



Andrzej R. KACZMARCZYK, Jan STRZAŁKA

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

## Możliwości zwiększenia obciążalności prądowej kabli elektroenergetycznych ułożonych w gruncie

**Streszczenie:** Obciążalność prądowa kabli ułożonych bezpośrednio w gruncie zależy głównie od oporu cieplnego otoczenia oraz od ich konstrukcji. W artykule przedstawiono analizę wpływu własności termofizycznych gruntu oraz rozkładu temperatury w gruncie na dopuszczalną obciążalność prądową kabli elektroenergetycznych.

**Abstract:** (Possibilities of the load capacity increase of power cables laid in the ground). Load capacity of electric cables put directly in the ground is mainly subjected to the ground thermal resistivity and cable construction. The dependence of the cables load capacity on thermo-physical properties and temperature field of the ground is presented in the paper.

**Słowa kluczowe:** obciążalność prądowa, kable elektroenergetyczne, własności termofizyczne gruntu

**Keywords:** load capacity of power cables, thermo-physical properties of the ground

### Wstęp

W ostatnich latach w większości krajów systematycznie wzrasta udział linii kablowych, głównie w zakresie niskich i średnich napięć [1]. Znaczącą rolę w tym zakresie odgrywają kable ułożone bezpośrednio w gruncie. Ważnym parametrem eksploatacyjnym kabli jest ich obciążalność prądowa długotrwała, która zależy od szeregu czynników, w tym od oporu cieplnego otoczenia kabla. W odniesieniu do kabli ułożonych bezpośrednio w gruncie istotne znaczenie odgrywają własności termofizyczne gruntu takie, jak gęstość, ciepło właściwe i współczynnik przewodzenia ciepła, a te z kolei zależą od składu chemicznego i wilgotności gruntu. Na wszystkie wymienione czynniki wpływa również temperatura gruntu, która zależy od dobowych i miesięcznych zmian temperatury powietrza atmosferycznego.

W artykule przedstawiono analizę wpływu własności termofizycznych gruntu oraz rozkładu temperatury w gruncie (wyznaczonego dla różnych rodzajów gruntu) na dopuszczalną obciążalność prądową kabli elektroenergetycznych.

### Warunki środowiskowe ułożenia linii kablowych

Źródłem ciepła w kablach elektroenergetycznych są: ciepło Joule'a, straty dielektryczne i histereza magnetyczna. Zwykle w obliczeniach uwzględnia się tylko ciepło Joule'a. Wymiana ciepła między żyłą kabla a jego powierzchnią odbywa się na zasadzie kondukcji. Propagacja ciepła od powierzchni kabla do jego bezpośredniego otoczenia (grunt) odbywa się również na zasadzie kondukcji. Pole cieplne wewnątrz i na zewnątrz kabla ułożonego w gruncie zależy od:

- własności elektrycznych materiałów konstrukcyjnych,
- własności cieplnych materiałów konstrukcyjnych kabla,
- wymiarów poszczególnych elementów kabla,
- sposobu ułożenia kabla,
- głębokości ułożenia kabla,
- wzajemnej odległości pomiędzy sąsiednimi kablami (wpływ pól temperatury),
- odległości kabla od ścian, przegród, osłon, itp.,
- własności gruntu.

Opis gruntów i ich podział jest znormalizowany [2].

Grunt należy traktować jako skomplikowany układ trójfazowy. Składa się on z fazy stałej, ciekłej i lotnej. Faza stała składa się z substancji organiczno-mineralnej, mineralnej i organicznej. Fazę ciekłą stanowią woda i roztwory gruntowe, a fazę lotną gazy i pary. Około 66 % gruntów w Polsce stanowią gleby biellicowe składające się z piasków, żwirów i glin [3,4]. Miarą zwartości gruntu jest jego gęstość, która waha się w granicach od ok. 1600kg/m<sup>3</sup> dla gleb torfowych do ok. 2700 kg/m<sup>3</sup> dla piasków gruboziarnistych [5,6]. Porowatość całkowita (bezwzględna) dla gruntów mineralnych i organicznych zawiera się w zakresie od 28 do 85 % [5].

