

Gerhard BALIŃDZIEJ

Wiktor KIS

Tomasz RUSEK

Edward SIWY

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA PRZEWODÓW SZYNOWYCH HERMETYZOWANYCH Z IZOLACJĄ GAZOWĄ

Streszczenie. Przedstawiono system obliczeniowy sprawdzający projektowany przewód szynowy SF₆ ze względu na kryteria elektryczne, mechaniczne i ciepne oraz dokonujący wyboru rozwiązania optymalnego ze względu na kryterium kosztów.

COMPUTER-AIDED DESIGN OF SOLID CONDUCTORS WITH GASEOUS INSULATION

Summary. A computational system which may be useful to verify the SF₆-insulated solid conductors is presented. This system enables a designer to verify divers constructions with respect to electrical, mechanical and thermal criteria as well as to make an optimal choices considering a cost criterion.

RECHNERUNTERSTÜTZTE PROJEKTIERUNG DER GASISOLIERTEN STROMSCHIENEN

Zusammenfassung. Es ist ein Berechnungssystem dargestellt, das projektierte, SF₆-isolierte Stromschiene nach elektrischen, thermischen und mechanischen Kriterien prüft. Dann wählt es auch wirtschaftlich optimale Lösung.

1. WPROWADZENIE

Głównym zadaniem projektanta w toku projektowania przewodów szynowych jest wybór rozwiązania optymalnego, ze względu na określone kryterium. Rozwiązanie to musi jednocześnie spełniać szereg uwarunkowań i wymagań, a także uwzględniać wszelkie uzasadnione ograniczenia.

Przewód szynowy musi odpowiadać przede wszystkim podstawowym wymaganiom, które narzucają warunki zewnętrzne oraz kształt konstrukcji, a ponadto wymaganiom materiałowym i warunkom środowiskowym. Wymagania połączone w grupy o jednolitym charakterze tworzą kryteria, które musi spełniać każde rozwiązanie dopuszczalne. Dla przewodów szynowych są to kryteria wytrzymałości: elektrycznej, cieplnej i mechanicznej. Po otrzymaniu zbioru rozwiązań dopuszczalnych konstruktor powinien przystąpić do wyboru rozwiązania optymalnego.

Ze względu na pracochłonność i złożoność obliczeń, których przeprowadzenia wymaga realizacja powyższego zadania, zastosowanie tradycyjnych metod projektowania w odniesieniu do każdego wariantu rozwiązania technicznego jest praktycznie niemożliwe lub co najmniej bardzo utrudnione. Realizację zadania umożliwia zastosowanie komputerowego wspomaganie projektowania.

W Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej opracowany został zbiór podstawowych metod i programów obliczeniowych przewodów szynowych umożliwiających:

- a) projektowanie lub sprawdzanie złożonego układu izolacyjnego przewodu szynowego ze względu na wymagania elektryczne,
- b) wyznaczenie strat mocy dla zbioru możliwych rozwiązań szyn prądowych i osłon,
- c) sprawdzenie nagrzewania się jednorodnego przewodu szynowego w różnych warunkach otoczenia, zarówno w stanie ustalonym, jak i podczas zwarcia,
- d) obliczanie skutków mechanicznych związanych z oddziaływaniami elektrodynamicznymi prądów zwarciorowych,
- e) obliczanie kosztów poszczególnych rozwiązań, wybór rozwiązania optymalnego.

Opracowany zbiór metod i programów obejmuje praktycznie wszystkie obliczenia podstawowe wykonywane przy projektowaniu przewodów szynowych, tworząc system obliczeniowy stanowiący integralną całość.

Opracowany system umożliwia obliczanie przewodów szynowych izolowanych sprężonym SF_6 , o napięciach znamionowych w przedziale 110...400 kV i prądach znamionowych do 6300 A. Przyjęto, że szyna prądowa jest rurą wykonaną z aluminium, stopu aluminium lub miedzi, o grubości ścianki 5...15 mm, natomiast osłona (ekran) jest rurą wykonaną z aluminium, stopu aluminium lub innego materiału o grubości ścianki 2...10 mm. Rozważa się przewody szynowe pracujące w następujących układach:

- a) przewody trójbiegunowe we wspólnej osłonie, trzy fazy rozmieszczone w układzie trójkąta równobocznego,
- b) przewody jednobiegunowe z indywidualną osłoną dla każdej fazy ułożone w jednej płaszczyźnie,
- c) przewody jednobiegunowe jak w p.b) ułożone w układzie trójkąta równobocznego.

