



Andrzej Kaczmarczyk*

OBCIĄŻALNOŚĆ PRĄDOWA KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH UŁOŻONYCH NA STAŁE W GRUNCIE A WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA GRUNTU I JEGO POMIAR

Streszczenie: W kablach elektroenergetycznych podstawowym źródłem ciepła jest prąd płynący przez żyły przewodzące. Na przyrost temperatury żyły kabla wpływ mają własności cieplne otoczenia. W przypadku kabli ułożonych bezpośrednio w ziemi wielkością determinującą dokładność obliczeń dopuszczalnego natężenia prądu jest wielkość wyznaczonego oporu cieplnego gruntu. W pracy omówiono metody wyznaczania dyfuzyjności cieplnej oraz współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Szczególną uwagę zwrócono na błędy tych metod oraz ich wady i zalety w nawiązaniu do wyznaczania obciążalności kabli.

Słowa kluczowe: kable elektroenergetyczne, współczynnik przewodzenia ciepła gruntu

1. Wstęp

Zmienne w czasie obciążenie kabla elektroenergetycznego ułożonego w gruncie jest przyczyną propagacji ciepła wewnątrz i na zewnątrz kabla na zasadzie kondukcji w wszystkich kierunkach. Literatura przedmiotu [1, 2, 3, 4, 5] rozważa przeważnie promieniowe przepływy ciepła w ciałach o kształcie walca i podaje, że w stanie ustalonym cieplnie 50÷70% całkowitego przyrostu temperatury żyły kabla jest wywołane przez opór cieplny gruntu. Pewność zasilania obiektów o szczególnym znaczeniu tj. obiektów strategicznych, wojskowych czy też o dużym stopniu zagrożenia dla środowiska naturalnego, wymaga przy projektowaniu linii kablowych uwzględnienia badań eksperymentalnych gruntu. W przypadku konieczności modyfikowania gruntu ze względu

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, al. Mickiewicza 30

na jego nieodpowiednie parametry termofizyczne, co jest równoznaczne ze sztucznym wypełnieniem rowów kablowych, odpowiednie decyzje należy również podejmować w oparciu o rachunek ekonomiczny. Biorąc pod uwagę powyższe należy stwierdzić, że największy dopuszczalny prąd obciążenia długotrwałego może być wiarygodnie określony wyłącznie na podstawie eksperymentalnie wyznaczonego cieplnego właściwego oporu gruntu.

2. Parametry termofizyczne gruntu

Warunki pracy kabla ułożonego w gruncie zależą od głębokości ułożenia kabla, wzajemnej odległości pomiędzy sąsiednimi kablami (wpływ pól temperatury) oraz odległości kabli od ścian, przegród, osłon, itp. a także własności cieplnych otoczenia.

Parametry termofizyczne gruntu tj. współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe i gęstość, zależą w porównaniu z innymi ciałami stałymi od szeregu innych własności determinujących wartości tych parametrów.

Opór cieplny gruntu na jednostkę długości kabla p w gruncie q równoległych kabli jednakowo obciążonych określa zależność [5]:

$$S_0 = \frac{k}{2\pi} \ln \left[\left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) \left(\frac{m'_{p1}}{m_{p1}} \cdot \frac{m'_{p2}}{m_{p2}} \dots \frac{m'_{pk}}{m_{pk}} \dots \frac{m'_{pq}}{m_{pq}} \right) \right], \quad u = \frac{a}{R} \quad (1)$$

gdzie: k – opór cieplny właściwy gruntu [Km/W], a – odległość od osi kabla do powierzchni gruntu [m], R – zewnętrzny promień kabla [m], $m'_{p1} \dots m'_{pq}$ oraz $m_{p1} \dots m_{pq}$ – odległości między kablami i ich symetrycznym odwzorowaniem względem powierzchni ziemi oraz odległości między kablami w gruncie [m].

Wielkością determinującą dokładność obliczeń wg (1) jest opór cieplny właściwy gruntu. Zależy on od temperatury gruntu, jego składu, zwartości (porowatości), wilgotności, zawartości powietrza w gruncie oraz ilości i składu chemicznego ciał rozpuszczonych w wodzie grunтовой.

