

Wiktor KIŚ

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

OBLICZANIE NAGRZEWANIA PRZEWODÓW SZYNOWYCH EKRANOWANYCH Z IZOLACJĄ GAZOWĄ SF₆ W STANIE CIEPLNIE USTALONYM

Streszczenie. Artykuł dotyczy przewodów szynowych ekranowanych jednobiegunowo (każda szyna fazy otoczona jest własnym ekranem). Obliczenia obejmują wyznaczanie temperatury ekranu oraz rozkładu temperatury wzdłuż szyny przy założeniu, że rozkład promieniowy temperatury ma symetrię obrotową. Uwzględniono zależność źródeł ciepła oraz oporów cieplnych od temperatury.

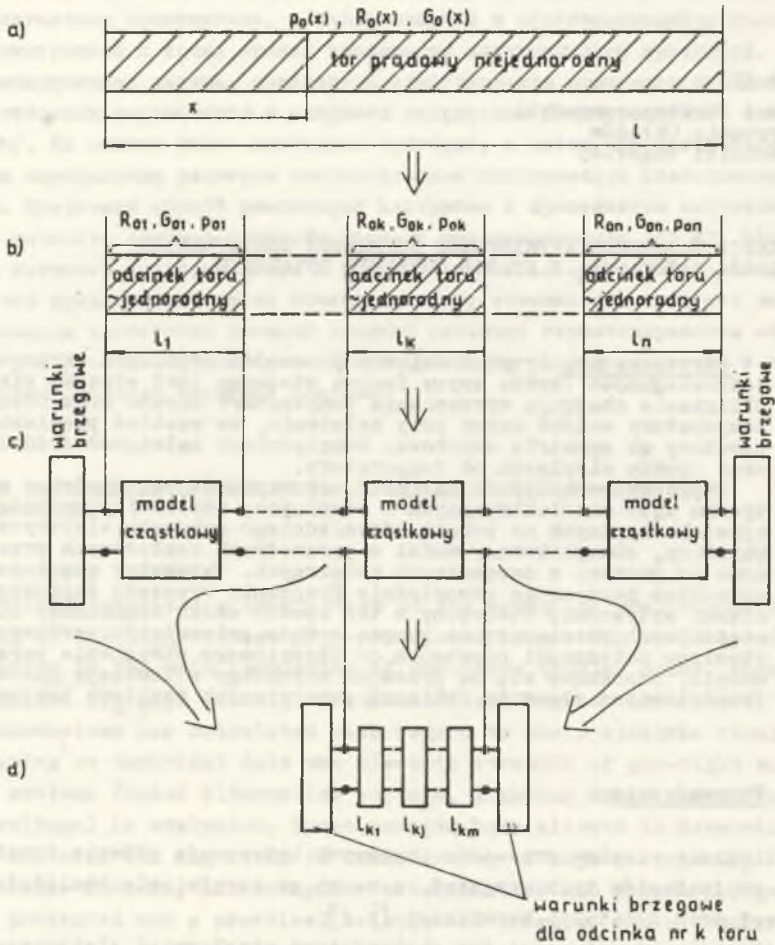
Zaproponowana metoda obliczeń wykorzystuje podobieństwo matematyczne zjawisk elektrycznych i cieplnych, umożliwiające modelowanie zjawisk cieplnych za pomocą odpowiedniego schematu elektrycznego. Uzyskany, skomplikowany model o parametrach rozłożonych przekształcono do postaci o parametrach skupionych. Parametry skupione modelu określono zastępując odpowiednie fragmenty przewodu szynowego czwórnikami aktywnymi. Utworzony w ten sposób układ łańcuchowy modeli cząstkowych rozwiązano za pomocą metody potencjałów węzłowych. Zestawiono zależności niezbędne do ilościowego określenia parametrów modelu, odnoszące się do przewodu szynowego z izolacją gazową SF₆. Przedstawiono algorytm obliczeń numerycznych rozkładu temperatury.

1. Wprowadzenie

Obliczenia cieplne przewodów szynowych interesują głównie konstruktorów i projektantów tych urządzeń, z uwagi na zagadnienia obciążalności prądowej oraz dylatacji termicznej [1,2].

Analogie występujące między wielkościami cieplnymi i elektrycznymi [3] umożliwiają modelowanie zjawisk cieplnych za pomocą odpowiednio zbudowanego obwodu elektrycznego, zwanego modelem obwodowym. W odniesieniu do przewodu szynowego ekranowanego model ma umożliwić obliczanie osiowego rozkładu temperatury ($\vartheta(x)$), wynikającego ze strat mocy wydzielonych w postaci ciepła (p), oporów przepływu ciepła (osiowych R i promieniowych $1/G$) oraz niejednorodności tych parametrów. Zasadnicza niejednorodność cieplna przewodu szynowego ekranowanego występuje w kierunku osiowym. Naturalne więc jest przyjęcie następujących etapów tworzenia modelu obwodowego:

- podzielił przewodu szynowego (niejednorodnego) na odcinki w przybliżeniu jednorodne (rys. 1a,b),



Rys. 1. Koncepcja budowy przybliżonego modelu obwodowego termokinetyki przewodu prądowego niejednorodnego w stanie cieplnie ustalonym
a, b, c, d - kolejne etapy budowy modelu

Fig. 1. The idea of construction of a simplified electrical diagram as a thermokinetic model of heterogeneous current-carrying wire in thermally steady state a, b, c, d are successive stages of diagram construction

- utworzenie modelu obwodowego dla każdego z odcinków przewodu szynowego (modele cząstkowe) oraz dla warunków brzegowych i połączenie ich w układ łańcuchowy modeli cząstkowych (rys. 1c),
- dalsze przekształcenia modelu obwodowego, np. podzielenie badanego fragmentu na jeszcze mniejsze części i zastąpienie pozostałej części przewodu elementami skupionymi o możliwie najprostszej postaci (rys. 1d).

Zaproponowana koncepcja przewiduje wykorzystanie modelu obwodowego jednorodnego odcinka toru prądowego oraz obwodowego modelu warunków brzegowych.

