

Wiktor KIS

Tomasz RUSEK

## SPRAWDZANIE OBCIĄŻALNOŚCI PRĄDOWEJ DŁUGOTRWALEJ PRZEWODÓW SZYNOWYCH Z IZOLACJĄ GAZOWĄ SF<sub>6</sub> METODĄ NUMERYCZNĄ

**Streszczenie.** Przedstawiono algorytm opracowanego programu obliczeniowego. Omówiono zakres zastosowania i opcje programu. Załączono przykładowy wydruk ilustrujący pełny zestaw danych wejściowych oraz postać wyników.

### VERIFICATION OF LONG-LASTING CURRENT-CARRYING CAPACITY SF<sub>6</sub>-INSULATED BUSES BY MEANS OF A NUMERICAL METHOD

**Summary** The algorithm of described calculation program is presented. The scope of application and the options of this computer program are discussed. An exemplary computer printing, which illustrates a complete set of input data and a form of results, is annexed.

### NACHPRÜFUNG MIT DER HILFE DER NUMERISCHEN METHODE VON DER DAUERSTROM-BELESTBARKEIT DER SF<sub>6</sub>-ISOLIERTEN

**Zusammenfassung.** Es ist der Algorithmus des Berechnungsprogramms dargestellt. Beschrieben sind die Anwendungsbereiche und Möglichkeiten des Programms. Es ist auch ein Beispiel gegeben das die Zusammenstellung von den Eingangsdaten und Ergebnisse illustriert.

#### 1. WPROWADZENIE

Przewody szynowe z izolacją gazową SF<sub>6</sub> nie były dotychczas w kraju produkowane ani stosowane. Prowadzono jednak prace technologiczne i konstrukcyjne [1], które obecnie umożliwiają zaprojektowanie i wykonanie prototypowego odcinka przewodów szynowych 110 kV, a w perspektywie wdrożenie do produkcji przemysłowej. Przy projektowaniu lub doborze przewodów szynowych

dla konkretnych warunków eksploatacyjnych uwzględnia się różne kryteria, w tym - obciążalności prądowej długotrwałej oraz wytrzymałości na oddziaływanie cieplne prądów zwarciovych (obciążalność zwarciova cieplna). Wielkości te zależą ściśle od parametrów materiałowych, geometrycznych i temperaturowych oraz od układu konstrukcyjnego przewodu szynowego. W praktyce projektowej zachodzi więc często potrzeba ich wyznaczania lub sprawdzania.

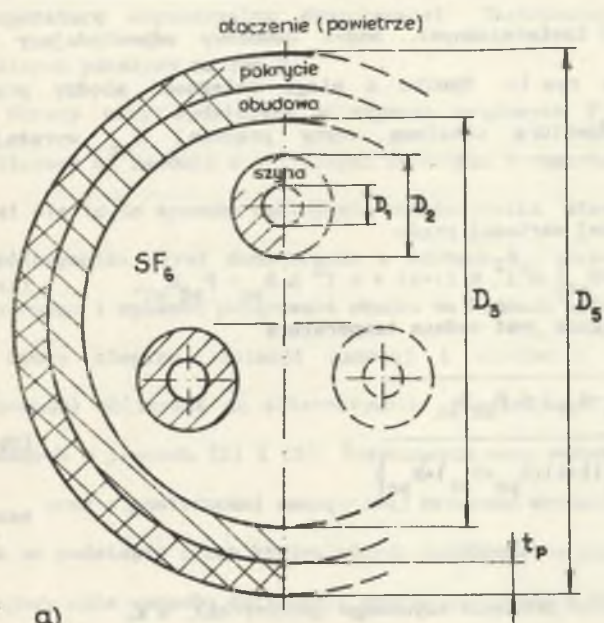
## 2. TEORETYCZNE PODSTAWY OBLICZEŃ

Przewody szynowe z izolacją w postaci gazu sprężonego muszą posiadać hermetyczne obudowy. Zależnie od konstrukcji obudowa może być wspólna dla wszystkich szyn fazowych przewodu (rys.1a) lub oddzielna dla każdej fazy (rys.1b). W tym drugim przypadku układ przewodów fazowych może być płaski lub trójkątny, a ich metalowe obudowy mogą być lub nie być połączone i uziemione na końcach sekcji.

