

Zbigniew Gacek<sup>1</sup>, Tomasz Rusek<sup>1</sup>

## METODA RACJONALNEGO WYBORU NIEKTÓRYCH PARAMETRÓW PRZEDZIAŁU GAZOSZCZELNEGO W PRZEWODZIE GIL

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono wyniki analizy numerycznej, mającej na celu określenie racjonalnego poziomu wartości wybranych parametrów przedziału gazoszczelnego wysokonapięciowych jednobiegunowych przewodów szynowych (GIL). Podstawą rozważań była metodyka wyboru optymalnych parametrów konstrukcyjnych przewodów GIL, opracowana w IEiSU Politechniki Śląskiej. Celem analizy było określenie wpływu tych parametrów na stopień spełnienia wymagań technicznych stawianych przewodom GIL.

**Słowa kluczowe:** gazoszczelne przewody szynowe, funkcja spełnienia wymagań

### 1. Ogólna charakterystyka metody wyboru

Izolacja wysokonapięciowych przewodów szynowych izolowanych sprężonym sześciofluorkiem siarki (GIL – Gas Insulated Lines) pracuje w dość nietypowych i trudnych warunkach eksploatacyjnych, wynikających z określonych obciążeń: elektrycznych, cieplnych i mechanicznych. Jedną z charakterystycznych cech tej izolacji jest duża wrażliwość na nierównomierność pola elektrycznego, na ogół znacznie silniejszego niż w tradycyjnych układach izolacji zewnętrznej (powietrznej). Cecha ta narzuca konieczność szczególnie starannego doboru oraz wymiarowania izolacji gazowej i stałej, współdecydującej o niezawodności, masie, koszcie i warunkach montażu przewodu szynowego.

Zaproponowana metoda wyboru niektórych parametrów przedziału gazoszczelnego w przewodzie GIL zapewnia ocenę stopnia spełnienia, często znacznie różniących się od siebie, wymagań technicznych [1, 4]. Wymagania te można podzielić na trzy grupy dotyczące: wytrzymałości elektrycznej, wytrzymałości mechanicznej i odporności cieplnej.

Spełnienie wymagań elektrycznych sprowadza się w ogólnym ujęciu do: doboru stosownej kombinacji skoordynowanych wymiarów geometrycznych, nie przekroczenia poziomu natężenia pola elektrycznego uznawanego za dopuszczalny długotrwale, zapewnienia jak najmniej nierównomiernego rozkładu pola elektrycznego oraz niedopuszczenia do powstawania jakichkolwiek form wyładowań niezupełnych.

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

Wymagania mechaniczne są określane w celu zapewnienia ogólnie pojętej wytrzymałości mechanicznej elementów przewodu, a w szczególności nie przekroczenia dopuszczalnego poziomu naprężeń i zapewnienia ochrony poszczególnych elementów konstrukcyjnych przed określonymi narażeniami mechanicznymi. Wymagania cieplne sprowadzają się do doboru podstawowych parametrów geometrycznych oraz zapewnienia dostatecznej odporności cieplnej w warunkach normalnych i zwarciovych.

Spośród rozmaitych metod optymalizacji wielokryterialnej do praktycznej realizacji wybrano tzw. metodę hierarchiczną. Wykorzystuje ona kolejność (ważność) poszczególnych kryteriów, a poza tym jej charakter pozwala na oddzielne rozpatrywanie kryteriów optymalizacyjnych. Dodatkową zaletą metody hierarchicznej jest ograniczony zakres obliczeń optymalizacyjnych (poprzez zawężanie zbioru rozwiązań w kolejnych krokach procesu optymalizacji) oraz możliwość bieżącej modyfikacji procesu optymalizacji (poprzez zmianę wskaźnika jakości dla danego kryterium). Metoda ta była szczegółowo prezentowana na VII Sympozjum EUI'99 [2].