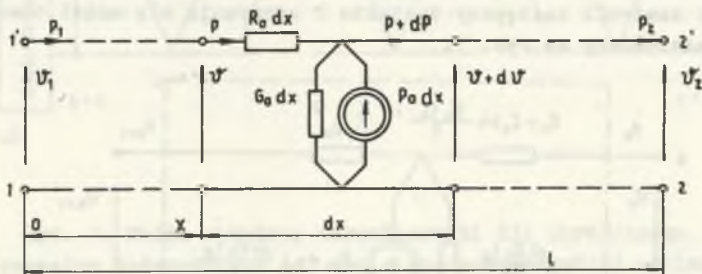
2. Model obwodowy dla jednorodnego odcinka toru prądowego

Zjawiska cieplne występujące w torze prądowym jednorodnym w stanie cieplnie ustalonym opisuje model matematyczny w postaci równań (1):

$$\frac{d\psi}{dx} = PR_0 \tag{1}$$

$$\frac{dP}{dx} = \psi G_0 + P_0$$

lub obwodowy w postaci linii długiej aktywnej (rys. 2), opisanej równaniami łańcuchowymi wg wzoru (2) lub (3):



Rys. 2. Linia elektryczna aktywna o parametrach równomiernie rozłożonych jako model obwodowy dla toru prądowego jednorodnego jednowymiarowego w stanie cieplnie ustalonym

Fig. 2. Active distributed-parameter electrical line as a circuit model of heterogeneous one-dimensional conductor in thermally steady state

$$\begin{bmatrix} \psi \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{ch} \gamma x, & -z \operatorname{sh} \gamma x \\ -\frac{\operatorname{sh} \gamma x}{z}, & \operatorname{ch} \gamma x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_1 \\ P_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{P_0 z}{\gamma} (1 - \operatorname{ch} \gamma x) \\ \frac{P_0}{\gamma} \operatorname{sh} \gamma x \end{bmatrix} \quad (2)$$

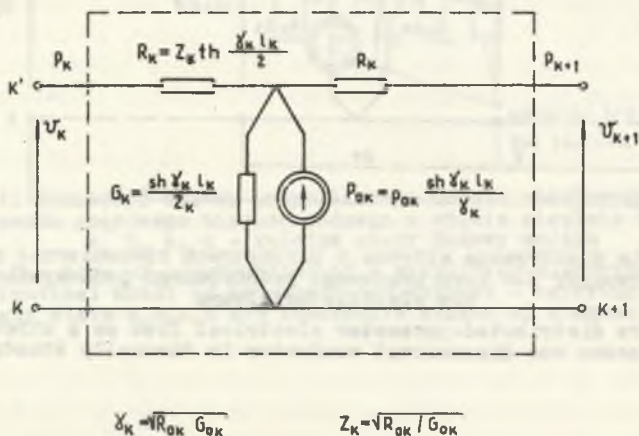
$$\begin{bmatrix} \psi \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{ch} \gamma (1-x), & z \operatorname{sh} \gamma (1-x) \\ \frac{\operatorname{sh} \gamma (1-x)}{z}, & \operatorname{ch} \gamma (1-x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_2 - \frac{P_0 z}{\gamma} (1 - \operatorname{ch} \gamma l) \\ P_2 - \frac{P_0}{\gamma} \operatorname{sh} \gamma l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{P_0 z}{\gamma} (1 - \operatorname{ch} \gamma x) \\ \frac{P_0}{\gamma} \operatorname{sh} \gamma x \end{bmatrix} \quad (3)$$

przy czym:

$$\gamma = \sqrt{R_0 G_0} \quad (4)$$

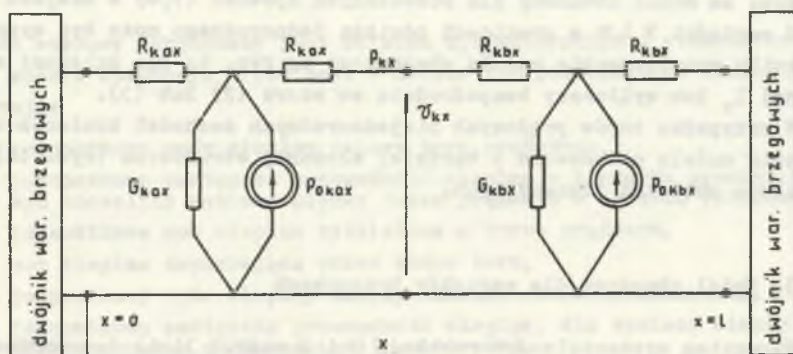
$$z = \sqrt{\frac{R_0}{G_0}} \quad (5)$$

W przypadku badania wielkości ψ oraz P tylko na brzegach odcinka linii, model wg rys. 2 można zastąpić czwornikiem aktywnym. Własności modelu wyrażone są wtedy za pomocą elementów skupionych, których wartości wynikają z zależności (2) dla $x=l$ oraz przyjętego kształtu czwornika zastępczego. Przyjmując czwornik zastępczy kształtu T otrzymuje się model obwodowy skupiony przedstawiony na rys. 3.

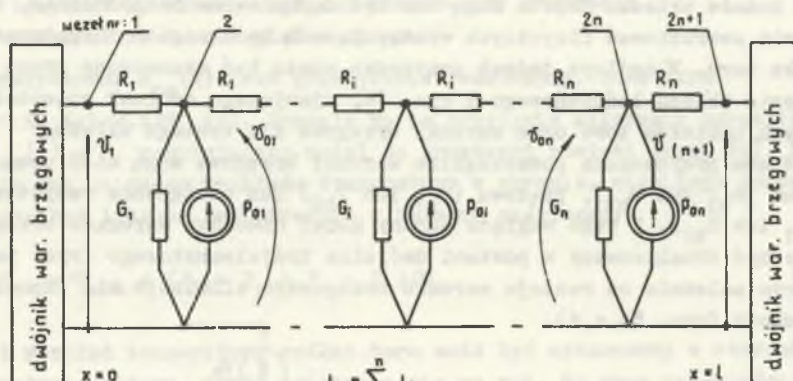


Rys. 3. Czwornik aktywny jako model obwodowy skupiony jednorodnego odcinka l_k toru prądowego niejednorodnego

Fig. 3. Active four-terminal network as a circuit lumped-parameter model of heterogeneous current-carrying line l_k section



a)



b)