Na wartość parametrów termofizycznych gruntu ma wpływ również jego temperatura, która rośnie wraz z głębokością oraz zależy od dobowych i miesięcznych wahań temperatury powietrza atmosferycznego. Minimalna głębokość ułożenia kabla w gruncie mierzona od powierzchni gruntu do powierzchni zewnętrznej kabla jest znormalizowana [7, 11]. Zależy ona od rodzaju kabla i napięcia znamionowego sieci.

Zgodnie z projektem PN obciążalność kabli ułożonych bezpośrednio w gruncie wyznacza się z uwzględnieniem zjawiska migracji wilgoci spowodowanej eksploatacją kabla. W obszarze wysuszenia gruntu w bezpośrednim otoczeniu kabla przyjmuje się obliczeniową temperaturę gruntu równą $+35^\circ\text{C}$, a odpowiadającą jej wartość rezystywności cieplnej gruntu równą 2,5 Km/W [7].

3. Eksperymentalne metody wyznaczania współczynnika ciepła i dyfuzyjności cieplnej gruntu

Ogólnie laboratoryjne metody wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła można podzielić na stacjonarne i dynamiczne (niestacjonarne).

Wśród każdego z tych rodzajów metod można wyróżnić z kolei metody bezpośrednie i porównawcze. Tylko niektóre z tych metod można stosować w warunkach ruchowych. Zazwyczaj realizuje się jednowymiarowy przepływ ciepła, a próbki mają prostą formę geometryczną (płyta, walec, kula) [1, 3]. Odnosi się to zarówno do metod stacjonarnych jak i niestacjonarnych.

W metodach stacjonarnych bezpośrednich, wielkościami mierzonymi są strumień ciepła i różnica temperatury między dwiema powierzchniami izotermicznymi. Metodami niestacjonarnymi wyznacza się dyfuzyjność cieplną, a pośrednio współczynnik przewodzenia ciepła.

Rozwiązaniem równania przewodzenia ciepła przy warunku brzegowym pierwszego lub trzeciego rodzaju dla ciał o prostej formie geometrycznej jest funkcja [1, 2, 3, 4]:

$$\theta(x_i, \tau) = \frac{T(x_i, \tau) - T_o}{T_p - T_o} = \sum_{n_1=1}^{\infty} \sum_{n_2=1}^{\infty} \sum_{n_3=1}^{\infty} \prod_{i=1}^3 C_{n,i} \Psi \left(\mu_{n,i} \cdot \frac{x_i}{L} \right) \exp(-\mu_{n,i}^2 F_o) \quad (2)$$

gdzie: $x_i \in [0, L]$, $i = 1, 2, 3$, $\tau \in [0, \tau_{T=T_o}]$, $F_o = \frac{\chi \tau}{L^2}$, $\chi = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ przy czym przyjęto: $\lambda = \text{const}$, $\rho = \text{const}$, $c_p = \text{const}$, $T_o = \text{const}$, $T_p = \text{const}$, L – wymiar charakterystyczny ciała [m], τ – czas [s], θ – temperatura zredukowana [-], $T(x_i, \tau)$ – temperatura w dowolnym punkcie ciała x_i i w dowolnej chwili τ [K], T_o – temperatura otoczenia [K], T_p – temperatura początkowa ciała [K], $C_{n,i}$ – stałe tzw. początkowe amplitudy cieplne [-], $\Psi(\mu_{n,i} \cdot x_i/L)$ – funkcja uwzględniająca zależność pola temperatury od kształtu ciała [-], $\mu_{n,i}$ – pierwiastki odpowiednich równań charakterystycznych [-], F_o – liczba podobieństwa Fouriera [-], χ – dyfuzyjność cieplna gruntu [m^2/s], λ – współczynnik przewodzenia ciepła gruntu [W/mK], c_p – ciepło właściwe gruntu [J/kgK], ρ – gęstość gruntu [kg/m^3].

