

Tadeusz Teluk

Instytut Elektroenergetyki  
i Sterowania Układów

### WYZNACZENIE OPORNOŚCI CIEPLINEJ ZEWNĘTRZNEJ KABLA PRACUJĄCEGO W POWIETRZU

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę obliczania zewnętrznej oporności cieplnej kabli pracujących w powietrzu w oparciu o stosowanie równań kryterialnych obowiązujących w przypadku występowania działania mechanizmów konwekcji swobodnej i wymuszonej z uwzględnieniem zjawiska promieniowania ciepła.

#### Wstęp

Ostrożność z jaką podchodzi elektryk do wyznaczenia max. prądu obciążenia w eksploatacji kabla elektroenergetycznego spowodowana jest ograniczeniem tego prądu, wynikającym z następującej nierówności:

$$J_{\max 0} \leq J_{dd} \quad (1)$$

gdzie

$J_{\max 0}$  - maksymalny prąd obciążenia kabla elektroenergetycznego stały w czasie,

$J_{dd}$  - prąd dopuszczalny długotrwale dla danego kabla el-en.

W ruchu istnieje możliwość okresowego przeciążenia kabla w zależności od struktury dobowego grafiku obciążenia.

Z warunku (1) wynika wprost nierówność

$$v_k \leq v_{dd} \quad (2)$$

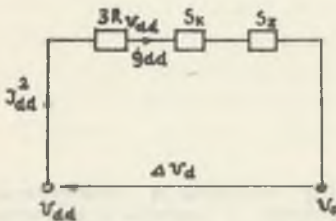
w której

$v_k$  - temperatura w jakiej pracuje izolacja kabla el-en,

$v_{dd}$  - temperatura dopuszczalna długotrwale dla izolacji kabla el-en ze względu na proces jej starzenia.

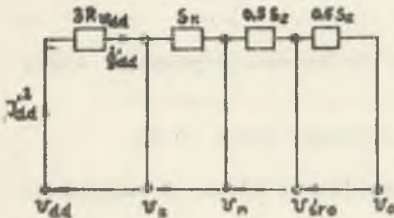
Temperaturę  $v_{dd}$  dymensjonują własności fizykochemiczne izolacji, natomiast prąd  $J_{dd}$  zdolność jej przewodnictwa cieplnego.

Rozważania dotyczące wielkości prądu  $J_{dd}$  można prowadzić w oparciu o analogowy schemat elektryczny dla przepływów ciepła w stanie ustalonym przez układ izolacji cylindrycznej jaką stanowi kabel el-en.



Rys. 1. Schemat elektryczny dla przepływu ciepła w kablach elektroenergetycznych

$\dot{q}_{dd}$  - ilość ciepła dopuszczalna długotrwałe,  $R_{dd}$  - oporność elektryczna żyły kabla elektroenergetycznego w temperaturze  $V_{dd}$ ,  $S_K$  - oporność cieplna izolacji kabla elektroenergetycznego  $V_0$  - temperatura odniesienia,  $S_Z$  - oporność cieplna zewnętrzna



Rys. 2. Schemat elektryczny dla przepływu ciepła w kablu elektroenergetycznym pracującym w powietrzu

$V_n$  - temperatura warstwy zewnętrznej kabla elektroenergetycznego,  $V_{\acute{s}ro}$  - temperatura warstwy przysiciennej

Schemat ten obowiązuje w przypadku ułożenia kabla bezpośrednio w ziemi, a oporność cieplna zewnętrzna  $S_Z$  jest równa oporności cieplnej ziemi wyznaczonej wg metod podanych przez szereg autorów.

Gdy kabel el-en ułożony zostanie w powietrzu (np. na konstrukcjach wsporniczych) prąd  $J_{dd}$  obliczamy w oparciu o analogowy schemat elektryczny podany na rys. 2, z uwagi na inny mechanizm odprowadzania ciepła do otoczenia przez kabel w powietrzu, niż przez kabel ułożony w ziemi. Oporność cieplną zewnętrzną  $S_Z$  w tym przypadku wyznaczyć można metodą podaną w artykule.