Składniki gruntu przewodzące ciepło stanowią elementy połączone ze sobą w sposób szeregowy i równoległy. Są to elementy fazy stałej mostkowane wodą ( $\lambda_{H_2O}=0,57$  W/mK) i fazą gazową o niskiej wartości współczynnika przewodzenia ciepła ( $\lambda_{gaz}=0,02$  W/mK). W tym przypadku można więc definiować współczynnik przewodzenia ciepła gruntu jako zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła. Na jego wartość oraz na porowatość, gęstość i ciepło właściwe mają przede wszystkim wpływ stosunki wodne w gruncie.

Woda występuje w gruncie w różnej postaci [5]. Szczególne znaczenie ma woda usytuowana na nieprzepuszczalnych warstwach gruntu, której głębokość zalegania zmienia się wraz z temperaturą gruntu, sytuacją hydrometeorologiczną i przede wszystkim zależy od rodzaju gruntu. Warstwy gruntu znajdujące się nad wodą gruntową mają jednak możliwość nasycania się wilgocią wskutek kapilarnego wznoszenia się wody. Ma to istotne znaczenie ze względu na wzrost współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Gdy grunt jest całkowicie suchy, wartość współczynnika przewodzenia ciepła determinowana jest wyłącznie przez ilość i wielkość styku poszczególnych elementów fazy stałej. Przy małej wilgotności gruntu woda sytuuje się w postaci pierścieni dookoła punktów styku elementów fazy stałej, co znacznie poprawia jej zdolność przewodzenia. W miarę dalszego wzrostu wilgotności zdolność przewodzenia w dalszym ciągu rośnie, ale znacznie wolniej niż w początkowym okresie zwilżania.

Ogólnie można stwierdzić, że przy tej samej wilgotności i wymiarach uziarnienia gruntu jego współczynnik przewodzenia ciepła jest tym większy, im większa jest jego gęstość.

Ciepło właściwe gruntu zależy w znacznej mierze od jego porowatości i wilgotności, co ma uzasadnienie w tym,

że ciepło właściwe fazy stałej i ciekłej jest wielokrotnie większe od ciepła właściwego dla fazy gazowej.

Wreszcie wymienione wyżej parametry termiczne determinujące stan cieplny gruntu tj. współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe i gęstość są funkcją temperatury. Temperatura gruntu zależy od pulsacyjnego rytmu oddziaływania promieniowania słonecznego w dzień i ochładzania się powierzchni gruntu w nocy. Podobne oddziaływanie ma miejsce w cyklu lato-zima.

### Modelowanie warunków środowiskowych

W modelu matematycznym zagadnienia przyjęto, że grunt traktuje się jako ciało półnieskończone. Zagadnienie nieustalonego przewodzenia ciepła występuje w tym przypadku, gdy temperatura powierzchni gruntu podlega okresowym zmianom w czasie, które opisane są funkcją trygonometryczną. Równanie przewodzenia ciepła ma postać [7+11]:

$$(1) \quad \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = \frac{1}{\kappa} \frac{\delta T}{\delta \tau}$$

gdzie:  $T$  - temperatura [K],  $x$  - współrzędna kartezjańska [m],  $\kappa$  - współczynnik dyfuzyjności cieplnej [m<sup>2</sup>/s],  $\tau$  - czas [s], przy czym:

$$(2) \quad \kappa = \frac{\lambda}{c_p \rho}$$

gdzie:  $\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła [W/mK],  $c_p$  - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu [J/kgK],  $\rho$  - gęstość gruntu [kg/m<sup>3</sup>],

Warunki graniczne dla równania są następujące:

- warunek początkowy :

$$(3) \quad T = \bar{T} \quad \text{dla } \tau = 0, \quad 0 \leq x < \infty$$

gdzie:  $\bar{T}$  - średnia temperatura powierzchni gruntu [K], wyznaczana z zależności:  $\bar{T} = 0,5(T_{\max} + T_{\min})$ , w której  $T_{\max}$  - maksymalna temperatura powierzchni gruntu [K],  $T_{\min}$  - minimalna temperatura powierzchni gruntu [K].