Rys. 4. Model obwodowy termokinetyki dla określonego punktu wewnątrz jednorodnego (a) lub niejednorodnego (b) odcinka toru

$$R_{kax} = z_k \operatorname{th} \frac{\gamma_k x}{z_k}; \quad R_{kbx} = z_k \operatorname{th} \frac{\gamma_k (l_k - x)}{z_k}; \quad R_i = z_i \operatorname{th} \frac{\gamma_i l_i}{z_i}$$

$$G_{kax} = \frac{\operatorname{sh} \gamma_k x}{z_k}; \quad G_{kbx} = \frac{\operatorname{sh} \gamma_k (l_k - x)}{z_k}; \quad G_i = \frac{\operatorname{sh} \gamma_i l_i}{z_i}$$

$$P_{okax} = p_{ok} \frac{\operatorname{sh} \gamma_k x}{\gamma_k}; \quad P_{okbx} = p_{ok} \frac{\operatorname{sh} \gamma_k (l_k - x)}{\gamma_k}; \quad P_{oi} = p_{oi} \frac{\operatorname{sh} \gamma_i l_i}{\gamma_i}$$

Fig. 4. Simplified circuit model of thermokinetics for the defined inner point of homogeneous (a) or heterogeneous (b) section of the line

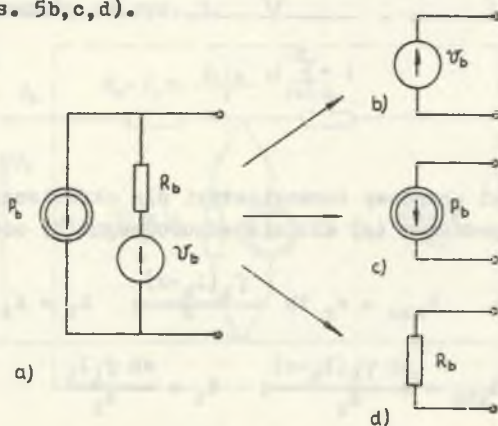
Jednorodny odcinek toru można również podzielić na dwie części i każdą z nich zastąpić oddzielnie czwórnikiem. Uzyskany obwód (rys. 4a) może być uważany za model obwodowy dla rozważanych zjawisk (P, ψ) w miejscu x . Rozkład wartości P i ψ w granicach odcinka jednorodnego może być wyznaczony w wyniku rozwiązywania modelu obwodowego wg rys. 4a dla zmiennej niezależnej l_x lub wyliczany bezpośrednio ze wzoru (2) lub (3).

W przypadku torów prądowych niejednorodnych zachodzi konieczność stosowania modelu obwodowego o bardziej złożonej strukturze (rys. 4b) i prowadzenia obliczeń iteracyjnych.

3. Model obwodowy dla warunków brzegowych

Warunkiem wyznaczalności rozkładu ψ i P wzdłuż linii jednorodnej na podstawie zależności (2), (3) lub modelu obwodowego wg rys. 4a lub rys. 4b jest znajomość dwóch warunków brzegowych, odnoszących się do jednego lub obu końców układu. Często mogą one być formułowane bezpośrednio, na podstawie uwarunkowań fizycznych występujących na brzegach rozpatrywanego odcinka toru. W ogólnym jednak przypadku muszą być wyznaczone drogą rozwiązywania układu łańcuchowego z rys. 1c, ujmującego odcinek rozważany, wiele innych odcinków toru oraz warunki brzegowe dla takiego układu.

W obu przypadkach poszczególne warunki brzegowe mogą mieć postać napięciową (ψ_{b1} lub ψ_{b2}), prądową (P_{b1} lub P_{b2}) lub obciążenia rezystancyjnego (R_{b1} lub R_{b2}). Z tego względu ogólny model obwodowy warunków brzegowych może być zrealizowany w postaci dwójnika trójelementowego (rys. 5a), w którym zależnie od rodzaju warunku brzegowego eliminuje się odpowiednie elementy (rys. 5b,c,d).



Rys. 5. Model obwodowy warunków brzegowych: a) model uogólniony; b,c,d) modele poszczególnych rodzajów warunków brzegowych

Fig. 5. Circuit model of boundary conditions: a) generalized model, b,c, d) models of particular kinds of boundary conditions

4. Model obwodowy dla przewodu szynowego ekranowanego z izolacją gazową

Przewód szynowy ekranowany jest układem niejednorodnym o stosunkowo złożonym modelu obwodowym (rys. 6a). W modelu tym poszczególne elementy reprezentują:

- $R_o(x)$ - jednostkowy opór cieplny osiowy toru prądowego,
- $G_o(x)$ - jednostkowa zastępcza przewodność cieplna w kierunku promieniowym szczeliny gazowej między torem prądowym a ekranem (obudową),
- $P_o(x)$ - jednostkowa moc cieplna wydzielona w torze prądowym,
- P_1, P_p - moc cieplna dopływająca przez końce toru,
- R_{oe} - jednostkowy opór cieplny osiowy ekranu,
- $G_{oe}(x)$ - jednostkowa zastępcza przewodność cieplna, dla wymiany ciepła między ekranem a otoczeniem (powietrzem),
- ψ_e - temperatura ekranu,
- ψ_{ot} - temperatura otoczenia,
- ψ_{eot} - temperatura ekranu względem temperatury otoczenia
- ψ_{te} - temperatura toru względem ekranu.