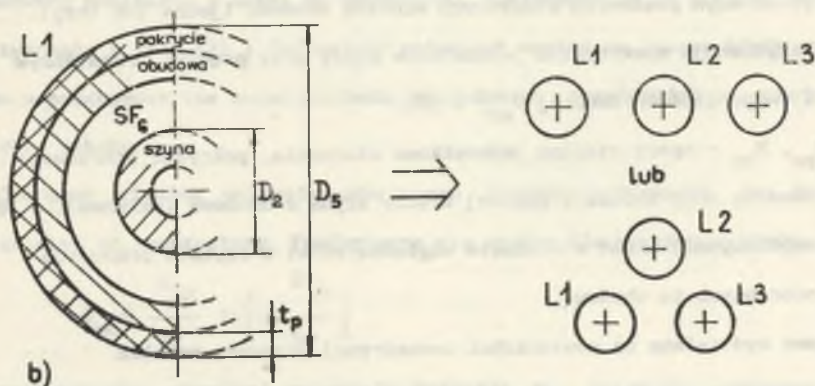
Podstawą do obliczeń obciążalności długotrwałej może być bilans cieplny dla stanu ustalonego lub odpowiadający mu model elektryczny obwodowy zjawisk cieplnych. Ze względów praktycznych przyjmuje się w obliczeniach, że przewód jest osiowo jednorodny oraz że powierzchnie przekroju poprzecznego szyn i

Rys.1. Szkic do obliczeń obciążalności długotrwałej przewodów szynowych z izolacją gazową: a) układ z obudową wspólną dla trzech szyn fazowych, b) szyny fazowe w obudowach oddzielnych, w układzie płaskim lub trójkątnym, c) model elektryczny obwodowy dla układów a i b

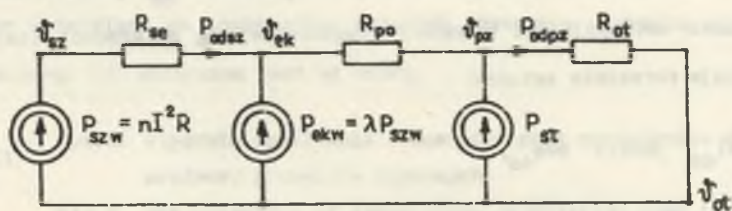
Fig.1. The sketch for long-lasting current-carrying capacity calculation of buses with the gaseous insulation: a) arrangement with a common screen for three current conductors, b) flat or triangular arrangement for phase conductors inside separate screens, c) electrical circuit model for a and b arrangement



a)



b)



c)

Rys. 1

obudów są powierzchniami izotermicznymi. Model obwodowy odpowiadający tym założeniom pokazano na rys.1c. Wynika z niego zależność między prądem długotrwałym  $I$  a temperaturą ustaloną szyny prądowej  $\theta_{sz}$  wyrażająca alternatywnie:

- temperaturę przy zadanej wartości prądu

$$\theta_{sz} = \theta_{ot} + \left( R_{po} + R_{ot} \right) n I^2 R (1+\lambda) + n I^2 R R_{se} + P_{sf} R_{ot} \quad (1a)$$

- prąd, przy którym osiągana jest zadana temperatura

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_{sz} - \theta_{ot}) - P_{sf} R_{ot}}{n R \left\{ (1+\lambda)(R_{po} + R_{ot}) + R_{se} \right\}}} \quad (1b)$$

gdzie:

$\theta_{ot}$  - temperatura otoczenia przewodu szynowego (powietrza), w K,

$n$  - ilość szyn prądowych otoczonych wspólną obudową (jedna lub trzy),

$R$  - rezystancja elektryczna jednostkowa szyny przy prądzie przemiennym i temperaturze roboczej  $\theta_{sz}$ , w  $\Omega/m$ ,

$R_{ot}$ ,  $R_{po}$ ,  $R_{se}$  - opory cieplne jednostkowe otoczenia, pokrycia ochronnego obudowy oraz izolacji gazowej między szyną a obudową (ekranem), w  $mK/W$ ,

$\lambda$  - współczynnik strat w obudowie względem strat w szynach prądowych otoczonych tą obudową,

$P_{sf}$  - moc wydzielana na powierzchni zewnętrznej przewodu wskutek promieniowania słonecznego, w  $W/m^2$ .