- warunki brzegowe:

$$(4) \quad T = \bar{T} + \Delta T \cos(\omega \tau) \quad \text{dla } \tau > 0, \quad x = 0$$

gdzie:  $\Delta T$  - przyrost wartości zmiennej  $T$  [K],  $\omega$  - częstość zmian temperatury [1/s],

przy czym:  $\Delta T = 0,5(T_{\max} - T_{\min})$ ,  $\omega = 2\pi / \tau$

$$(5) \quad T = \bar{T} \quad \text{dla } \tau > 0, \quad x \rightarrow \infty$$

Rozwiązaniem równania (1) przy warunkach (3)-(5) jest funkcja, która po uwzględnieniu tylko części rzeczywistej ma postać [6-10]:

$$(6) \quad T(x, \tau) = \bar{T} + \Delta T \exp(-x\sqrt{\omega/2\kappa}) \cos(\omega\tau - x\sqrt{\omega/2\kappa})$$

gdzie:  $T(x, \tau)$  - zmiany temperatury gruntu na głębokości  $x$  w chwili czasu  $\tau$ . Zmiany temperatury gruntu na głębokości  $x$  od jego powierzchni wyznacza się na podstawie równania (6) przy założeniu:

$$(7) \quad \cos(\omega\tau - x\sqrt{\omega/2\kappa}) = 1$$

Zmiany te zawarte są w przedziale:

$$(8) \quad \bar{T} - \Delta T \exp(-x\sqrt{\omega/2\kappa}) \leq T_m(x, \tau) \leq \bar{T} + \Delta T \exp(-x\sqrt{\omega/2\kappa})$$

Przesunięcie fazowe zmian temperatury w gruncie na głębokości  $x$  od jego powierzchni zgodnie z wzorem (6) wynosi:

$$(9) \quad \phi = x\sqrt{\omega/2\kappa}$$

a odpowiadające temu przesunięciu opóźnienie fali temperaturowej w gruncie można wyrazić wzorem :

$$(10) \quad \Delta \tau = \frac{\phi}{\omega} = 0,5x\sqrt{\tau_z / \Pi \kappa}$$

gdzie:  $\tau_z$  - czas zmian temperatury [s].

Wartość współczynnika przewodzenia ciepła podana w literaturze przedmiotu dla warunków polskich może się wahać w granicach od  $\lambda = 0,28$  W/mK dla ziemi suchej – co odpowiada oporowi cieplnemu właściwemu gruntu  $k = 1/\lambda = 3,57$  Km/W, aż do wartości  $\lambda = 2,09$  W/mK dla piasku drobnego mokrego – co odpowiada  $k = 0,48$  Km/W [9, 12]. W normie IEC 60287 [13] dotyczącej obciążalności kabli, przyjęto wartość oporu cieplnego gruntu równą  $k = 2,5$  Km/W, z uwzględnieniem migracji wilgoci wokół kabla w obszarze izotermy +35 °C.

Obliczenia wykonano dla trzech różnych rodzajów gruntu, przy czym w przypadku gruntu piaszczystego uwzględniono dwa stany wilgotności. Własności termofizyczne gruntu w zależności od jego rodzaju zebrano w tabeli 1 [9, 12].

Tabela.1. Własności termofizyczne gruntu wg [9, 12].

Rodzaj gruntu	$T$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_r$ [J/kgK]	$\lambda$ [W/mK]	$\kappa \times 10^6$ [m <sup>2</sup> /s]
Piasek drobny suchy	0 ÷ 160	1520	800	0,30 ÷ 0,38	0,246 ÷ 0,312
Piasek drobny mokry	20	1650	1130	2,09	1,121
Ziemia gliniasta (42% wilgoci)	20	1960	1155	1,49	0,659
Ziemia sucha	25	1310	840	0,28	0,254

### Modelowanie obciążalności kabli elektroenergetycznych

Dla oceny rozkładu pola temperatury w profilu gruntu przyjęto, że:

- temperatura powierzchni gruntu w okresie lata w ciągu doby zmienia się w zakresie od +10°C do +35°C,
- temperatura powierzchni gruntu w okresie zimy w ciągu doby zmienia się w zakresie od -15°C do +5°C [8].