Łańcuch rezystorów $R_{oe}(x)$ jest praktycznie jednorodny, przy czym

$1/G_o(x) \gg R_{oe}(x) \ll 1/G_{oe}(x)$. Pozwala to na przyjęcie założenia upraszczającego $R_{oe}(x) = 0$, redukującego model do prostszej postaci (rys. 6b). Nie uwzględnia ona osiowego rozkładu temperatury w ekranie, więc jego temperatura może być liczona bezpośrednio z bilansu cieplnego:

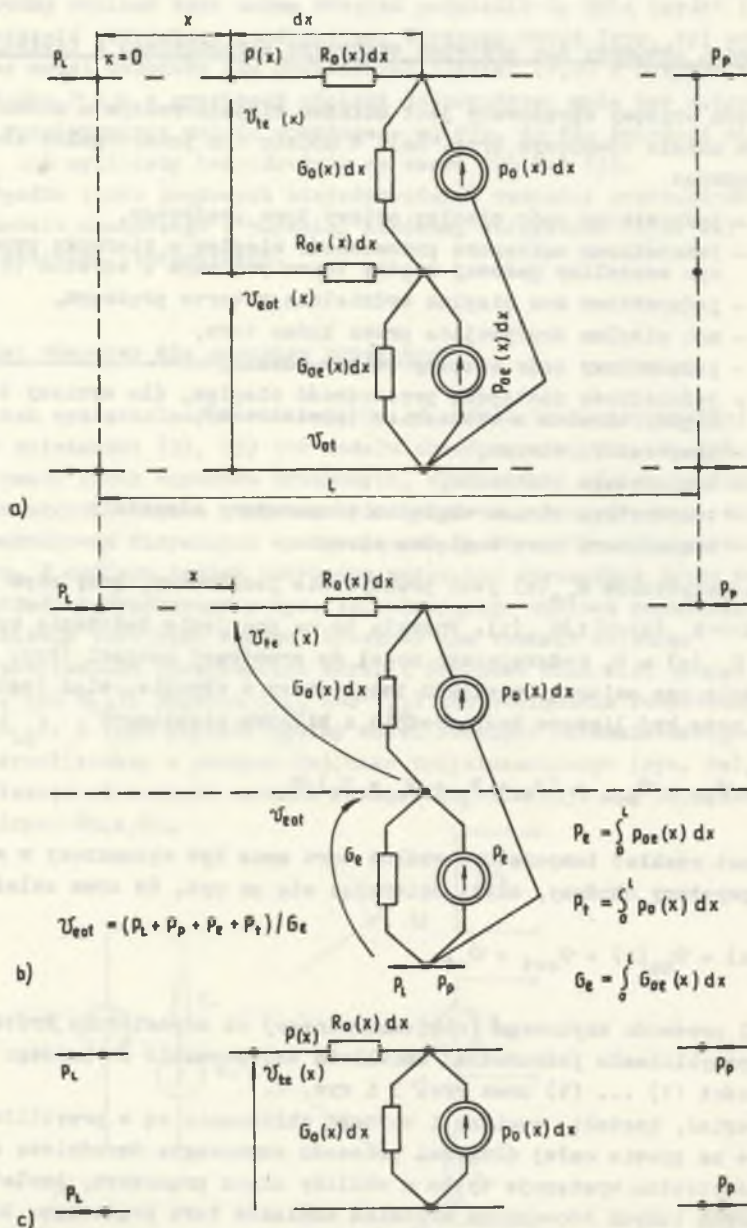
$$\psi_e - \psi_{ot} = \psi_{eot} = (P_1 + P_p + P_e + P_t)/G_e \quad (6)$$

natomiast rozkład temperatury wzdłuż toru może być wyznaczony w stosunku do temperatury obudowy, czyli opierając się na rys. 6c oraz zależności (7):

$$\psi_t(x) = \psi_{te}(x) + \psi_{eot} + \psi_{ot} \quad (7)$$

Podział przewodu szynowego (niejednorodnego) na odpowiednio krótkie odcinki (w przybliżeniu jednorodne) umożliwi zastosowanie do każdego z nich zależności (1) ... (5) oraz rys. 3 i rys. 4.

Materiał, kształt, wymiary i warunki chłodzenia są w przybliżeniu jednakowe na prawie całej długości przewodu szynowego. Zasadnicza niejednorodność cieplna występuje tylko w okolicy złącz prądowych, izolatorów i niektórych innych stosunkowo krótkich odcinków toru prądowego. Konstruowanie modelu obwodowego polega więc na zlokalizowaniu tych elementów i zastąpieniu każdego z nich odpowiednim czwórnikiem o parametrach podanych na rys. 3. Uzyskany w ten sposób układ łańcuchowy modeli cząstkowych umożliwi obliczenie wartości P oraz ψ na zaciskach dowolnego czwornika. Wartości te są warunkami brzegowymi dla odcinka toru reprezentowanego przez ten czwórnik. Jeśli należy zbadać rozkład P i ψ również w obrębie wybra-

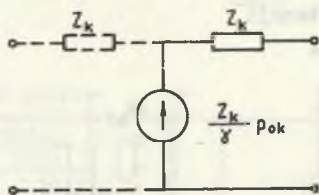


Rys. 6. Model obwodowy termokinetyki przewodu szynowego ekranowanego a) model pierwotny; b) model uproszczony w wyniku założenia $R_{Oe} = 0$; c) dla liczenia rozkładu temperatury względem ekranu, przy $R_{Oe} = 0$

Fig. Circuit model of thermokinetics for a screened bus conductor: a) primary model, b) simplified model as a result of the assumption that $R_{Oe} = 0$, c) model allowing to determine the temperature distribution in relation to the screen (for $R_{Oe} = 0$)

nego odcinka toru, np. l_k na rys. 1b, to obliczenia kontynuuje się dla modelu o strukturze podanej na rys. 1d. Procedura obliczeń pozostaje bez zmian.

Jeśli dane materiałowe i wymiary przewodu po obu stronach badanego odcinka uzasadniają zastosowanie modelu obwodowego w postaci linii aktywnej jednorodnej nieskończenie długiej, to obliczenia mogą być znacznie skrócone. Na podstawie rys. 3, przy $l = \infty$, linia taka daje się sprowadzić do czwórnika pokazanego na rys. 7. Model obwodowy rozważanego odcinka toru będzie w tym przypadku zawierał w miejscu dwójników, reprezentujących warunki brzegowe, dwójniki zaznaczone linią ciągłą na rys. 7.