Przy założeniu ciągłości ekranów fazowych dla układów b) i c) rozpatruje się alternatywnie rozwiązania z ekranami połączonymi lub nie połączonymi na obu końcach przewodu. Jako kryterium optymalizacyjne przyjęto minimum kosztów wytworzenia i spodziewanych kosztów rocznych dla każdego z rozwiązań dopuszczalnych zgodnie z ogólnymi zasadami rachunku ekonomicznego.

2. ALGORYTMY OBLICZENIOWE

Obliczenia wytrzymałości elektrycznej izolacji hermetyzowanych przewodów szynowych wykonuje się dla zadanych wartości wejściowych: średnicy zewnętrznej szyny prądowej, średnicy wewnętrznej osłony i ciśnienia roboczego SF_6 . Sekwencję obliczeń rozpoczyna się pod warunkiem spełnienia wymagania, że każdy gazowy odstęp izolacyjny w przewodzie szynowym musi wytrzymywać wszystkie napięcia probiercze. Na tej podstawie można wyznaczyć najmniejszą dopuszczalną średnicę wewnętrzną osłony [1] wykorzystując zależność:

$$(D_{\min ij})_{\max} = d_z \exp\left(\frac{2U_{pr i}}{d_z (A_{ij} p + B_{ij}) (1 - 3\delta)}\right) D_{obl i}$$

gdzie:

- d_z - średnica zewnętrzna szyny prądowej przewodu szynowego,
- $U_{pr i}$ - wartość szczytowa wybranego napięcia probierczego (i-tego rodzaju),
- A_{ij}, B_{ij} - empiryczne współczynniki obliczeniowe,
- δ - współczynnik zmienności statycznego lub udarowego napięcia przeskoku,
- $D_{obl i}$ - obliczeniowa średnica wewnętrzna osłony w I etapie obliczeń.

Po obliczeniu średnicy wewnętrznej osłony sprawdza się, czy odstęp izolacyjny wykazuje dostateczną wytrzymałość elektryczną również w przypadku zmniejszenia się ciśnienia gazu do wartości 0,1 MPa (przy zmiennym napięciu roboczym, w normalnych warunkach pracy sieci). Drugim etapem obliczeń jest sprawdzenie, czy izolacyjny odstęp gazowy nie spowoduje konieczności zastosowania izolatorów wsporczych lub grodziowych o zbyt małych wymiarach poprzecznych ze względu na wartość skuteczną największego dopuszczalnego długotrwałe natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatora dyskowego lub kielichowego.

Obliczenia ciepłe przewodów szynowych obejmują wyznaczenie:

- strat mocy w szynach i obudowach przewodów,
- temperatur przewodów w stanie cieplnie ustalonym przy przepływie prądu długotrwałego 50 Hz,
- temperatur przewodów przy nagrzaniu prądem zwarciowym.

Obliczenia wykonuje się przy założeniu upraszczającym, że przewód jest jednorodny. Wpływ niejednorodności (złącz, izolatorów, odgałęzień itp.) może być oceniany za pomocą innego programu obliczeniowego, opracowanego również w IEiSU Politechniki Śląskiej i opisanego w pracach [1],[3]. Wpływ ten

uwzględnia się poprzez odpowiednią korektę kryterium dopuszczalności rozwiązania (np. obniżenie temperatury dopuszczalnej). Dokładny algorytm obliczeń jest przedstawiony w pracy [2].

Obliczenia mechaniczne dla konstrukcji przewodu szynowego wykonuje się przy uwzględnieniu następujących oddziaływań:

- siły elektrodynamiczne,
- siły ciężkości,
- obciążenie śniegiem,
- parcie wiatru,
- siły dylatacyjne,
- ciśnienie gazu.

Metoda obliczeń wytrzymałości elektrodynamicznej jest zgodna z postanowieniami nowej normy PN/E-05025 "Obliczanie skutków prądów zwarciovych". Metody obliczeń dla pozostałych rodzajów oddziaływań mechanicznych są oparte na zależnościach analitycznych (teoretycznych i empirycznych) podanych w obowiązujących przepisach i normach. Wypadkowe naprężenia mechaniczne w przewodzie szynowym, pochodzące od zróżnicowanych naprężeń składowych działających w różnych kierunkach, wyznacza się zgodnie z hipotezą energetyczną sumowania naprężeń. Dokładny algorytm obliczeń przedstawiony jest w pracy [2].