Przy minimalnej i maksymalnej temperaturze powierzchni gruntu amplituda zmian temperatury oraz średnia temperatura powierzchni gruntu wynoszą odpowiednio:

- w okresie lata  $\Delta T = 12,5^{\circ}\text{C}$ ,  $\bar{T} = 22,5^{\circ}\text{C}$ ,
- w okresie zimy  $\Delta T = 10,0^{\circ}\text{C}$ ,  $\bar{T} = -5,0^{\circ}\text{C}$ .

Wyniki obliczeń pola temperatury w okresie lata i zimy dla gruntu w postaci piasku mokrego przedstawiono w tabeli 2. Podobne obliczenia wykonano dla pozostałych wymienionych w tabeli 1 rodzajów gruntu.

Tabela.2. Wyniki obliczeń zmian temperatury na głębokości  $x$  [m] od powierzchni gruntu oraz opóźnień czasowych  $\Delta\tau$  [h: min] tych zmian dla gruntu w postaci piasku mokrego w okresie lata i zimy.

Głębokość gruntu $x$ [m]	Zmiany temperatury na głębokości $x$ [m] od powierzchni		Opóźnienie czasowe $\Delta\tau$ [h: min]
	w okresie lata	w okresie zimy	
0,0	10,0 ÷ 35,0	-15,0 ÷ +5,0	0 : 0
0,1	15,43 ÷ 29,57	-10,66 ÷ +0,66	2 : 10
0,2	18,50 ÷ 26,50	-8,20 ÷ -1,80	4 : 21
0,3	20,24 ÷ 24,76	-6,80 ÷ -3,20	6 : 31
0,4	21,22 ÷ 23,78	-6,02 ÷ -3,98	8 : 42
0,5	21,78 ÷ 23,22	-5,60 ÷ -4,40	10 : 53
0,6	22,09 ÷ 22,91	-5,33 ÷ -4,67	13 : 03
0,7	22,27 ÷ 22,73	-5,19 ÷ -4,81	15 : 13
0,8	22,37 ÷ 22,63	-5,10 ÷ -4,90	17 : 24
0,9	22,43 ÷ 22,57	-5,06 ÷ -4,94	19 : 35
1,0	22,46 ÷ 22,54	-5,03 ÷ -4,97	21 : 45
1,1	22,44 ÷ 22,52	-5,02 ÷ -4,98	23 : 56
1,2	22,49 ÷ 22,51	-5,01 ÷ -4,99	26 : 06
1,3	22,49 ÷ 22,51	-5,01 ÷ -4,99	28 : 17
1,4	22,50 ÷ 22,50	-5,00 ÷ -5,00	30 : 28

Z analizy wyników obliczeń rozkładu pola temperatury w gruncie o postaci mokrego piasku (opór cieplny  $k = 1/\lambda = 0,5 \text{ Km/W}$ ) wynika, że wahania temperatury zachodzące na powierzchni gruntu są szybko tłumione i to bez względu na porę roku. Wahania te wewnątrz gruntu zachodzą z ustaloną częstotliwością równą częstotliwości zmian na powierzchni półprzestrzeni, czyli na powierzchni gruntu, co wynika z analizy wzoru (5). W rozpatrywanym przypadku rozrzut temperatury zarówno w lecie jak i w zimie zanika na głębokości wynoszącej 1,4 m. Należy zwrócić uwagę na fakt, że opóźnienie czasowe dotyczące zaniku zmian temperatury w profilu gruntu jest duże i wynosi 30 godz. i 28 min. w stosunku do zmian temperatury na powierzchni.