Zgodnie z definicją prądu dopuszczalnego długotrwałe  $I_{dd}$ , przy obliczaniu lub sprawdzaniu obciążalności prądowej długotrwałej wg zależności (1a) lub (1b) obowiązuje formalnie związek:

$$I = I_{dd} \quad \text{jeżeli} \quad \theta = \theta_{dd} \quad (2)$$

ale obliczenia muszą być wykonywane iteracyjnie, z uwagą na zależność oporów cieplnych od rozkładu temperatury w kierunku promieniowym ( $\theta_{dd}$  oznacza

temperaturę dopuszczalną długotrwałą). Zastosowany w tym celu algorytm obliczeń pokazano na rys.2.

Straty mocy wydzielane w szynach prądowych  $P_{szw}$  i w obudowach  $P_{ekw}$  obliczane są zgodnie z wytycznymi zawartymi w raportach CIGRE [2] i [4]. Odnosi się to do sposobu obliczania współczynnika strat w obudowach  $\lambda$  oraz współczynnika strat dodatkowych w szynach  $k_d$ , zależnie od układu przewodu szynowego i sposobu połączenia obudów na końcach sekcji przewodu.

Opory cieplne izolacji gazowej i otoczenia (powietrza na zewnątrz przewodu) obliczane są alternatywnie: z zależności teoretyczno-empirycznych podanych w pracach [2] i [5], dotyczących mocy oddawanych z szyny do obudowy  $P_{odsz}$  oraz z powierzchni zewnętrznej przewodu szynowego do otoczenia  $P_{odpz}$ , lub na podstawie liczb kryterialnych podobieństwa zjawisk cieplnych. Dokładniejszy opis sposobu obliczania oporów cieplnych i strat mocy w szynach i obudowach pominięto z uwagi na obszerność, zamieszczając go w pracy [6]. Przy korzystaniu z prac [2] i [4] należy natomiast uważać na liczne błędy występujące w podawanych tam zależnościach, spowodowane prawdopodobnie niedokładną korektą tekstu.

Oporność cieplną pokrycia ochronnego liczono przyjmując, że jest ona niezależna od temperatury. Posługiwano się wzorem dla warstwy cylindrycznej:

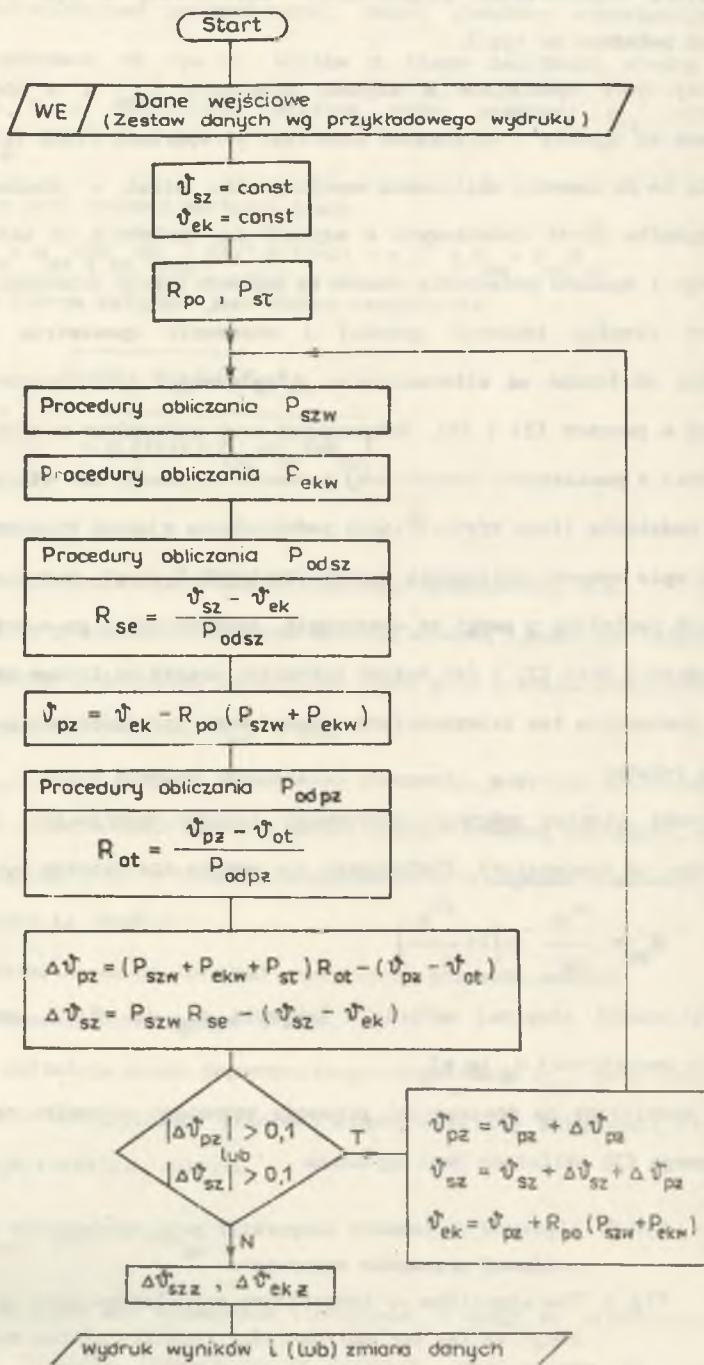
$$R_{po} = \frac{\rho_{tp}}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{2t_p}{D_4} \right) \quad (3)$$