Stale $C_{n,i}$ oraz pierwiastki równań charakterystycznych $\mu_{n,i}$ są funkcjami liczby podobieństwa Biota $Bi = \alpha L/\lambda$, gdzie α [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] – oznacza współczynnik wnikania ciepła. Równania definiujące stałe $C_{n,i}$ oraz równania charakterystyczne są różne i zależą od kształtu badanej próbki oraz od rodzaju warunku brzegowego.

Jeżeli realizowany jest jednowymiarowy przepływ ciepła, a ponad to ograniczymy szereg (2) tylko do pierwszego wyrazu, wówczas można określić dyfuzyjność cieplną z zależności [12, 13, 14]:

$$\chi = \frac{L^2}{\mu_1^2(\tau_2 - \tau_1)} \ln \frac{T(x_1, \tau_1) - T_o}{T(x_1, \tau_2) - T_o} \quad (3)$$

Z zależności (3) wynika, że przy znanym wymiarze charakterystycznym badanej próbki oraz znanej temperaturze otoczenia, pomiar temperatur w jednym punkcie próbki $T(x_1, \tau_1)$, $T(x_1, \tau_2)$ w interwale czasu $\tau_2 - \tau_1$ pozwala na jednoznaczne określenie wartości χ .

Metody laboratoryjne niestacjonarne są krótkotrwałe, dają możliwość większego wyboru źródeł ciepła, są proste pomiarowo. Do zalet metod niestacjonarnych należy także zaliczyć brak konieczności pomiaru strumienia cieplnego.

Zastosowanie metod niestacjonarnych jest ograniczone i wynika z trudności zachowania warunków granicznych w czasie pomiaru zgodnych z założonymi teo-

retycznie. Stąd niedokładność metod niestacjonarnych jest trudna do określenia [12, 13, 14, 15].

Podstawą teoretyczną metody terenowej (ruchowej) jest rozwiązanie równania przewodzenia ciepła w postaci [1, 3, 4]:

$$\Theta(w, \tau) = T(w, \tau) - T_p = \frac{Q}{4\pi c_p \rho \chi (\tau - \tau_o)} \exp \left[\frac{-w^2}{4\chi (\tau - \tau_o)} \right] \quad (4)$$

w którym: $w^2 = (x - x_o)^2 + (y - y_o)^2$, Q – ilość ciepła wydzielona przez chwilowe liniowe źródło ciepła umieszczone równoległe do osi z w punkcie o współrzędnych x_o , y_o w ośrodku jednorodnym i izotropowym w chwili czasu $\tau = \tau_o$ ($\tau > \tau_o$) [W].

Jeżeli źródło ciepła $Q = \text{const}$ działa w sposób ciągły, a oprócz tego ograniczymy się wyłącznie do części prostoliniowej charakterystyki $T'(w, \tau) = f(\tau)$, to można mierząc temperaturę $T'(w, \tau)$ w dwóch chwilach czasu τ_1 i τ_2 otrzymać na podstawie (4) zależność:

$$\lambda = \frac{4\pi [T'(w, \tau_2) - T'(w, \tau_1)]}{Q \ln \frac{\tau_2}{\tau_1}} \quad (5)$$

W przypadku praktycznej realizacji metody ruchowej stosuje się sondy pomiarowe o kształcie cylindra [5]. Błąd pomiaru spowodowany deformacją pola temperatury w pobliżu głowicy sondy i jej ostrza należy minimalizować poprzez odpowiedni dobór stosunku długości sondy do jej średnicy. Sonda powinna posiadać długość pięćdziesięciokrotnie większą od jej średnicy.

Pomiar rozpoczyna się z chwilą osiągnięcia przez układ sonda pomiarowa–badany grunt stanu ustalonego. Pomiar polega na rejestracji charakterystyki dynamicznej liniowego źródła ciepła (sonda) i na wyznaczeniu wg zależności (5) szukanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu.