Rys. 7. Czwórnik zastępczy dla linii aktywnej jednorodnej nieskończenie długiej

Fig. 7. Substitute four-terminal network of an active, homogeneous, and infinitely long line

5. Metoda obliczeń modelu obwodowego dla przewodu szynowego

Proponuje się zastosowanie metody potencjałów węzłowych w ujęciu macierzowym [4] :

$$\mathbf{YV} = \mathbf{I}_z \quad (8)$$

skąd

$$\mathbf{V} = \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{I}_z \quad (9)$$

gdzie:

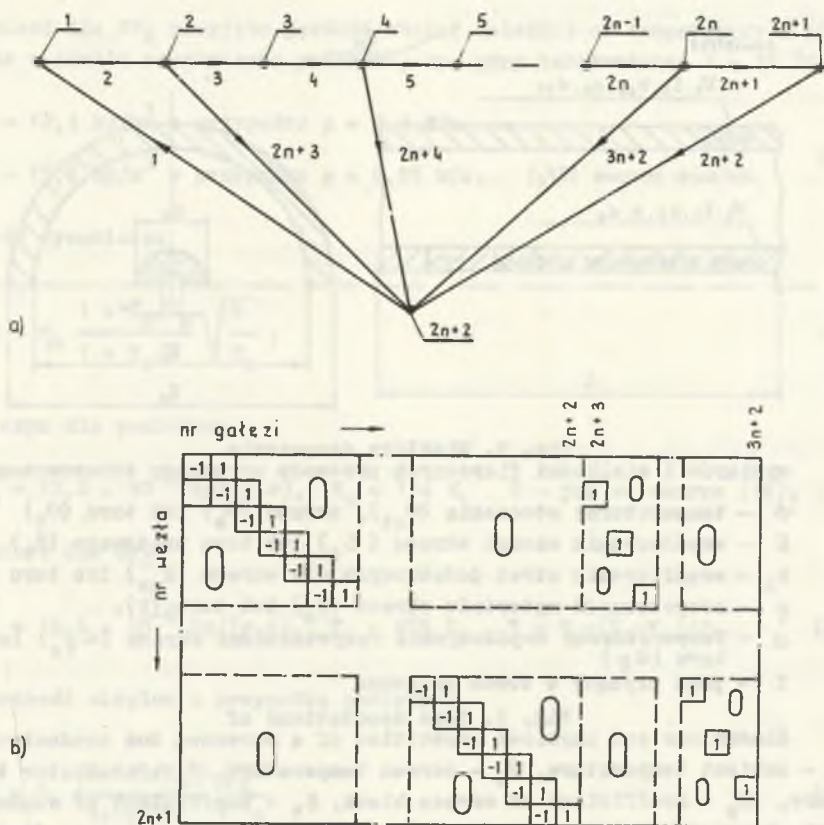
\mathbf{Y} - macierz admitancji,

\mathbf{V} - macierz potencjałów węzłowych,

\mathbf{I}_z - macierz źródeł wypadkowych w węzłach.

Zależność (9) wyrażona za pomocą macierzy incydencji węzłowej \mathbf{A} ma postać:

$$\mathbf{V} = \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{A} (\mathbf{P} - \mathbf{Y}_d \mathbf{V}_g) \quad (10)$$

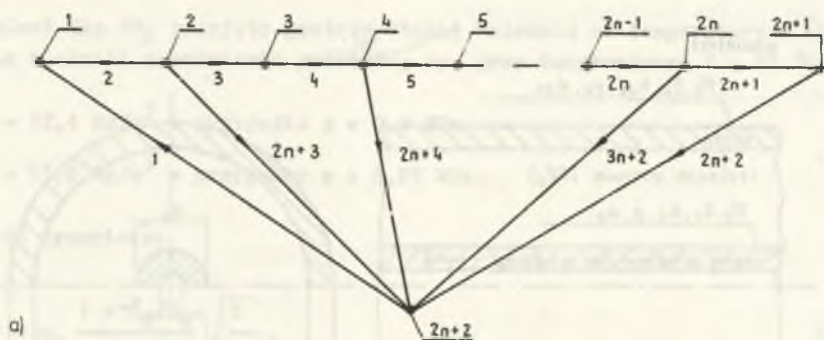


Rys. 8. Ilustracja do metody węzłowej rozwiązywania modelu obwodowego z rys. 4b oraz rys. 5 a) graf strukturalny zorientowany; b) macierz incydencji węzłowa

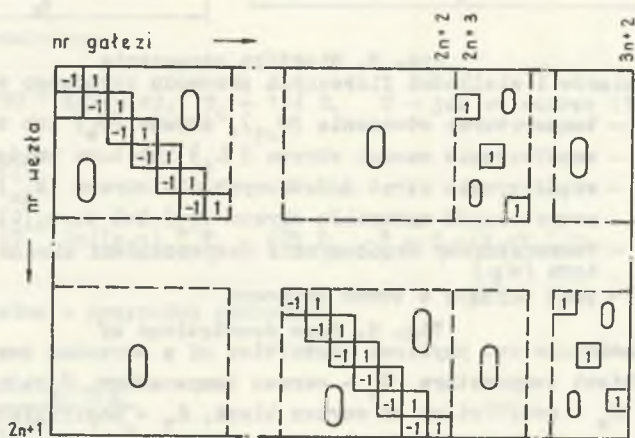
Fig. 8. Illustration of a nodal method of solving the circuit model in Fig. 4b and 5 a) oriented structural graph, b) nodal incidence matrix

6. Zależności fizyczne wykorzystane przy budowie modelu obwodowego dla przewodu szynowego ekranowego

Dla praktycznego zastosowania modelu obwodowego niezbędne jest ilościowo określić jego elementy. Wykorzystano w tym celu niżej podane zależności [5,6,7,8,9], dla których oznaczenia wielkości podano częściowo na rys. 9.



a)



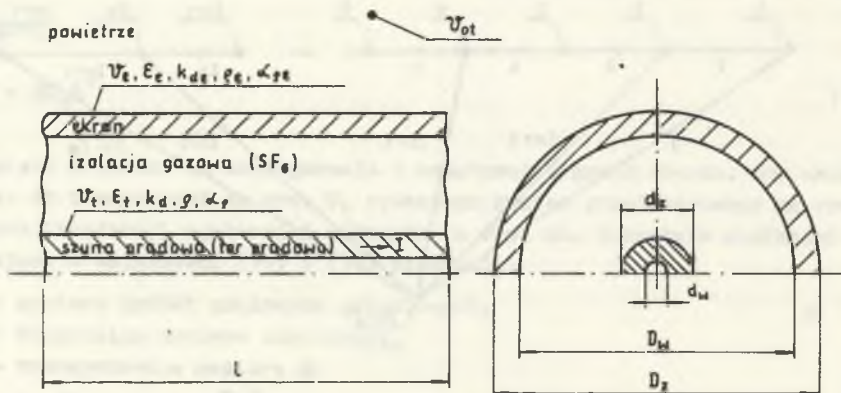
b)