## 2. Sposób oceny rozwiązań

Do oceny każdego kryterium proponuje się wykorzystanie funkcji spełnienia wymagań [3], będącej jednolitą charakterystyką jakości dla danego kryterium:

$$H_i = \exp [ - \exp ( - h_i ) ] \quad (1)$$

Funkcja ta określa stopień spełnienia *i*-tego wymagania w skali od 0 do 1 (rys. 1), natomiast jest bezwymiarową zmienną związaną z *i*-tym kryterium  $K_i$ . Na podstawie obowiązujących przepisów, oceny panujących warunków i ograniczeń narzuconych optymalizowanej konstrukcji przewodów szynowych należy określić wartości kryterium  $K_i$  (uznane za całkowicie niedopuszczalne) oraz wartości kryterium  $K_1$  (uznane za całkowicie zadowalające). Pozwala to sformułować wzór:

$$h(x) = a \ln(x) + b \quad (2)$$

w którym *a* i *b* są współczynnikami rzeczywistymi.

Na tej podstawie można uzyskać bezwymiarową wartość wskaźnika jakości, który określa poziom spełnienia wymagań danego kryterium  $H_i$  dla rozpatrywanych wartości parametrów rozważanego wariantu. Jeśli kryterium wynika jednocześnie z kilku warunków, to funkcję spełnienia należy wyznaczać jako:

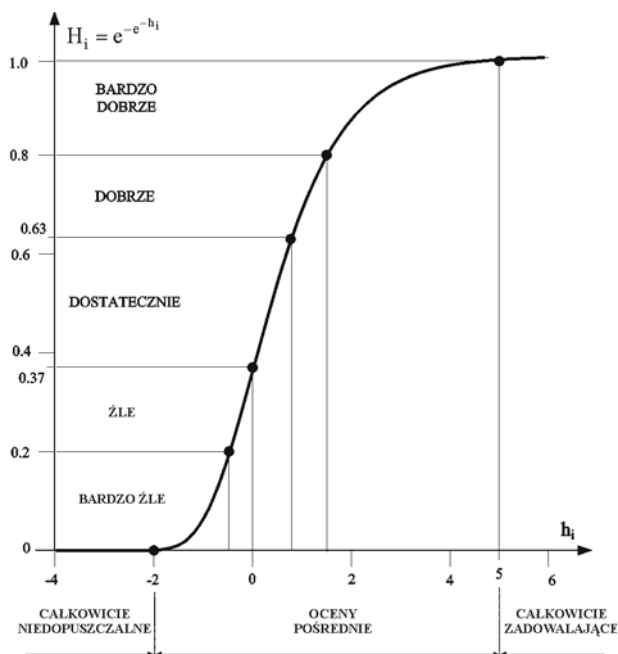
$$H_i = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n H_{ik}} \quad (3)$$

gdzie:  $H_{ik}$  – stopień spełnienia *k*-tego warunku w *i*-tej grupie wymagań, *n* – ilość warunków rozważanych w danym kryterium.

Korzystając z powyższej własności, dla znanych wartości funkcji spełnienia wymagań dotyczących każdego z kryteriów technicznych można wyznaczyć sumaryczną funkcję spełnienia, będącą miarą jakości technicznej rozwiązania przedziału gazoszczelnego przewodu GIL:

$$H_{sum} = \sqrt[3]{H_e H_m H_c} \quad (4)$$

gdzie:  $H_e$ ,  $H_m$ ,  $H_c$  – wartości funkcji spełnienia wymagań odpowiednio dla kryterium elektrycznego, mechanicznego i cieplnego.