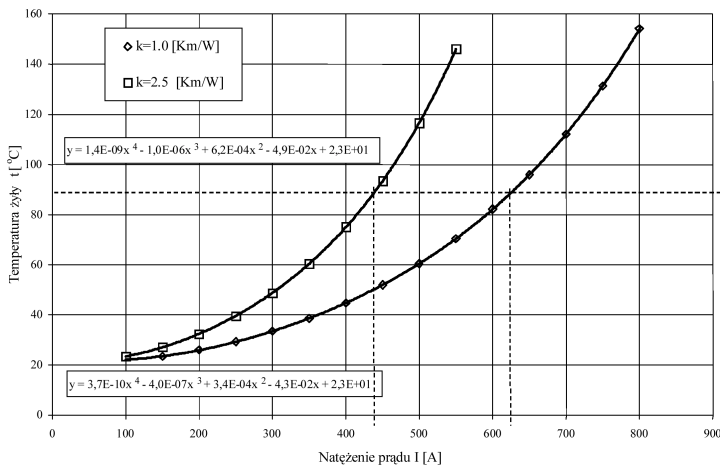
4. Obliczenia i wyniki obliczeń

Obliczenia wykonano dla kabla średniego napięcia XRUHAKXS $1 \times 240/50 \text{ mm}^2$ 12/20 kV, produkcji Bydgoskiej Fabryki Kabli. Maksymalna temperatura żyły kabla przy pracy długotrwałej wynosi w tym przypadku 90°C . Kabel ten może być eksploatowany zarówno w powietrzu jak i w gruncie.

Obliczenia wykonano dla skrajnych wartości oporu właściwego gruntu, jakie uwzględnia projekt PN. Wyniki obliczeń umieszczono na rys. 1

5. Uwagi i wnioski

Należy wyraźnie stwierdzić, że długotrwała dopuszczalna obciążalność kabli elektroenergetycznych zainstalowanych na stałe w gruncie jest determinowana przede wszystkim wartością cieplnego właściwego oporu gruntu. W przypadku rozważanego kabla przykładowo dla wartości $k = 2,5 \text{ Km/W}$ i $a = 1,0 \text{ m}$ cieplny właściwy opór gruntu stanowi aż 84,25% całości połączonych szeregowo oporów cieplnych poszczególnych współosiowych warstw kabla oraz samego gruntu.



Rys. 1. Zależność temperatury t [$^{\circ}\text{C}$] żyły kabla XRUHAKXS $1 \times 240/50\text{mm}^2$ 12/20 kV umieszczonego w gruncie przy odległości od osi kabla do powierzchni gruntu $a = 1,0\text{ m}$, od prądu obciążenia I [A], przy różnych wartościach cieplnego właściwego oporu gruntu k [Km/W]

Z przeprowadzonych obliczeń wynika oprócz tego, że przy maksymalnej temperaturze pracy kabla wynoszącej 90°C maksymalny prąd długotrwały dla kabla umieszczonego w gruncie charakteryzującym się wartościami $k = 1,0\text{ Km/W}$ wynosi $628,6\text{ A}$, a dla kabla umieszczonego w gruncie o $k = 2,5\text{ Km/W}$ wynosi $441,1\text{ A}$, przy tej samej wartości $a = 1,0\text{ m}$. Zatem 60% spadek wartości współczynnika przewodzenia gruntu z $\lambda = 1,0\text{ W/mK}$ co odpowiada $k = 1,0\text{ Km/W}$ (grunt wilgotny) do wartości $\lambda = 0,4\text{ W/mK}$ co odpowiada $k = 2,5\text{ Km/W}$ (grunt suchy) powoduje niekorzystne zmiany obniżenia wartości prądu o 29,8%.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika również, że taka sama zmiana wartości natężenia prądu powoduje daleko wyższy wzrost temperatury pracy długotrwałej kabla dla gruntów charakteryzujących się wyższą wartością cieplnego właściwego oporu gruntu. Biorąc pod uwagę powyższe należy stwierdzić, że w celu dokładnej oceny cieplnego właściwego oporu gruntu konieczne są pomiary współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. W tym przypadku należy preferować metodę terenową (ruchową).

