect to the electrical requirements.

When the technical properties of the spacers were defined, the criteria of practical selection and the spacer's dimensioning were proposed. The criteria secured the proper across and surface electrical withstand of the spacers. The consideration of details were based on computational results of the electrical field distribution in 123-420 kV conductors, which are furnished with disc or conical spacers.

The above data were obtained on the base of multivariant numerical calculations, which are results of original microcomputer programs. The programs enable to calculate the space parameters of electrical field distribution in composed insulation systems. The computational process enables also to design the spacers with the external and internal screens.

On the base of the analysis of the greatest values of the electrical field vector components and moduli, the most important correlation of selected insulation properties on geometrical shape of the spacers were determined. The proposed procedure and the results of computation may be used in the designing process or in the proceedings which may have to optimize the high voltage construction of the buses insulated with compressed SF₆.