Rys. 1. Przebieg funkcji spełnienia wymagań (wg [3])

### 3. Parametry zbioru analizowanych rozwiązań

Obliczenia wykonano dla przewodów szynowych o napięciach znamionowych  $U_n = 110$  kV ( $U_m = 123$  kV) i  $U_n = 400$  kV ( $U_m = 420$  kV) oraz prądach znamionowych  $I_n = 1,25$  kA i  $I_n = 2,5$  kA. Podobnie jak w [4], przyjęto następujące założenia ogólne:

- przewód szynowy jest wykonany w wersji jednobiegunowej i napowietrznej,
- elementy fazowe przewodu są ułożone w układzie płaskim,
- obudowy poszczególnych faz są połączone na obu końcach,
- izolatory grodziowe są izolatorami dyskowymi,
- szyna prądowa i osłona zewnętrzna są wykonane z aluminium,
- odcinki szyn są łączone poprzez docisk,
- oraz wybrano podstawowe parametry przedziału przewodu szynowego:
  - długość przedziału gazoszczelnego  $l = 12$  m,
  - ciśnienie robocze gazu  $p = 0,15 \div 0,4$  MPa,
  - parametry geometryczne szyny prądowej i osłony zewnętrznej:

napięcie robocze GIL	$U_n = 123 \text{ kV}$					$U_n = 420 \text{ kV}$				
promień zewnętrzny szyny prądowej $R_1$ [mm]	40	50	60	70	80	60	80	100	120	140
grubość ścianki szyny prądowej $g_{1s}$ [mm]	5	8	8	10	10	15	20	20	20	20
promień zewnętrzny osłony zewnętrznej $R_2$ [mm]	100	120	140	160	180	200	225	250	275	300
grubość ścianki osłony zewnętrznej $g_{1o}$ [mm]	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Do obliczeń wykorzystano program komputerowy SZYNY napisany na podstawie wersji numerycznych procedur opisanych w [2] i [4].

## 4. Wyniki analizy numerycznej

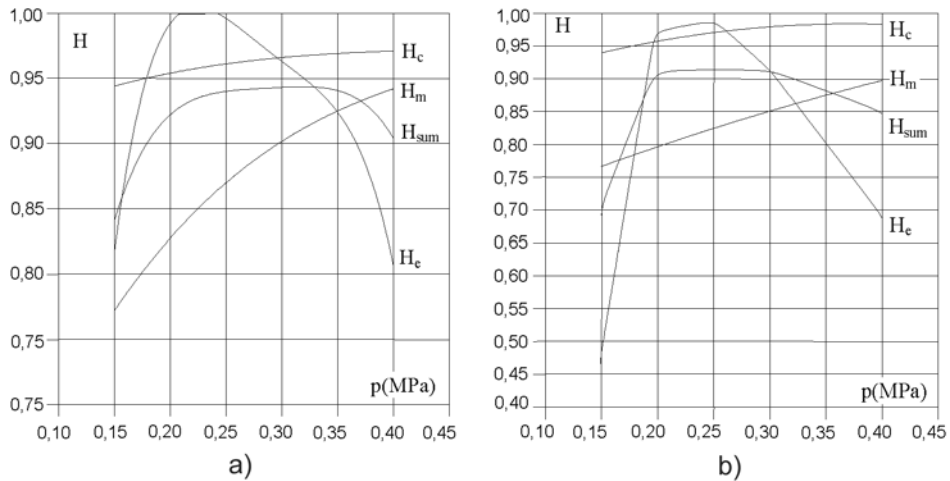
### 4.1. Wpływ kryteriów technicznych na wartość funkcji $H_{sum}$