Metody laboratoryjne wyznaczania parametrów termofizycznych gruntu wymagają ogrzewania badanej próbki do ściśle określonej temperatury, co ze względu na ograniczoną objętość próbki prowadzi nieuchronnie do utraty jej wilgotności. Oprócz tego podczas pobierania próbek do badań laboratoryjnych może zostać naruszona spójność próbki. Metody te pozwalają wprawdzie na otrzymanie zależności $\lambda = \lambda(T)$ w szerokim zakresie temperatury nie odzwierciedla to jednak rzeczywistych warunków terenowych, ponieważ współczynnik przewodzenia ciepła gruntu, musi być przyporządkowany w tym przypadku, do określonej wartości temperatury gruntu, jego wilgotności i gęstości, zawartości powietrza w gruncie oraz ilości i składu chemicznego ciał rozpuszczonych w wodzie gruntowej.

Literatura

- [1] Carslav M. S., Jaeger I. C.: *Conduction of Heat in Solids*, Oxword Ind. End. 1957
- [2] Kącki E.: *Równania różniczkowe cząstkowe w zagadnieniach fizyki i techniki*, Warszawa 1992, WNT
- [3] Tye R. P.: *Thermal Conductivity*, New York 1970, Academic Press
- [4] Wiśniewski S., Wiśniwski T.: *Wymiana ciepła*, Warszawa 1994, WNT
- [5] Włodarski R., Bucholc J.: *Linie kablowe bardzo wysokich napięć. Projektowanie i budowa*, Warszawa 1979, WNT
- [6] PN-76/E-05125: *Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe. Przepisy budowy*
- [7] Praca zbiorowa: *Poradnik inżyniera elektryka*, Warszawa 1997, WNT
- [8] PN-86/B-02480: *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*
- [9] Myślińska E.: *Laboratoryjne badania gruntów*, Warszawa 1998, Wydawnictwa naukowe PWN S.A.
- [10] Wołkowiński K.: *Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych*, Warszawa 1972, WNT
- [11] IEC Standard Publ.287: *Calculation of the continuous current rating of cables*
- [12] Kaczmarczyk A., Kolenda Z.: *Niestacjonarna metoda wyznaczania ciepła materiałów izolacyjnych*, Wrocław 1981, Inżynieria chemiczna i procesowa, PAN, str. 311–330
- [13] Kaczmarczyk A.: *Analiza błędów i założeń upraszczających metod niestacjonarnych wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła dla ciał stałych przy warunku brzegowym typu konwekcyjnego*, Wrocław 1983, Inżynieria chemiczna i procesowa, PAN, str. 629–650
- [14] Kaczmarczyk A.: *Dynamiczne metody wyznaczania parametrów termofizycznych materiałów ogniotrwałych izolacyjnych ze szczególnym uwzględnieniem analizy błędów i założeń upraszczających oraz zakresu stosowania tych metod*. Ostrava 1988, Materiały Konferencji Feuerfeste Materialien für moderne Stahl Prozesse
- [15] Kaczmarczyk A.: *Dopuszczalna długotrwała obciążalność kabli elektroenergetycznych a własności termofizyczne gruntu*. Kraków 1999, Kwartalnik AGH Elektrotechnika i Elektronika, t. 18, z. 1, str. 13–18

CURRENT-CARRYING CAPACITY OF UNDERGROUND POWER CABLES
AND THE THERMAL CONDUCTIVITY OF THE SOIL AND ITS MEASUREMENT

The main source of heat in electric power cables is current in the conductors. Next, the temperature growth in a cable conductor depends also on the thermal properties of the enviroment. Regarding cables put directly in the ground, the parameter determining the accuracy of calculations of accepted current is thermal resistance of the ground.

Some methods to determine the thermal diffusivity and the thermal conductivity of the ground are presented in the paper. The errors of these methods, their advantages and disadvantages are discussed with special care in relation to load capability of cables

Niniejsze opracowanie zostało zrealizowane w ramach badań własnych na AGH sponsorowanych przez KBN, nr umowy 10.10.120.110