Do obliczeń optymalizacyjnych przyjmuje się uproszczony model, którym jest wybrana sekcja przewodu szynowego, składająca się z:

- izolatora (grodziowego lub wsporcze),
- jednego kołnierza z uszczelnieniami,
- odcinka przewodu szynowego o dł. 1 m, wypełnionego sprężonym SF₆.

W zależności od długości sekcji rzeczywistej przyjmuje się koszty izolatora i kołnierza z uszczelnieniami przypadające na jednostkę długości (1 m) przewodu szynowego. W obliczeniach pominięto większość kosztów stałych, uznanych za niezależne od przekroju przewodu szynowego, np. koszty obsługi, montażu itp. Jest to świadome założenie upraszczające, ponieważ zadaniem

systemu obliczeniowego nie jest dokładne obliczenie kosztów, lecz znalezienie wariantu optymalnego - niezależnego od kosztów stałych. Optymalizację przeprowadza się opierając się na minimalizacji całkowitego kalkulowanego kosztu rocznego:

$$K_{rn} = K_1 r + K_{en}$$

gdzie:

K_1 - nakład inwestycyjny sprowadzony na rok zerowy (cena),

r - rata rozszerzonej reprodukcji,

K_{en} - koszty eksploatacji.

W nakładzie inwestycyjnym uwzględnia się następujące składniki kosztów jednostkowych:

- koszt 1 m przewodu,
- koszt 1 m ekranu,
- koszt izolatora na 1 m przewodu szynowego,
- koszt kołnierza z uszczelnieniami na 1 m przewodu szynowego,
- koszt gazu zużytego do wypełnienia 1 m przewodu szynowego.

W kosztach eksploatacji uwzględnia się tylko roczne straty mocy i energii, wyrażone za pomocą poniższej zależności:

$$K_{en} = (\Delta P_{przew} + \Delta P_{ekr}) (p + \tau a)$$

gdzie:

ΔP_{przew} - straty mocy w przewodzie,

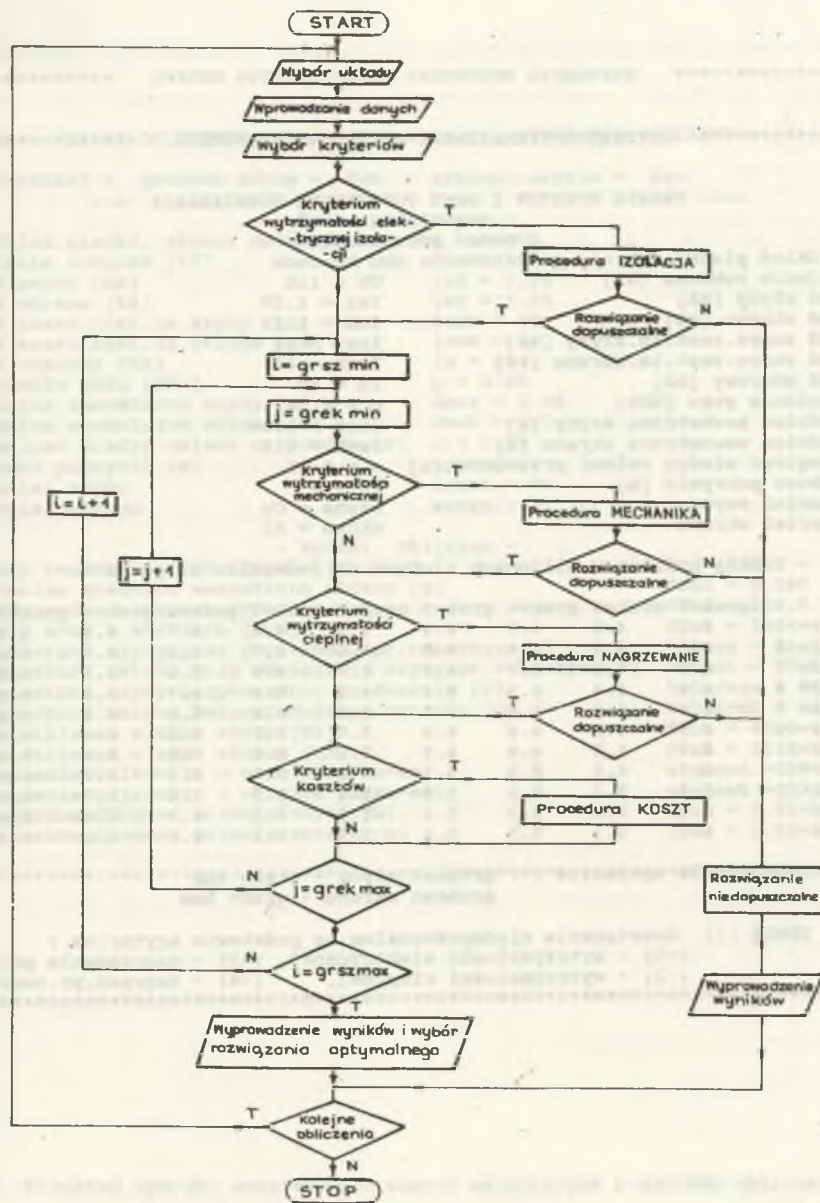
ΔP_{ekr} - straty mocy w ekranie,

p - koszt 1 kW mocy,

a - koszt 1 kWh energii,

τ - roczny czas występowania strat maksymalnych.

Schemat blokowy algorytmu systemu do optymalizacji przewodów szynowych przedstawiono na rys.1. Przykład wydruku przedstawiono na rys.2.



Rys.1. Schemat blokowy algorytmu systemu obliczeniowego do optymalizacji przewodów szynowych

Fig.1. A flow chart of the computational system algorithm for optimization of solid conductors

***** SYSTEM OPTIMALIZACJI PRZEWODOW SZYNOWYCH *****

--- TABELA KOSZTOW I DANE PODSTAWOWE ROZWIAZANIA ---

- Dane podstawowe -

** Układ płaski, ekrany połączone na obu końcach
 Napięcie robocze [kV] Un = 110
 Prąd szyny [kA] Isz = 1.25
 Prąd ekranu [kA] Iek = 1.25
 Prąd zwarc.zast.ls.szyny [kA] Icsz = 40
 Prąd zwarc.zast.ls.ekranu [kA] Icek = 40
 Prąd udarowy [kA] Iu = 50
 Ciśnienie gazu [MPa] p = 0.25
 Średnica zewnętrzna szyny [m] dzsz = 0.06
 Średnica wewnętrzna ekranu [m] dwek = 0.3
 Odległość między osiami przewodów [m] s = 0.75
 Grubość pokrycia [m] tp = 0
 Materiał szyny szyna = Cu
 Materiał ekranu ekran = Al

- Tabela kosztów w milionach złotych na jednostkę długości -

	grek=2	grek=3	grek=4	grek=5	grek=6	grek=7	grek=8	grek=9	grek=10
grsz= 5	4.2	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	5.3
grsz= 6	4.1	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0
grsz= 7	4.2	4.2	4.3	4.4	4.7	4.8	5.0	5.1	5.2
grsz= 8	4.4	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.3
grsz= 9	4.4	4.6	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.1	5.2
grsz=10	4.5	4.6	4.6	4.9	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4
grsz=11	4.7	4.7	4.8	4.9	5.0	5.3	5.4	5.5	5.6
grsz=12	4.9	4.9	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.7	5.8
grsz=13	4.9	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	6.0
grsz=14	5.1	5.3	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9
grsz=15	5.3	5.3	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0	6.1

*** Rozwiązanie optymalne : grubość szyny - grsz= 6mm
 grubość ekranu - grek= 2mm

*** UWAGA !!! Rozwiązanie niedopuszczalne na podstawie kryterium :
 (-1) - wytrzymałości elektrycznej, (-3) - nagrzewania pr.rob.
 (-2) - wytrzymałości cieplnej, (-4) - nagrzew.pr.zwarc.

***** SYSTEM OPTIMALIZACJI PRZEWODOW SZYNOWYCH *****

--- WYNIKI OBLICZEN I DANE PODSTAWOWE DLA WYBRANEGO WARIANTU ---

*** WARIANT : grubosc szyny = 5mm grubosc ekranu = 8mm

- Dane podstawowe -

** Układ płaski, ekrany połączone na obu końcach
 Napiecie robocze [kV] Un = 110
 Prad szyny [kA] Isz = 1.25
 Prad ekranu [kA] Iek = 1.25
 Prad zwarc.zast.ls.szyny [kA] Icsz = 40
 Prad zwarc.zast.ls.ekranu [kA] Icek = 40
 Prad udarowy [kA] Iu = 50
 Cisnienie gazu [MPa] p = 0.25
 Srednica zewnetrzna szyny [m] dzsz = 0.06
 Srednica wewnetrzna ekranu [m] dwek = 0.3
 Odleglosc miedzy osiami przewodow [m] s = 0.75
 Grubosc pokrycia [m] tp = 0
 Material szyny szyna = Cu
 Material ekranu ekran = Al