Wpływ ciśnienia roboczego na postać cząstkowych funkcji spełnienia wymagań ( $H_c$ ,  $H_m$ ,  $H_e$ ) jest wprawdzie zróżnicowany dla poszczególnych kryteriów technicznych, ale sumaryczna funkcja spełnienia wymagań wykazuje wyraźną zależność od zastosowanego ciśnienia roboczego  $SF_6$ . Na rysunku 2 przedstawiono zależność sumarycznej funkcji spełnienia wymagań i jej poszczególnych składników od ciśnienia roboczego gazu. Kształt krzywej wypadkowej zależy przede wszystkim od uwarunkowań wynikających z kryteriów elektrycznego i mechanicznego, ponieważ dla tych kryteriów obserwuje się największą zmienność stopnia spełnienia wymagań w zależności od ciśnienia. Zwiększanie ciśnienia roboczego nie powoduje jednak wzrostu sumarycznej wartości funkcji spełnienia wymagań w całym przedziale wartości ciśnienia. Powyżej i poniżej określonych wartości ciśnienia obserwuje się gwałtowny spadek wartości funkcji  $H_{sum}$ . Kryterium decydującym o takim stanie jest kryterium elektryczne. Cząstkowe funkcje spełnienia wymagań związane z kryterium mechanicznym i cieplnym w zakresie rozważanych ciśnień są funkcjami monotonicznie rosnącymi. Kryterium odporności cieplnej decyduje jedynie o wartościach wypadkowej funkcji spełnienia wymagań, bez znaczącego wpływu na kształt wypadkowej krzywej.

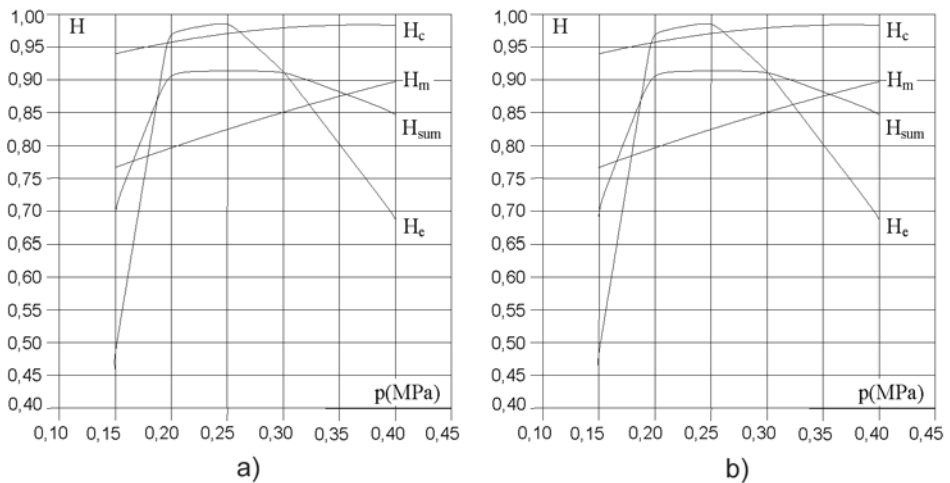
### 4.2. Wpływ ciśnienia na wartość funkcji $H_{sum}$

Ciśnienie gazu ma znaczący wpływ na stopień spełnienia wymagań, czyli jakość techniczną rozwiązania. Jak wynika z rys.3, wszystkie krzywe przedstawiające zależność sumarycznej funkcji spełnienia wymagań od ciśnienia roboczego  $SF_6$  mają podobny kształt. Różnią się one jedynie wartościami funkcji  $H_{sum}$  dla poszczególnych rozwiązań (o rozmaitych wymiarach geometrycznych, ale praktycznie stałym stosunku  $R_1/R_2$ ). We wszystkich przypadkach można wskazać przedział wartości ciśnień roboczych  $SF_6$ , w którym wartości funkcji  $H_{sum}$  różnią się niewiele od wartości maksymalnej. Wyniki analizy numerycznej dla rozwiązań o napięciach  $U_n = 110 \text{ kV}$  i  $U_n = 400 \text{ kV}$  są do siebie zbliżone. W przewodach o napięciu znamionowym 110 kV wypadkowa funkcja spełnienia wymagań utrzymuje wysoką i w przybliżeniu niezmienną wartość, gdy ciśnienie robocze mieści się

w przedziale  $p = 0,2 \div 0,35$  MPa. W przypadku rozwiązań o napięciu  $U_n = 400$  kV przedział ten jest nieco węższy ( $p = 0,2 \div 0,3$  MPa).