Rys. 8. Ilustracja do metody węzłowej rozwiązywania modelu obwodowego z rys. 4b oraz rys. 5 a) graf strukturalny zorientowany; b) macierz incydencji węzła

Fig. 8. Illustration of a nodal method of solving the circuit model in Fig. 4b and 5 a) oriented structural graph, b) nodal incidence matrix

6. Zależności fizyczne wykorzystane przy budowie modelu obwodowego dla przewodu szynowego ekranowego

Dla praktycznego zastosowania modelu obwodowego niezbędne jest ilościowe określenie jego elementów. Wykorzystano w tym celu niżej podane zależności [5,6,7,8,9], dla których oznaczenia wielkości podano częściowo na rys. 9.



Rys. 9. Niektóre oznaczenia wymiarów i wielkości fizycznych przewodu szynowego ekranowanego

- v - temperatura: otoczenia (v_{ot}), ekranu (v_e) lub toru (v_t),
 ε - współczynnik czerni ekranu (ε_e) lub toru prądowego (ε_t),
 k_d - współczynnik strat dodatkowych dla ekranu (k_{de}) lub toru (k_d),
 ϱ - rezystowność materiału ekranu (ϱ_e) lub toru (ϱ),
 α - temperaturowy współczynnik rezystowności ekranu (α_{ϱ_e}) lub toru (α_{ϱ})
 I - prąd płynący w torze prądowym

Fig. 9. Some denotations of dimensions and physical quantities of a screened bus conductor

v_{ot} - ambient temperature, v_e - screen temperature, v_t - conductor temperature, ε_e - coefficient of screen black, ε_t - coefficient of conductor black, k_{de} - stray losses factor of a screen, k_t - stray losses factor of a conductor, ϱ_e - resistivity of screen material, ϱ_t - resistivity of conductor material, α_{ϱ_e} - temperature coefficient of screen resistivity, α_{ϱ} - temperature coefficient of conductor resistivity, I - current in a conductor

Zależności do obliczenia oporów i przewodności cieplnych w modelach obwodowych przewodu szynowego

Gęstość gazu:

$$\varrho = \varrho_0 \frac{p T_0}{p_0 T} \quad (15)$$

przy czym dla powietrza przyjęto:

$$\varrho_0 = 1,29 \text{ kg/m}^3, \quad \frac{p}{p_0} \approx 1, \quad T_0 = 273 \text{ K} \quad (16)$$

$$T = T_0 + (v_e + v_{ot})/2K$$

natomiast dla SF_6 przyjęto gęstość stałą, zależnie od temperatury i ciśnienia w chwili napełnienia przewodu, np. przy temperaturze $V = 21^\circ C$:

$$\rho = 12,4 \text{ kg/m}^3 \text{ w przypadku } p = 0,2 \text{ MPa}$$

$$\rho = 15,5 \text{ kg/m}^3 \text{ w przypadku } p = 0,25 \text{ MPa.}$$

(17)

Lepkość dynamiczna

$$\eta = \eta_0 \frac{1 + T_c/T_0}{1 + T_c/T} \sqrt{\frac{T}{T_0}},$$

(18)

przy czym dla powietrza

$$\eta_0 = 17,2 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(m.s)}, \quad T_c = 114 \text{ K}, \quad T - \text{jak we wzorze (16); (19)}$$

natomiast dla SF_6

$$\eta_0 = 14,4 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(m.s)}, \quad T_c = 275 \text{ K}, \quad T = T_0 + (V_t + V_e)/2.$$

(20)

Przewodność cieplna w przypadku powietrza

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{1+125/T_0}{1+125/T} \right) \sqrt{\frac{T}{T_0}},$$

(21)

$$\lambda_0 = 2,44 \cdot 10^{-2} \text{ W/(m.K)}, \quad T - \text{jak we wzorze (16),}$$

natomiast dla SF_6 w warunkach przewodu szynowego

$$\lambda = 6,45 \cdot 10^{-6} T^{0,942} \text{ W/(m.K)}, \quad T - \text{jak we wzorze (20).}$$

(22)

Pojemność cieplna jednostkowa:

powietrza w warunkach atmosferycznych

$$C_p = 10^3 \text{ J/(kg.K)},$$

(23)

natomiast dla SF_6 w warunkach przewodu szynowego

$$C_p = 879 + 0,12 T, \quad T - \text{jak we wzorze (20).}$$

(24)

Iloczyn liczby Grashoffa i Prandtla

$$\text{GrPr} = g\beta\Delta V l_d^3 \varphi^2 C_p / (\eta \lambda) \quad (25)$$

gdzie: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $\nu = \eta/\varphi$, $\beta = \frac{1}{273}$,

przy czym w warunkach powietrza otaczającego ekran

$$\text{Pr} = 0,7 \quad \Delta\vartheta = \vartheta_e - \vartheta_{ot}, \quad (26)$$

$l_d = D_z$ - średnica zewnętrzna ekranu,

natomiast dla SF_6 w przewodzie szynowym

$$\Delta\vartheta = \vartheta_t - \vartheta_e \quad (27)$$

$l_d = (D_w - d_z)/2$ = grubość szczeliny pierścieniowej z SF_6 ;

pozostałe wielkości są takie, jak podano poprzednio dla obu gazów.