o rezystywności cieplnej materiału pokrycia  $\rho_{tp}$  (w mK/W), grubości  $t_p$  i średnicy wewnętrznej  $D_4$  (w m).

Moc wydzielana na powierzchni przewodu szynowego w wyniku promieniowania słonecznego [3] obliczana jest wg wzoru:

Rys.2. Algorytm obliczania temperatur przy sprawdzeniu obciążalności prądowej przewodów szynowych.

Fig.2. The algorithm of temperature calculation used to verify the long-lasting current-carrying capacity of bus conductors.



Rys. 2.

$$P_{SI} = H k_r D_S \sin \beta_r \quad (4)$$

Wstawiając do wzoru (4) wartości: intensywności promieniowania słonecznego  $H = 1000 \text{ W/m}^2$  oraz współczynnika pochłaniania energii słonecznej  $k_r$  równe w przybliżeniu współczynnikowi czerni powierzchni zewnętrznej przewodu szynowego  $\epsilon_4$  otrzymuje się oszacowanie  $P_{SI}$ , bezpieczne (z nadmiarem) dla warunków krajowych. Kąt  $\beta_r$  zawarty jest między kierunkiem ułożenia przewodu a kierunkiem padania promieni słonecznych.

Nagrzewanie przewodu szynowego prądem zwarciovym uwzględniono przy założeniu, że odbywa się ono adiabaticznie, przy czym rezystywność materiału zależy od temperatury. Prowadzi to do wyrażenia zwarciovego przyrostu

temperatury szyny [6] w postaci <sup>\*)</sup>:

$$\Delta \vartheta_{SZZ} = \left( \frac{1}{\alpha_S} + \vartheta_{SZ} \right) \left( \exp \frac{k_{ds} \alpha_S \rho_S I_{st1}^2}{c_S S_S^2 g_S} - 1 \right) \quad (5)$$

gdzie:

$\alpha_S$  - współczynnik temperaturowy rezystywności materiału szyny,

$\rho_S$  - rezystywność materiału szyny w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ , w  $\Omega\text{m}$ ,

$S_S$  - pole powierzchni przekroju szyny, w  $\text{m}^2$ ,

$c_S$  - ciepło właściwe materiału szyny, w  $\text{Ws/kgK}$ ,

$g_S$  - gęstość materiału szyny, w  $\text{kg/m}^3$ ,

$I_{st1}$  - prąd zastępczy jednosekundowy dla prądu zwarciovego w szynie, w A.

Obliczenia temperatur w stanie cieplnie ustalonym oraz dla warunków zwarciovych mają dodatkowe zastosowanie przy doborze kompensatorów napiężeń związanych z dylatacyjnymi odkształceniami przewodu szynowego.

<sup>\*)</sup> Postać wzoru dla obudowy jest analogiczna.

### 3. CHARAKTERYSTYKA PROGRAMU OBLICZEŃ

Program oznaczono nazwą NPS\_JH1. Napisany jest w języku Turbo Pascal 5.0 na IBM PC. Czas wykonywania obliczeń promieniowego rozkładu temperatury przy zadanej wartości prądu wynosi kilka sekund. Zestawienie potrzebnych wielkości wejściowych oraz rodzaj wyprowadzanych wyników obliczeń pokazano na przykładowym wydruku komputerowym.