**Rys.2.** Funkcja spełnienia wymagań kryteriów cząstkowych: elektrycznego  $H_c$ , mechanicznego  $H_m$  i cieplnego  $H_c$  oraz sumaryczna  $H_{sum}$  dla rozwiązań o napięciu znamionowym: a) 110 kV, b) 400 kV



**Rys.3.** Sumaryczna funkcja spełnienia wymagań w zależności od ciśnienia roboczego  $SF_6$  dla rozwiązań o różnych wymiarach geometrycznych ( $R_1/R_2$ ) i napięciach znamionowych: a) 110 kV, b) 400 kV

### 4.3. Wpływ wymiarów geometrycznych na wartość funkcji $H_{sum}$

Analizowano również wpływ wymiarów geometrycznych (średnice osłony zewnętrznej i szyny prądowej, ich grubości, długości przedziałów gazoszczelnych) na poziom wartości funkcji spełnienia wymagań. Jako parametr odniesienia przyjmowano kolejno stosunek promienia osłony zewnętrznej i szyny prądowej ( $R_2/R_1$ ), różnice tych promieni ( $R_2 - R_1$ ) i długość

przedziału gazoszczelnego (I). Nie stwierdzono wyraźnego wpływu tych parametrów na wartość funkcji spełnienia wymagań. Sumaryczna funkcja spełnienia jest co prawda „pochodną” funkcji cząstkowych dla poszczególnych kryteriów technicznych (zależnych od parametrów geometrycznych), ale brak jest prawidłowości upoważniających do wyciągania wniosków ilościowych.

## 5. Wnioski

Wartość funkcji spełnienia wymagań elektrycznych, mechanicznych i cieplnych stawianych przewodom GIL zależy znacząco od ciśnienia roboczego SF<sub>6</sub> i możliwe jest wskazanie racjonalnego przedziału ciśnień, dla których wartość H<sub>sum</sub> przyjmuje największe wartości.

Z wykonanych obliczeń wynika, że ciśnienie robocze przewodów GIL o napięciu znamionowym 110 kV powinno mieścić się w przedziale 0,2÷0,35 MPa, a przewodów GIL o napięciu znamionowym 400 kV w przedziale 0,2÷0,3 MPa.

Nie można określić jednocześnie wpływu parametrów geometrycznych przedziału gazoszczelnego na wartość sumarycznej funkcji spełnienia wymagań (ze względu na wszystkie kryteria techniczne). Z przeprowadzonych obliczeń wynika jedynie wpływ parametrów geometrycznych na funkcję spełnienia wymagań rozważanych odrębnie kryteriów: elektrycznego, mechanicznego i cieplnego.

## Literatura

- [1] **Gacek Z.:** *Gazoszczelne urządzenia elektroenergetyczne – ogólna charakterystyka i zagadnienia dyskusyjne*. Konf. Nauk.-Techn.: „Gazoszczelne urządzenia elektroenergetyczne – GUE'99”, Bielsko-Biała 1999, ss. 11-27.
- [2] **Gacek Z., Rusek T.:** *Metoda wyboru optymalnych parametrów konstrukcyjnych przewodów GIL*. VII Symp.: „Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia – EUI'99”, Zakopane 1999, ss. 157-164.
- [3] **Harrington E. C. Jr:** *The Desirability Function*. Journal of American Society for Quality Control, April 1965.
- [4] **Rusek T.:** *Optymalizacja parametrów konstrukcyjnych wysokonapięciowych gazoszczelnych przewodów szynowych*. Praca doktorska, IEiSU, Gliwice czerwiec 1999 (praca niepublikowana).

### METHOD APPLIED TO RATIONAL CHOICE OF SOME PARAMETERS OF A GIL GAS-TIGHT SECTION

Numerical analysis results aimed at determination of rational level of chosen parameters of a GIL gas-tight high voltage unipolar section are presented. A base of consideration has been the methodics applied to choice GIL optimal constructional parameters, worked out at Silesian Technical University. The purpose of analysis was influence of such parameters on desirability level of technical requirements laid down to GILs.