Z obliczeń tych wynika ponadto, że dla kabli energetycznych usytuowanych w piaszczystym gruncie o dużej wilgotności i eksploatowanych na głębokości 1,0 m od jego powierzchni wystąpi niewielki rozrzut temperatury wynoszą-

cy w okresie lata  $22,46^{\circ}\text{C} \leq T[1,0 ; (21;45)] \leq 22,54^{\circ}\text{C}$ . Z punktu widzenia wymiany ciepła między powierzchnią kabla a gruntem, co ma miejsce na zasadzie kondukcji ciepła, jest to najbardziej niekorzystny przypadek minimalizujący obciążalność prądową kabla. Zatem dla kabli o dowolnej konstrukcji ułożonych na głębokości 1,0 m od powierzchni gruntu piaszczystego przy zmianach temperatury powierzchni gruntu w ciągu doby od  $10^{\circ}\text{C}$  do  $35^{\circ}\text{C}$ , obciążalność prądowa tych kabli jest determinowana temperaturą gruntu na tej głębokości wynoszącą  $22,5^{\circ}\text{C}$ . Oczywiście korzystniejsze warunki dla wzrostu obciążalności prądowej kabli istnieją w okresie zimy. W rozpatrywanym wyżej przypadku na głębokości 1,0 m od powierzchni gruntu wystąpi rozrzut temperatury wynoszący  $-5,03^{\circ}\text{C} \leq T[1,0 ; (21 ; 45)] \leq -4,97^{\circ}\text{C}$ .

W przypadku piasku drobnego suchego ( $k = 1/\lambda = 2,6 \text{ Km/W} \div 3,3 \text{ Km/W}$ ) zmiany temperatury zanikają w okresie lata na głębokości 0,8 m, ( $\Delta\tau = 32 \text{ h } 59 \text{ min}$ ), a w okresie zimy na głębokości gruntu 0,7 m ( $\Delta\tau = 28 \text{ h } 52 \text{ min}$ ). Oznacza to, że dla kabli umieszczonych na głębokości 1 m temperatura gruntu jest stała.

Należy wyraźnie podkreślić fakt, że dla ziemi suchej ( $k = 1/\lambda = 3,6 \text{ Km/W}$ ), zmiany temperatury zanikają zarówno w okresie lata, jak również zimy na głębokości 0,7 m ( $\Delta\tau = 31 \text{ h } 59 \text{ min}$ ).

W przypadku ostatniego z rozważanych rodzajów gruntu tj. gliny, zmiany temperatury zanikają w okresie lata na głębokości 1,1 m ( $\Delta\tau = 31 \text{ h } 12 \text{ min}$ ), a w okresie zimy na głębokości gruntu 1,0 m ( $\Delta\tau = 28 \text{ h } 08 \text{ min}$ ).

Z przeprowadzonej analizy wynika, że dla niektórych rodzajów gruntów (piasek i ziemia sucha) zmiany temperatury zanikają powyżej głębokości 1,0 m w okresie lata i wówczas średnia temperatura powierzchni gruntu jest wartością temperatury otoczenia, dla której należy obliczać obciążalność prądową kabli energetycznych. Dla pozostałych rozważanych rodzajów gruntów rozrzut wartości temperatury w porównaniu do przyjętej do obliczeń średniej temperatury powierzchni gruntu jest niewielki.

Szczególnie istotna jest znajomość pola temperatury w różnych rodzajach gruntu w okresie zimy. Na jej podstawie można prognozować o wzroście obciążalności prądowej kabli.

Należy zauważyć, że zgodnie z Polską Normą [14] należy przyjmować do obliczeń średnią wartość oporu cieplnego gruntu wynoszącą  $0,8 \text{ Km/W}$  i średnią wartość temperatury gruntu równą  $15,0^{\circ}\text{C}$ . Dla kabla tego samego typu usytuowanego w gruncie na tej samej głębokości istnieją jednak duże różnice w obciążalności prądowej w zależności od rodzaju gruntu. I tak przykładowo, dla kabla typu XRUHAKXS1×240/50 mm<sup>2</sup> 12/20 kV umieszczonego w gruncie na głębokości 1,0 m od jego powierzchni obciążalność prądowa przy oporze cieplnym gruntu  $k = 2,5 \text{ Km/W}$  (grunt suchy) wynosi  $I = 441,1 \text{ A}$ , a przy  $k = 1,0 \text{ Km/W}$  (grunt wilgotny) wynosi  $I = 628,6 \text{ A}$  [15]. Obliczone wartości obciążalności prądowej odnoszą się do temperatury odpowiadającej maksymalnej temperaturze pracy długotrwałej podanej przez producenta wynoszącej  $90^{\circ}\text{C}$ .