W schemacie na rys. 2 uwzględniono stan quasi ustalony dla konwekcji swobodnej i wymuszonej ciepła odprowadzanego z kabla do otoczenia, w którym oporność cieplna zewnętrzna jest funkcją temperatury warstwy zewnętrznej  $V_n$  kabla el-en ułożonego w powietrzu ze zmianą której ulegają zmianie własności fizykochemiczne powietrza. Należy zaznaczyć, że wielkość tej oporności w poważnym stopniu wpływa na prąd  $J_{dd}$ , gdyż jak wykazują obliczenia jest ona średnio 2-3 razy większa od oporności cieplnej kabla el-en  $S_K$ .

Temperaturę odniesienia  $V_0$  (temperatura powietrza) określa się w oparciu o rozkład pola temperatur. W stanie cieplnie ustalonym temperatura ta jest stała w czasie.

Sposób wyznaczenia oporności cieplnej zewnętrznej kabla elektroenergetycznego pracującego w powietrzuWzory obliczeniowe

Poniższe zależności pochodzą z [1][2].

- a)  $(Nu) = 0,372 (Gr)^{1/4}$       gdy  $(Gr \times Pr) < 10^{-3}$   
 b)  $(Nu) = 1,180 (Gr \times Pr)^{1/8}$       gdy  $10^{-3} < (Gr \times Pr) < 5 \times 10^2$   
 c)  $(Nu) = 0,540 (Gr \times Pr)^{1/4}$       gdy  $5 \times 10^2 < (Gr \times Pr) < 2 \times 10^7$   
 d)  $(Nu) = C \times (Re)^n$        $C$  i  $n = f(Re)$  wg [2].

Zależności a) b) c) podane zostały przez Hermana, zależność d) przez Hilperta.

Wykaz oznaczeń:

- $(Nu) = \alpha \frac{d}{\lambda}$       - liczba kryterialna Nusselta,  
 $\alpha$       - współczynnik przejmowania ciepła,  
 $\lambda$       - przewodność cieplna  
 $(Gr) = \frac{d^3 \rho g \Delta \nu}{\nu^2}$       - liczba kryterialna Grąssshofa,  
 $d$       - średnica zewnętrzna kabla elektroenergetycznego,  
 $g$       - przyspieszenie ziemskie,  
 $\rho$       - współczynnik rozszerzalności objętościowej powietrza,  
 $\Delta \nu$       - różnica temperatur  $(\nu_n - \nu_{gr 0})$ ,  
 $\nu$       - współczynnik lepkości kinematycznej powietrza,  
 $(Pr) = 0,74$       - liczba Prandtla dla powietrza.

Współczynniki występujące we wzorach a) d) zależne są od temperatury  $\nu_{gr 0} = \frac{\nu_n + \nu_0}{2}$  - średniej temperatury warstwy przyściennej. Ciepło oddawane do otoczenia przez kabel elektroenergetyczny pracujący w powietrzu drogą promieniowania jest niewielkie i można go pomijać w obliczeniach (dla występujących małych różnic temperatur między warstwą zewnętrzną i otoczeniem).

Współczynnik przejmowania ciepła przy uwzględnieniu zjawiska promieniowania ciepła równy jest sumie  $\alpha + \alpha_r$ , gdzie  $\alpha_r$  oblicza się z relacji

$$\alpha_r = \frac{\epsilon_1 C_0 \left[ \left( \frac{\nu_n + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{\nu_0 + 273}{100} \right)^4 \right]}{\nu_n - \nu_0} \quad \left( \frac{1}{m^2} \right),$$

gdzie

$\xi_1$  - współczynnik emisyjności,

$C_0$  - stała promieniowania (4,9).

Oporność cieplną zewnętrzną wyznaczamy w oparciu o schemat na rys. 2. Wielkości liczbowe modułu Grasshofa i Reynoldsa [1][2] zależą od temperatury warstwy zewnętrznej  $\vartheta_n$ . Parametr ten można obliczyć analitycznie z następującej zależności:

$$\vartheta_n = \vartheta_k \frac{1}{a+1} + \vartheta_0 \frac{a}{a+1}, \quad (3)$$

gdzie

$$a = S_k/S_z - \text{współczynnik obliczeniowy uwzględniający} \quad (4)$$

$S_k$  - oporność cieplna kabla,

$S_z$  - oporność cieplna zewnętrzna.

Z uwagi na

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = f_1(\vartheta_n) \\ S_z = f_2(\alpha) \end{array} \right\} P(\alpha, \vartheta_n) = 0 \quad (5)$$

parametr  $\vartheta_n$  występuje w relacji (3) w postaci uwikłanej i trudno jest go wyliczyć. W tym celu proponuje się metodę pozwalającą na szybkie i dokładne znalezienie wartości oporności cieplnej zewnętrznej, będącej funkcją  $\vartheta_n$ .

Sposób postępowania:

1. Zakładamy grzanie kabla prądem  $J'_{dd}$ .
2. Ze schematu na rys. 2 wyznaczamy  $\vartheta_n = \vartheta_{dd} - 3 J_{dd}^2 R_{jdd} S_k$  i obliczamy  $S_z = f_2(\alpha)$  ze wzoru (6).
3. Obliczamy prąd  $J_{dd}$ .
4. O poprawności wyliczenia temperatury  $\vartheta_n$  będzie świadczyć równość  $J'_{dd} = J_{dd}$ .
5. Ze wzoru (5) obliczamy  $\alpha = f_1(\vartheta_n)$ .
6. Ze wzoru (6) obliczamy ostatecznie  $S_z = f_2(\alpha)$ .

Tak obliczona oporność zewnętrzna  $S_z$  będzie obowiązywała w warunkach konwekcji swobodnej. Gdy spodziewamy się działania mechanizmu konwekcji wymuszonej (chłodzenie wiatrem), sposób obliczeń  $S_z$  będzie taki sam do punktu 5.



Współczynnik  $\alpha$  będziemy wyznaczać z równania kryterialnego wg Hilperta (p. d), w którym

$$(Re) = \frac{v d}{\nu}, \quad (5a)$$

gdzie

$v$  - prędkość wiatru,  
 $(Re)$  - liczba kryterialna Reynoldsa.

Oporność cieplną zewnętrzną obliczamy z relacji

$$S_z = \frac{1}{\alpha \pi d}. \quad (6)$$

#### Przykład obliczeniowy

Kabel el-en AKFt 6 kV,  $3 \times 25 \text{ mm}^2$  ułożono w powietrzu, w miejscu w którym jest on narażony na bezpośrednie działanie promieni słonecznych.

Dane wg PN-55/E-05021:  $\psi_{dd} = 60 \text{ deg}$ ,  $\psi_0 = 40 \text{ deg}$ .

Z danych dotyczących budowy tego kabla obliczamy

$S_k = 0,393 \text{ (}\frac{\Omega}{\text{m}}\text{)}$  - całkowita oporność cieplna kabla,

$d = 0,030 \text{ (m)}$

$R_{\psi_{dd}} = 1,420 \text{ (}\frac{\Omega}{\text{km}}\text{)}$  - rezystancja żył kabla w temperaturze  $\psi_{dd}$ ,

$\Omega_c = \text{(}\frac{\text{deg}}{\text{W}}\text{)}$  - om cieplny.

Zakładamy  $J'_{dd} = 60,7 \text{ A}$  i obliczamy  $q'_{dd} = 3 J_{dd}^2 R_{\psi_{dd}} = 16,08 \text{ (}\frac{\text{W}}{\text{m}}\text{)}$

$$\psi_n = \psi_{dd} - q'_{dd} S_k = 55 \text{ deg}$$

$$\psi_{sr 0} = \frac{\psi_0 + \psi_n}{2} = 47,5 \text{ deg.}$$

W dalszym ciągu sprawdzamy czy dla dowolnie założonego  $J_{dd}$  temperatura  $\psi_n$  została obliczona poprawnie.