Menu programu obejmuje następujące warianty materiałowe dla szyny i obudowy: Al lub Cu (dane materiałowe wczytywane automatycznie), inne materiały przewodowe (wprowadzane z klawiatury) oraz następujące warianty układu konstrukcyjnego przewodów szynowych:

- trójkątny we wspólnej obudowie,
- płaski; obudowy oddzielne połączone na obu końcach,
- płaski; obudowy oddzielne nie połączone na obu końcach,
- trójkątny; obudowy oddzielne połączone na obu końcach,
- trójkątny; obudowy oddzielne nie połączone na obu końcach.

Każda opcja materiałowo-konstrukcyjna przewodu może być obliczana przy zastosowaniu wybranego sposobu wyznaczania oporów cieplnych  $R_{ek}$  i  $R_{ot}$  (wg raportów CIGRE lub z zastosowaniem liczb kryterialnych podobieństwa zjawisk cieplnych).

Jeśli po zakończeniu obliczeń zostanie wydana dyspozycja wydruku, to może ona dotyczyć tylko wyników obliczeń lub - łącznie - danych wejściowych i wyników obliczeń. Zestaw danych wprowadzonych do komputera podczas ostatnio wykonywanych obliczeń jest zapamiętywany, co znacznie usprawnia generację nowych, częściowo zmienianych danych wejściowych.

### 4. PRZYKŁAD WYNIKÓW OBLICZEŃ

Weryfikacja empiryczna metody i algorytmu obliczeń cieplnych przewodów szynowych hermetyzowanych możliwa jest obecnie w ograniczonym zakresie.



Wyniki badań empirycznych są rzadko publikowane z kompletnym i jednoznacznym opisem obiektu badań i warunków ich wykonania. Wyniki obliczeń przykładowych uzyskano dla danych przewodu szynowego wg pracy [2], z wyjątkiem nie określonych tam współczynników czerni. Wyniki te są zgodne z opisanymi w raporcie [2].

\*\*\*\*\* NAGRZEWANIE PRZEWODÓW SZYNOWYCH JEDNORODNYCH \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* W STANIE USTALONYM I PRZY ZWARCIACH \*\*\*\*\*

--- DANE WEJŚCIOWE ---

\*\* Układ płaski, ekrany połączone na obu końcach  
 \*\* Obliczenia według zależności podanych w Electrze

Częstotliwość [Hz]	f = 60
Material szyny	szyna = Al
Kondukcyjność szyny [MS/m]	gamasz = 35.21
Temp.wsp.zmiany rezystancji szyny	alfasz = 0.004
Material obudowy	ekran = Al
Kondukcyjność obudowy [MS/m]	gamaek = 35.21
Temp.wsp.zmiany rezystancji obudowy	alfaek = 0.004
Grubość pokrycia obudowy [m]	tp = 0
Rezyst.ciepna pokrycia [K*m/W]	ropo = 0
Srednica zewnętrzna obudowy [m]	dzek = 0.762
Srednica wewnętrzna obudowy [m]	dwek = 0.7462
Srednica zewnętrzna szyny [m]	dzsz = 0.279
Srednica wewnętrzna szyny [m]	dwsz = 0.2536
Prąd szyny [kA]	I <sub>sz</sub> = 10.059
Temperatura otoczenia [C]	tetaot = 30
Cisnienie SF6 [MPa]	p = 0.44
Częstotliwość [Hz]	f = 60
Kąt padania promieni słonecznych	fi = 0
Wsp.pochłaniania prom.słonecznego	kr = 0
Emisyjność pow.zewn.przew.szynowego	epszek = 0.62
Emisyjność pow.wewn.obudowy	epswek = 0.3
Emisyjność szyny	epspsz = 0.3
Prąd zast.ciepny 1s.w szynie [kA]	I <sub>csz</sub> = 40
Prąd zast.ciepny 1s.w obudowie [kA]	I <sub>cek</sub> = 40
Gęstość szyny [kg/m szesc.]	gsz = 2700
Gęstość obudowy [kg/m szesc.]	gek = 2700
Ciepło właściwe szyny [J/kg*K]	cpsz = 900
Ciepło właściwe obudowy [J/kg*K]	cpek = 900
Temp.wsp.rozszerz.liniiowej szyny	betalsz = 0.0000237
Temp.wsp.rozszerz.liniiowej obudowy	betalek = 0.0000237
Odległość między osiami przewodów [m]	s = 1.587
Temperatura montażu przew.szyn. [C]	tetam = 20