Przewodność zastępcza, ujmująca przewodzenie i konwekcję w szczelinie SF_6 :

$$\lambda_z = \lambda \alpha_k, \quad (28)$$

gdzie: $\alpha_k = m_\alpha (\text{GrPr})^{n_\alpha}$

$$\begin{aligned} m_\alpha &= 0,18, \quad n_\alpha = 0,25 \quad \text{jeśli } \text{GrPr} > 10^3, \\ m_\alpha &= 0,4, \quad n_\alpha = 0,2 \quad \text{jeśli } 10^6 < \text{GrPr} < 10^{10}. \end{aligned} \quad (29)$$

Współczynnik oddawania ciepła z ekranu do otaczającego go powietrza

$$k_e = C_k (\text{GrPr})^{m_k} \lambda / d_4, \quad (30)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} C_k &= 0,54, \quad m_k = 0,25 \quad \text{jeśli } 5 \cdot 10^2 < \text{GrPr} < 2 \cdot 10^7, \\ C_k &= 0,135, \quad m_k = 1/3 \quad \text{jeśli } 2 \cdot 10^7 < \text{GrPr} < 10^{13}. \end{aligned} \quad (31)$$

Opór cieplny jednostkowy szczeliny z SF_6 uwzględniający: przewodzenie i konwekcję:

$$R_{tk} = \frac{\ln(D_w/d_z)}{2\pi\lambda\alpha_k}, \quad (32)$$

promieniowanie:

$$R_{tr} = \frac{\frac{1}{\varepsilon_t} + \frac{d_z}{D_w} \left(\frac{1}{\varepsilon_e} - 1 \right) (\psi_t - \psi_e)}{\varepsilon_0 \pi d_z (T_t^4 - T_e^4)} \quad (33)$$

$$\varepsilon_0 = 5,77 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}.$$

Przewodność cieplna jednostkowa szczeliny z SF₆, ujmująca przewodzenie, konwekcję i promieniowanie

$$G_{oi} = \frac{R_{tk} + R_{tr}}{R_{tk} \times R_{tr}}. \quad (34)$$

Opór cieplny ekranu (całej długości) w stosunku do otoczenia, ujmujący konwekcję

$$R_{ek} = \frac{1}{k_e S} = \frac{1}{k_e \pi D_z l}, \quad (35)$$

promieniowanie

$$R_{er} = \frac{\psi_e - \psi_{ot}}{\varepsilon_e \varepsilon_0 \pi D_z (T_e^4 - T_{ot}^4) l}. \quad (36)$$

Całkowita przewodność cieplna ekranu w stosunku do otaczającego powietrza

$$G_e = \frac{R_{ek} + R_{er}}{R_{ek} R_{er}}. \quad (37)$$

Jednostkowa osiowa oporność cieplna toru prądowego

$$R_{oi} = \frac{4}{\pi(d_z^2 - d_w^2)\lambda}. \quad (38)$$

Zależności do obliczania mocy cieplnych w przewodzie szynowym

Jednostkowe straty w i-tym odcinku toru prądowego

$$P_{oi} = \frac{4I^2 k_{di} \varphi_i [1 + \alpha \varphi_i (\vartheta_{ti} - 20)]}{\pi(d_{zi}^2 - d_{wi}^2)} \quad (39)$$

Straty na całej długości toru prądowego

$$P_s = \sum_1^n P_{oi} I_i \quad (40)$$

Straty w ekranie (obudowie)

$$P_e = \frac{4 I^2 k_{de} \varphi_e (1 + \alpha \varphi_e (\vartheta_e - 20))}{\pi(D_z^2 - D_w^2)} l \quad (41)$$

Ciepło wnikające z końców toru, wg oznaczeń z rys. 4b

$$P_{kon} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_{o1}}{R_1} + \frac{\vartheta_{n+1} - \vartheta_{on}}{R_n} \quad (42)$$

Ciepło oddawane z ekranu do otoczenia:

- wyrażone za pomocą bilansu cieplnego dla całego toru

$$P_{os1} = P_s + P_e + P_{kon} \quad (43)$$

- wyrażone za pomocą cieplnego prawa Ohma

$$P_{os2} = (\vartheta_e - \vartheta_{ot}) G_e \quad (44)$$

przy czym musi zachodzić $P_{os1} = P_{os2}$.

7. Algorytm obliczeń numerycznych

Stosując model obwodowy przewodu szynowego, uproszczony do postaci podanej na rys. 6b,c oraz metodę obliczania modelu wg p. 5, zbudowano algorytm obliczeń numerycznych pokazany na rys. 10.

Opierając się na ww. algorytmie, opracowano konwersacyjny program obliczeniowy (nazwany TORn), napisany w języku Mallard Basic. Wymagane dane wejściowe dotyczą określenia warunków roboczych, wymiarów geometrycznych

Dane	liczba rozręb wycinków toru n
	temperatura obciążenia U_{oi}
	inne dane liczbowe

Wart. mater. ustępn. alg.	temp. wycinka toru U_i
	temp. obudowy (ekranu) U_e

Źródła L, R, I, A	jednostkowe w torze, P_{oi} wg (39)
	sumaryczne w torze P_s wg (40)
	sumaryczne w ekranie, P_e wg (41)
	na końcach toru, P_{kon} wg (42)

Ciepło oddaw. z ekranu do otacz.	całe wydzielone P_{osi}
	zależnie od temp. ekranu P_{osi} wg (44)
	nie zbilansowane Bilans b

Sprawdzenie, czy Bilans zmienia znak w stosunku do kroku poprzedniego

Wart. model. obwod.	rozłączone wg (34 i 38)
	czwórników zastępczych wg rys. 3

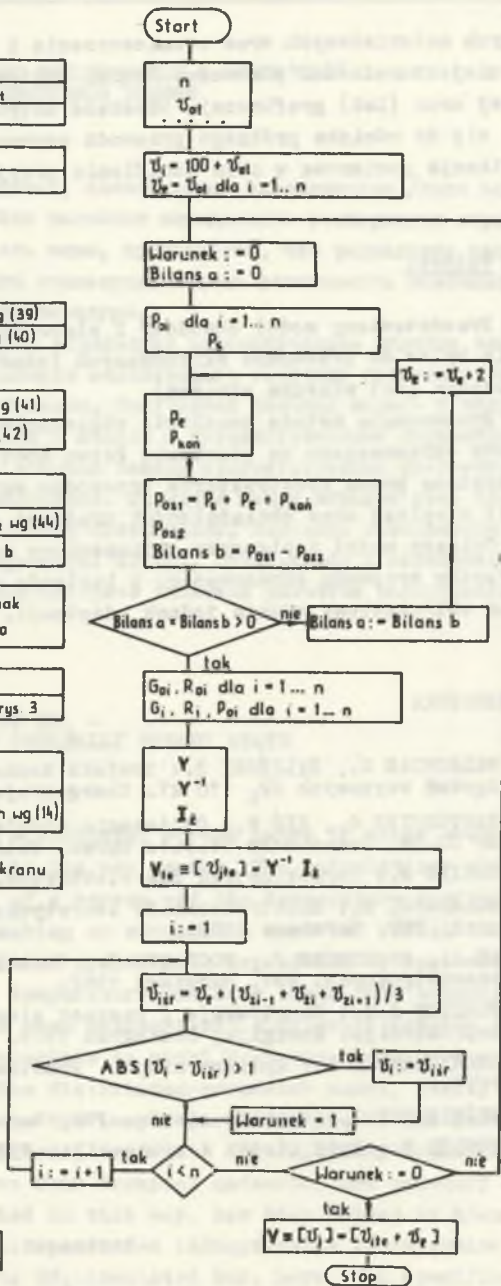
Macierz admitalancji wg (11)