- Wyniki obliczen -

Koszty roczne wariantu [tys.zl/m]	K = 4683
Minimalna srednica wewnetrzna ekranu [m]	dob1 = 0.169
Straty mocy w szynach [W/m]	dPsz = 116.6
Straty mocy w ekranach [W/m]	dPek = 19.4
Temperatura szyny przy obciazeniu pr.roboczym [C]	tetasz = 64.5
Temperatura ekranu przy obciazeniu szyny pr.roboczym [C]	tetaek = 45.8
Temperatura szyny bezposrednio po zwarciu [C]	tetazsz = 79.4
Temperatura ekranu bezposrednio po zwarciu [C]	tetazek = 46.2
Czestotliwosc wlasna szyny [Hz]	fwsz = 40.0
Czestotliwosc wlasna ekranu [Hz]	fwek = 31.3
Naprezenie calkowite w szynie [N/mm*mm]	sigmasz = 43.8
Naprezenie calkowite w ekranie [N/mm*mm]	sigmaek = 53.5
Maksymalna dlugosc przesla szyny [m]	lpsz = 2.5
Maksymalna dlugosc przesla ekranu [m]	lpek = 2.5

Rys.2. Przykład wydruku podstawowych danych wejściowych i wyników obliczeń

Fig.2. An exemplary printout of the basic input data and computational

result

3. PODSUMOWANIE

Opracowany system obliczeniowy może stanowić narzędzie do wyznaczenia typowych rozwiązań wysokonapięciowych przewodów szynowych izolowanych sprężonym SF₆. Rozwiązania obejmują wszystkie stosowane poziomy napięć roboczych i znormalizowane lub zalecane wymagania konstrukcyjne. Efektem tych działań powinien być katalog gotowych elementów, służących do montażu przewodów szynowych.

LITERATURA

- [1] Bartodziej G., Kiś W.: Sprawozdanie z realizacji zadania badawczego CPBP Nr 02.18. Zadanie 1.4.3.4.: Realizacja modelu fizycznego przewodów szynowych. Pol. Śl., Gliwice 1989 (praca niepublikowana).
- [2] Bartodziej G., Kiś W., Szadkowski M., Siwy E.: Sprawozdanie z realizacji zadania badawczego CPBP Nr 02.18. Zadanie 1.4.3.4.: Realizacja modelu fizycznego przewodów szynowych. Pol. Śl., Gliwice 1990 (praca niepublikowana).
- [3] Kiś W.: Sprawozdanie z realizacji zadania badawczego CPBP Nr 02.18. Zadanie 1.4.3.4., część II/90. Pol. Śl., Gliwice (praca niepublikowana).
- [4] Gacek Z.: Sprawozdanie z realizacji zadania badawczego CPBP 02.18. Zadanie 1.4.3.2.: Analiza kryteriów wymiarowania i kształtowania układów izolacyjnych w przewodach szynowych 123-400 kV. Pol. Śl., Gliwice 1990 (praca niepublikowana).

Recenzent: prof. dr hab. inż. Romuald Wiodek

Wpłynęło do redakcji dnia 2 marca 1992 r.

COMPUTER-AIDED DESIGN OF SOLID CONDUCTORS WITH GASEOUS INSULATION

A b s t r a c t

The article presents a computational system worked up in Institute of Electrical Power Engineering and Control Systems of Silesian Technical University, which is useful to computer-aided design of solid conductors with gaseous insulation. The proposed computational system may fulfil the following functions:

- designing or verification of complex insulation system of a solid conductor in respect of electrical requirements,
- calculation of power losses for a set of possible constructions of current-carrying conductors and screens,
- calculation of heating of a homogeneous solid conductor for its diverse geometrical arrangements and diverse environmental conditions (during the working and the short-circuit conditions),
- calculation of mechanical stresses within a solid conductor,
- choice of an optimal constructional solution in respect of costs of individual constructions.

A short characteristic of mathematical algorithms which are to realize the above functions has been presented. An exemplary print out of obtained computational results is annexed.