## --- WYNIKI OBLICZEN ---

## \*\* DLA WARUNKOW ROBOCZYCH

Współczynnik strat dodatkowych dla szyny	kds = 1.090
Współczynnik strat dla obudowy	lambda_d = 0.481
Moc wydzielona w szynie [W/m]	Pwsz = 377.3
Moc wydzielona w obudowie [W/m]	Pwek = 181.6
Moc oddawana przez szyny [W/m]	Podsz = 377.2
Moc oddawana przez obudowe [W/m]	Podok = 559.0
Temperatura szyny [C]	tetasz = 90.0
Temperatura obudowy [C]	tetaek = 58.3
Temperatura pow.zewn.przewodu szynowego [C]	tetapz = 58.3

## \*\* DLA ZWARCIA

Temperatura szyny po zwarciu [C]	tetaszsw = 90.3
Temperatura obudowy po zwarciu [C]	tetaeksw = 58.4
Wydłużenie względne szyny	dlsz = 0.00167
Wydłużenie względne obudowy	dlek = 0.00091

\*\*\*\*\*

## 5. PODSUMOWANIE

Zaproponowana metoda i program obliczeniowy mogą być wykorzystane przy projektowaniu przewodów szynowych z izolacją gazową SF<sub>6</sub>. Program umożliwia obliczanie temperatur nagrzewania szyn, obudów i powierzchni zewnętrznej przewodów szynowych z izolacją gazową SF<sub>6</sub> w stanie ustalonym i przy zwarciach oraz wyznaczanie ich obciążalności prądowej. Program obejmuje praktycznie wszystkie stosowane warianty konstrukcyjne układu szyn i obudów, z uwzględnieniem sposobu połączenia końców obudów.

Wskazana jest szersza weryfikacja programu. Utrudnia ją niedostatek wystarczająco dokładnie opisanych badań empirycznych. Przewiduje się rozbudowę programu w celu rozszerzenia zakresu jego zastosowania na gazoszczelne przewody szynowe z inną izolacją gazową.

## LITERATURA

- [1] Prace wykonane w ramach CPBP Nr 02.18 prowadzone w kilku ośrodkach krajowych, w tym zadanie Nr 1.4.3.4: Realizacja modelu fizycznego przewodów

- szynowych. Pol. Śl., Gliwice 1990 (praca niepublikowana).
- [2] CIGRE Report: Calculation of the continuous rating of singlecore, rigid type, compressed gas insulated cables in still air with no solar radiation. Electra No. 100, 1985.
- [3] CIGRE Report: Calculation of the continuous rating of singlecore, rigid type, compressed gas insulated cables in still air with solar radiation. Electra No. 106, 1986.
- [4] CIGRE Report: Calculation of the continuous rating of threecore, rigid type, compressed gas insulated cables in still air and buried. Electra No. 125, 1989.
- [5] Itaka K., Araki T., Hara T.: Heat transfer characteristics of gas spacer cables. IEEE Trans. on Power App. and Syst. Vol.PAS-97, No. 5, 1978.
- [6] Baron B., Gacek Z., Kiś W.: Obliczenie rozkładu pola elektrycznego, wymiarowanie układów izolacyjnych i wyznaczanie temperatur w przewodach szynowych izolowanych sprężonym  $SF_6$ . ZN Pol. Śl. serii Elektryka, z.126, Gliwice 1992 (monografia oddana do druku).

Recenzent: prof. dr hab. inż. Romuald Wiodek

Wpłynęło do redakcji dnia 2 marca 1992 r.

#### VERIFICATION OF LONG-LASTING CURRENT-CARRYING CAPACITY OF $SF_6$ -INSULATED BUSES BY MEANS OF NUMERICAL METHODS

#### A b s t r a c t

The proposed algorithm and computer calculation program has been worked up with regard to dependences on temperature for electrical resistance of current conductor and screen materials as well as for heat resistance of gaseous insulation and surrounding air. The computational model, in a form of substitute electrical circuit, is conformed to buses which can be characterized by axial homogeneity and heat transfer only along a radial

direction. The following factors are taken into account: insulation of outside conductor surface, dependence of power loss emitting in current conductors and screens on configuration and on a way of complying of screens at the ends of each section.

An exemplary printout of calculation results, obtained for input data which are confirmed to an object of another laboratory findings, is presented.

These results are sufficiently consistent with the above findings.