Macierz źródeł wypadk w węzłach wg (14)

Macierz temperatur względem ekranu

Porównanie temperatur po kolejnych krokach iteracyjnych

Macierz temperatur toru ($i = 1 \dots 2n+1$)



Rys. 10. Algorytm "TORn", wyznaczający osłowy rozkład temperatury w przewodzie szynowym ekranowanym w stanie cieplnie ustalonym

Fig. 10. The so-called "TORn" algorithm determining aial temperature distribution inside the screened bus being in thermally steady state

i danych materiałowych oraz rozmieszczenia i opisu ilościowego rozróżnionych niejednorodności przewodu. Wyniki obliczeń podawane są w postaci liczbowej oraz (lub) graficznej. Uzyskane dotychczas wyniki obliczeń [2] odnoszą się do odcinka próbnego przewodu szynowego [1] i planowana jest ich weryfikacja pomiarowa w celu uściślenia przyjętych założeń.

8. Wnioski

1. Przedstawiony model obwodowy i algorytm obliczeń odnoszą się bezpośrednio tylko do przewodów ekranowanych jednobiegunowo (każda szyna fazywa otoczona jest własnym ekranem).

2. Proponowana metoda umożliwia obliczenie rozkładu temperatury wzdłuż przewodu ekranowanego na podstawie łatwo dostępnych danych. Może ona być wykorzystana przez konstruktorów przewodów szynowych przy obliczeniach dyatacji cieplnej oraz obciążalności prądowej długotrwałej.

3. Opisany model i algorytm obliczeniowy mogą być zastosowane również w przypadku przewodu ekranowanego z izolacją inną niż SP_6 (np. powietrzną). Program obliczeniowy wymaga jednak adaptacji.

LITERATURA

- [1] WALKOWIAK C., ŻYLIŃSKI Z.: Projekt techniczny odcinka próbnego połączeń szynowych SP_6 110 kV. Energoprojekt-Warszawa. Nr arch. 1000 004.
- [2] BARTODZIEJ G., KIŚ W.: Obliczenia cieplne przewodów szynowych. CPBP Nr 02.18. Zadanie Nr 14.3.4. Oprac. Polit. Śląskiej, 1988.
- [3] HERING M.: Termokinetyka dla elektryków. WNT, Warszawa 1980.
- [4] BOLKOWSKI S.: Elektrotechnika teoretyczna. Teoria obwodów elektrycznych. WNT, Warszawa 1982.
- [5] AU A., MAKSYMIAK J., POCHANKE Z.: Podstawy obliczeń aparatów elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1982.
- [6] POŁTIEW A.I.: Konstrukcje i rasczot elegazowych aparatów wysokiego napięcia. Energija, Leningrad 1979.
- [7] STANISZEWSKI B.: Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne. PWN, Warszawa 1979.
- [8] WIŚNIEWSKI S.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1979.
- [9] HOBLER T.: Ruch ciepła i wymienniki. WNT, Warszawa 1979.

Recenzent: doc. dr inż. Romuald Włodek

Wpłynęło do redakcji dnia 15 czerwca 1989 r.

РАСЧЁТЫ НАГРЕВА ЭКРАНИРОВАННЫХ ШИНСПРОВОДОВ С ЭЛЕГАЗОВОЙ
ИЗОЛЯЦИЕЙ В ТЕРМИЧЕСКИ УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

Р е з ю м е

Статья касается экранированных, однополюсных шинспроводов /шина каждой фазы имеет свой экран/. Расчёты включают определение температуры экрана и распределения температуры вдоль шины, предполагая, что радиальное распределение температуры имеет осевую симметрию. Учтена зависимость источников тепла и тепловых сопротивлений от температуры.

Предложенный расчётный метод использует математическое подобие электрических и тепловых явлений позволяющее моделировать тепловые явления с помощью соответственной электрической схемы. Полученная сложная модель с разделёнными параметрами преобразована в модель с сосредоточенными параметрами. Параметры эти определяются с помощью замены соответственных фрагментов шинпровода активными четырёхполюсниками. Созданная таким образом цепь частичных моделей решается с помощью узловых потенциалов. Получены зависимости для количественного определения параметров модели, относящиеся к шинпроводу с элегазовой изоляцией. Приведён алгоритм числовых расчётов распределения температуры.

CALCULATION OF THE HEATING OF SF₆ -
- INSULATED SCREEN BUSES IN THERMALLY STEADY STATE

S u m m a r y

The article concerns SF₆ - insulated screen buses in which every one-phase conductor is enclosed in its own screen. The calculations refer to determining the temperature of a screen and the temperature distribution along a current conductor, making an assumption that the radial temperature distribution shows rotational symmetry. A dependence of heat sources and heat resistances on the temperature has been taken into account. The suggested calculation method uses mathematical similarity between electric and heat effects making it possible to model heat phenomena by means of a suitable electric diagram. The distributed-parameter model, fairly complicated, has been transformed to the lumped-parameter model. The parameters of the above lumped-constant model have been determined by replacing proper bus fragments with active four-terminal networks. The catenary system of partial models, established in this way, has been solved by means of nodal potential method. Some dependences indispensable to determine the model parameters, relevant to SF₆-insulated bus, have been specified. The algorithm for computer calculation of temperature distribution has been presented.