$$T = 47,5 + 273 = 320,5^\circ\text{K},$$

$$\beta = \frac{1}{T} = 0,0031 \text{ deg}^{-1},$$

$$\Delta\psi = \psi_n - \psi_{sr 0} = 7,5 \text{ deg.}$$

Dla temperatury  $v'_{\text{śr0}}$  z tabel w pracy [2] odczytujemy parametry powietrza

$$v' \times 10^6 = 17,95 \frac{\text{m}^2}{\text{sek}} \quad \text{i} \quad \lambda = 0,0265 \left( \frac{1}{\text{śc}} \right).$$

$$(\text{Gr}) = 360 \times 10^3, \quad (\text{Pr}) = 0,74, \quad (\text{Gr} \times \text{Pr}) = 280 \times 10^3$$

$$\text{wg c) } (\text{Nu}) = 12,0$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} (\text{Nu}) = 10,6 \left( \frac{1}{\text{śc m}^2} \right),$$

$$\text{więc } S_z = 0,87 (\text{śc m}) \text{ z (6).}$$

$$J_{\text{dd}} = \sqrt{\frac{v'_{\text{dd}} - v'_0}{3 R_{\text{vdd}} (S_k + S_z)}} = 61 \text{ A.}$$

Sprawdzenie wypadło pozytywnie. Wobec tego w dalszych obliczeniach możemy operować parametrami powietrza odczytanymi dla  $v'_{\text{śr0}}$ .

$$\text{Wg (5a) } (\text{Re}) = 1730 \text{ przy } v = 1 \text{ m/sek}$$

$$\text{Wg d) } (\text{Nu}) = 19,9 \text{ dla } C = 0,615 \text{ i } n = 0,466 \text{ z [2].}$$

$$\text{Stąd } \alpha = 17,6 \left( \frac{1}{\text{śc m}^2} \right).$$

Zjawiska promieniowania z uwagi na małą różnicę między temperaturą warstwy zewnętrznej i otoczenia możemy nie uwzględniać. Jak widać, zastosowana metoda pozwala uzyskać szybko dokładny wynik w postaci wartości oporności cieplnej zewnętrznej. Wykonane przez autora obliczenia prądów dopuszczalnie długotrwałych dla niektórych typów kabli el-en produkowanych w Polsce, wykazały dużą ich zbieżność z prądami zalecanymi przez normę. Ewentualne uwzględnianie konwekcji wymuszonej w warunkach dopuszczalnie długotrwałych, przy wyznaczaniu obciążalności kabli el-en pracujących w powietrzu, wymaga badań statystycznych, które pozwoliłyby na ustalenie korelacji między temperaturą  $v'_{\text{dd}}$  a prędkością wiatru mogącą wystąpić w tej temperaturze. Mogłoby się okazać, że nawet przy największym upale wieje wiatr z szybkością 1 m/s. Pozwoliłoby to na znaczne zwiększenie prądu  $J_{\text{dd}}$ .

Wnioski

1. Metodę obliczania oporności cieplnej zewnętrznej w oparciu o równania kryterialne można stosować do obliczeń prądów dopuszczalnych długotrwałe dla dowolnych typów kabli elektroenergetycznych pracujących w powietrzu.
2. Metoda ta pozwala na uwzględnienie wpływu naturalnego chłodzenia, jak i działania mechanizmu promieniowania na wielkość liczbową współczynnika przejmowania ciepła.

## LITERATURA

1. Hobler T.: Wymiana i wymienniki ciepła. PWT, Warszawa 1969.
2. Staniszewski B.: Wymiana ciepła - podstawy teoretyczne. PWN, Warszawa 1963.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕГО ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
КАБЕЛЬ РАБОТАЮЩЕГО В ВОЗДУХЕ

## Р е з ю м е

В статье представлен метод вычисления внешнего теплового сопротивления кабелей работающих в воздухе, на основе применения критерийных уравнений обобщающих в случае действия механизмов свободной и принужденной конвекции с учётом явления теплового излучения.

## EVALUATION OF OUTER HEAT RESISTANCE OF CABLE IN THE AIR

## S u m m a r y

A method of determining the outer heat resistance of power cables in the air is presented based on the application of criterial equations, valid in cases where free and forced convection mechanisms are acting, including the phenomenon of heat radiation.