## Podsumowanie

Biorąc pod uwagę powyższe dane i obliczenia, należy stwierdzić, że prognozowanie obciążalności prądowej kabli energetycznych wymaga dokładnego rozpoznania rodzaju gruntu, rozpoznania poziomu wód gruntowych (zjawisko migracji wody), badania własności termofizycznych gruntu oraz obliczeń termiki gruntu. Literatura przedmiotu podaje, że w stanie ustalonym cieplnie 50÷70 % całkowitego przyrostu temperatury żyły kabla jest wywołane przez opór

ciepny gruntu [6]. Sposoby pomiaru współczynnika dyfuzyjności ciepłej i współczynnika przewodzenia gruntu przedstawiono w pracy [16].

Na podstawie wyznaczonych rozkładów temperatury w gruncie wynika, że na głębokości około 1 m odpowiadającej głębokości ułożenia kabli ŚN następuje ustalenie temperatury gruntu, która dla okresu letniego osiąga około 22,5°C a dla okresu zimowego około -5°C. Daje to w efekcie około 20 % powiększenia obciążalności prądowej kabli w okresie zimowym, w porównaniu z obciążalnością prądową wyznaczoną dla okresu letniego.

#### LITERATURA

- [1] Rakowska A.: Rozwój kabli wysokiego napięcia oraz doświadczenia eksploatacyjne. Mat. IX Sympozjum EUI'2003, *Przegląd Elektrotechniczny* – Konferencje vol. 1, 1/2003, str. 178-181.
- [2] PN-86/ B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- [3] Kowalik P., Ochrona środowiska glebowego, PWN, Warszawa, 2001.
- [4] Myślińska E., Laboratoryjne badania gruntów, PWN, Warszawa, 1998.
- [5] Wołkowiński K.: Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych, WNT, Warszawa, 1972.
- [6] Włodarski R., Bucholc J., Linie kablowe bardzo wysokich napięć, WNT, Warszawa, 1979.
- [7] Carslaw M. S., Jaeger I.C., *Conduction of Heat in Solids. Oxford Ind. Edn.* (1957).
- [8] Taler J., Duda P. : Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła, WNT, Warszawa, 2003.
- [9] Wiśniewski S., Wiśniewski T., Wymiana ciepła, WNT, Warszawa, 1994.
- [10] Bayazitoglu Y. , Özisk M. N.: *Elements of Heat Transfer, Mc Graw-Hill Book Company*, New York, 1988.
- [11] Staniszewski B.: Wymiana ciepła, PWN, Warszawa, 1980.
- [12] Kostowski E., Górniak H., Szymczyk J., Sikora J., Zrębik A.: Zbiór zadań z przepływu ciepła, *Wyd. Pol. Śląskiej Gliwice*, 1999).
- [13] IEC 60287 Calculation of the continuous current rating of cables (100% load factor).
- [14] Praca zbiorowa: Poradnik inżyniera elektryka. T.3 wyd.3, WNT, Warszawa, 2005.
- [15] Kaczmarczyk A., Modelowanie przebiegów ciepłych w kablach elektroenergetycznych. *Sprawozdanie z badań własnych 1999*, Zakład Elektroenergetyki AGH, Kraków
- [16] Kaczmarczyk A.: Problemy wyznaczania długotrwałej obciążalności kabli elektroenergetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, (1997), nr 6, 153-156.

**Autorzy:** dr inż. Andrzej Kaczmarczyk, E-mail: [akiee@agh.edu.pl](mailto:akiee@agh.edu.pl)  
dr inż. Jan Strzałka, E-mail: [janstrz@agh.edu.pl](mailto:janstrz@agh.edu.pl); Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki