

WPLYW WARUNKÓW OTOCZENIA NA OBCIĄŻALNOŚĆ PRĄDOWĄ DŁUGOTRWAŁĄ KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH

Stanisław CZAPP¹, Seweryn SZULTKA², Agata DZIONK³, Kornel BOROWSKI⁴

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

- | | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| 1. tel.: 58 347-13-98 | e-mail: stanislaw.czapp@pg.gda.pl |
| 2. tel.: 58 347-15-81 | e-mail: seweryn.szultka@pg.gda.pl |
| 3. tel.: 58 347-15-81 | e-mail: agata.dzionk@pg.gda.pl |
| 4. tel.: 58 347-26-63 | e-mail: kornel.borowski@pg.gda.pl |

Streszczenie: Obciążalność prądowa długotrwała przewodów i kabli elektroenergetycznych zależy m.in. od sposobu ich ułożenia i warunków otoczenia. Kabel elektroenergetyczny ułożony w zmiennych warunkach, np. ziemia – woda – powietrze ma obciążalność prądową długotrwałą wynikającą z najgorszych warunków otoczenia pod względem oddawania ciepła. W artykule zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych dla linii kablowej niskiego napięcia umieszczonej w zmiennych warunkach gruntowych oraz w zmiennych warunkach w powietrzu, z uwzględnieniem polskich warunków klimatycznych. Opracowane modele i wyniki mogą być wykorzystane do analizy i poprawy obciążalności prądowej długotrwałej linii kablowych oraz stanowić uzupełnienie aktualnych norm.

Słowa kluczowe: kable elektroenergetyczne, obciążalność prądowa długotrwała, wymiana ciepła.

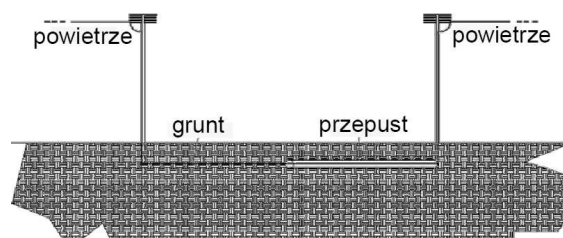
1. WSTĘP

Obciążalność prądowa długotrwała I_{dd} przewodów i kabli elektroenergetycznych, to największa wartość skuteczna prądu płynącego długotrwale przez żyły robocze, nie wywołującego w nich przekroczenia temperatury dopuszczalnej długotrwale [1]. Na obciążalność prądową długotrwałą przewodów i kabli elektroenergetycznych ma wpływ ich budowa, sposób ułożenia oraz warunki otoczenia.

Sposób ułożenia kabli oraz warunki otoczenia determinują rodzaj i efektywność mechanizmu przenoszenia ciepła pomiędzy żyłą roboczą kabla a środowiskiem zewnętrznym. W praktyce instalacyjnej kabel elektroenergetyczny może być ułożony w zmiennych warunkach (np. powietrze – ziemia – przepust – woda), co zostało przedstawione na rysunku 1.

Zgodnie z aktualną normą PN-HD 60364-5-52:2011 [1] odnoszącą się do przewodów i kabli niskiego napięcia, obciążalność prądowa długotrwała linii kablowej jest określona obciążalnością prądową długotrwałą szeregowego odcinka tej linii kablowej, dla którego opór przenoszenia (przewodzenia oraz przyjmowania) ciepła jest największy. W związku z przedstawionym sposobem określania obciążalności prądowej długotrwałej kabli elektroenergetycznych istnieje potrzeba analizy wpływu otoczenia kabli elektroenergetycznych na ich obciążalność prądową długotrwałą. Możliwe zwiększenie tej obciążalności pozwala bowiem na poprawę wskaźników

technicznych i ekonomicznych odnoszących się do sieci i instalacji elektroenergetycznych.



Rys. 1. Przykład zmiennych warunków otoczenia kabli elektroenergetycznych

W artykule przedstawiono wyniki wielokryterialnej analizy symulacyjnej obciążalności prądowej długotrwałej linii kablowej o trzech żyłach roboczych wykonanej kablami YKY 0,6/1kV 35 mm² (kable jednożyłowe). Porównano obciążalność linii kablowej ułożonej w ziemi z obciążalnością przy ułożeniu w powietrzu.

2. ZAŁOŻENIA DO BADAŃ SYMULACYJNYCH

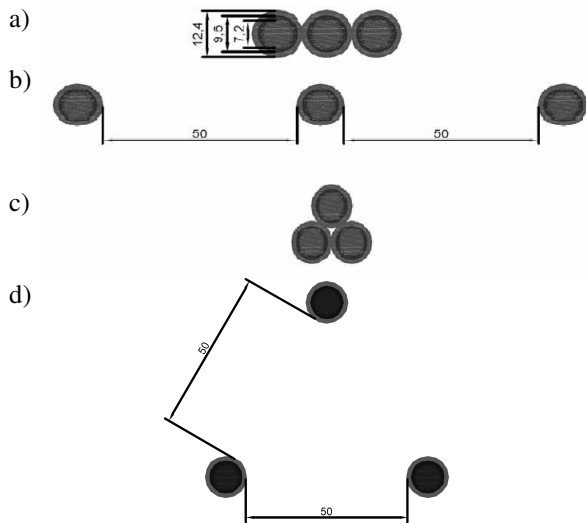
2.1. Wprowadzenie

Rozważania nad wpływem warunków otoczenia na obciążalność prądową długotrwałą kabli elektroenergetycznych prowadzone są od początku XX wieku. Większość literatury poświęconej tej tematyce odnosi się do kabli wysokiego napięcia, głównie pograżonych w ziemi [2–5]. Jednakże ciągły wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną na poziomie niskiego napięcia (w szczególności przez zakłady produkcyjne i budownictwo) skłonił do wykonania analizy obciążalności prądowej na przykładzie kabli elektroenergetycznych niskiego napięcia YKY. Kable o żyłach miedzianych, izolacji polwinitowej (Y) i powłoce polwinitowej (Y) są podstawowymi kablami stosowanymi w sieciach i instalacjach niskiego napięcia.

Obliczenia zostały przeprowadzone w oparciu o metodę Neher'a-McGrath'a [6] zaimplementowaną w programie DIGSILENT PowerFactory 2016. Metoda Neher'a-McGrath'a określająca obciążalność prądową kabli jest metodą analityczno-doświadczalną i stanowi podstawę dla opracowywania norm IEEE oraz IEC [7].

2.2. Badania linii kablowej umieszczonej w ziemi

Badania zostały wykonane dla czterech różnych geometrii układu, które przedstawiono na rysunku 2. W badaniach pominięto żyłą ochronną PE.



Rys. 2. Sposoby rozmieszczenia kabli: a) kable ułożone płasko, stykające się, b) kable ułożone płasko oddalone od siebie o 50 mm, c) kable ułożone trójkątnie, stykające się, d) kable ułożone trójkątnie oddalone od siebie o 50 mm

Otoczenie linii kablowej zostało określone zmiennymi parametrami gruntu. Parametry środowiska otaczającego linię kablową przedstawiono w tabelicy 1.

Tabela 1. Wykaz parametrów przyjętych do badań – kable ułożone w ziemi

Parametr	Wartość
Temperatura gruntu	20 °C
Temperatura powietrza	30 °C
Rezystywność cieplna gruntu (ρ_z)	1÷3 K·m/W
Głębokość pograżenia kabli (h)	0,4÷0,8 m
Współczynnik mocy	0,8
Średnia dyfuzyjność cieplna gruntu (a_d)	1,85 mm ² /s
Temperatura graniczna dopuszczalna długotrwałe (τ_{dd}) dla PVC	70 °C

Przyjęte temperatury obliczeniowe gruntu, jak i powietrza są zgodne z wytycznymi normy PN-HD 60364-5-52:2011 [1]. W polskich warunkach klimatycznych dotyczą sezonu wiosenno-letniego. Wartości rezystywności cieplnej gruntu ρ_z wynoszą średnio od 1 K·m/W dla gruntów mokrych, do 3 K·m/W dla gruntów suchych [8]. Średnia dyfuzyjność cieplna gruntu a_d to parametr cieplny gruntu, od którego zależy jego odpowiedź na wytworzone straty mocy cieplnej kabla elektroenergetycznego. Dyfuzyjność cieplna gruntu określa zdolność gruntu do wyrównania temperatury w całej jego objętości [9] – wartość tego parametru jest szczególnie ważna podczas nieustalonego przewodzenia ciepła w gruncie. Przewodzenie ciepła jako jeden z mechanizmów wymiany ciepła, jest dominujące dla kabli elektroenergetycznych ułożonych w ziemi. Dla takiego przypadku konwekcyjna wymiana ciepła oraz promieniowanie nie mają większego wpływu i zazwyczaj nie są rozpatrywane.

Empiryczne prawo Fouriera określone przez (1) wyraża ilość ciepła przekazywanego na drodze przewodzenia w ciałach stałych

$$\vec{q} = -\lambda \nabla t \quad (1)$$

gdzie: \vec{q} – wektor gęstości strumienia ciepła W/m², λ – przewodność cieplna materiału W/mK, ∇t – przestrzenny gradient temperatury K/m.

W układzie przestrzennym gradient temperatury ma trzy składowe: $\partial t/\partial h$, $\partial t/\partial y$, $\partial t/\partial z$. Zakładając ustalony strumień ciepła przewodzonego wzdłuż kabli ($\partial t/\partial z=0$), w badaniach przeanalizowano wpływ głębokości pograżenia kabli w gruncie h oraz położenia ich środków geometrycznych względem siebie y , co jest przedstawione na rysunku 2. Norma N SEP-E-004 [10] dotycząca projektowania i budowy linii kablowych uwzględnia różne głębokości pograżenia kabli w zależności od ich lokalizacji. Ponadto ta sama norma warunkuje najmniejsze odległości pomiędzy kablami w zależności od sposobu ułożenia kabli. Norma PN-HD 60364-5-52:2011 [1] podaje obciążalność prądową długotrwałą kabli tylko dla głębokości pograżenia $h = 70$ cm. W związku z powyższym w badaniach uwzględniono zmienną głębokość oraz odległość pomiędzy kablami.

2.3. Badania linii kablowej umieszczonej w powietrzu

W przypadku badania obciążalności prądowej długotrwałej linii kablowej umieszczonej w powietrzu, model rozmieszczenia kabli przedstawia rysunek 2c. Tabela 2 zawiera informacje o parametrach powietrza przyjętych do badań.

Tabela 2. Wykaz parametrów przyjętych do badań – kable ułożone w powietrzu

Parametr	Wartość
Temperatura powietrza	30 °C
Prędkość wiatru (v_w)	0÷10 m/s
Współczynnik mocy	0,8
Temperatura graniczna dopuszczalna długotrwałe (τ_{dd}) dla PVC	70 °C

W przypadku kabli elektroenergetycznych umieszczonych w powietrzu na efektywność wymiany ciepła pomiędzy żyłą roboczą kabla a otoczeniem najbardziej wpływa konwekcja. Konwekcyjna wymiana ciepła określona prawem Newtona przedstawia się następującą zależnością

$$\dot{q} = \alpha \Delta t \quad (2)$$

gdzie: \dot{q} – konwekcyjny strumień ciepła W/m², α – konwekcyjny współczynnik przejmowania ciepła W/m²K, Δt – różnica temperatur pomiędzy powierzchnią kabla a powietrzem, w K.

Z zależności (2) wynika, że jednym ze sposobów zwiększenia jednostkowej mocy cieplnej oddawanej przez kabel elektroenergetyczny jest zwiększenie konwekcyjnego współczynnika przejmowania ciepła α . Cel ten można osiągnąć poprzez zwiększenie prędkości przepływu powietrza omywającego linię kablową. Norma PN-HD 60364-5-52:2011 [1] nie uwzględnia wpływu prędkości powietrza na obciążalność prądową długotrwałą przewodów i kabli. W badaniach uwzględniono wpływ prędkości wiatru na efektywność wymiany ciepła w linii kablowej umieszczonej w powietrzu.

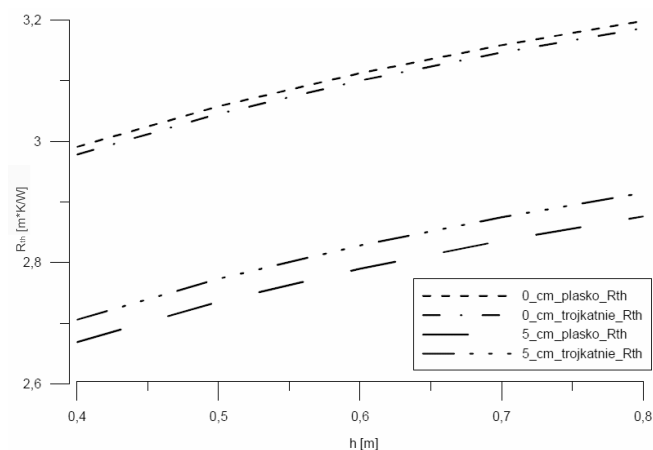
3. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

3.1. Wprowadzenie

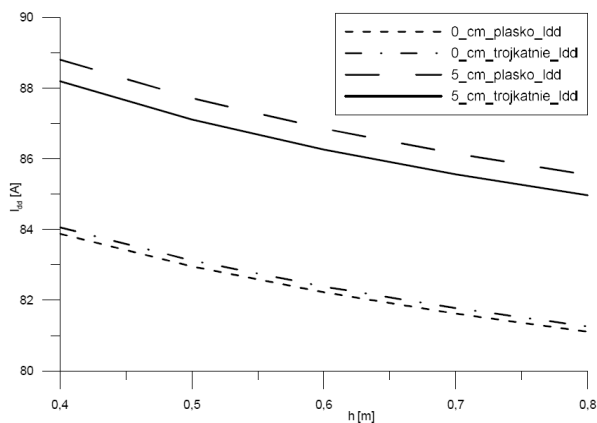
Wyniki badań symulacyjnych zostały przedstawione w dwóch wariantach. Pierwszy dotyczy badań obciążalności prądowej długotrwałej linii kablowej umieszczonej w ziemi. Drugi odnosi się do linii kablowej umieszczonej w powietrzu.

3.2. Wyniki badań linii kablowej umieszczonej w ziemi

Na rysunku 3 przedstawiono zależności oporu cieplnego pomiędzy żyłą kabla a ziemią od głębokości jego pograżenia. Z zależności tych wynika, że wraz ze wzrostem głębokości h ułożenia kabli w ziemi, wartość oporu przenoszenia ciepła R_{th} wzrasta. Tym samym maleje obciążalność prądowa długotrwała I_{dd} , co przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Zależność oporu przenoszenia ciepła R_{th} pomiędzy żyłą roboczą kabla a gruntem od głębokości pograżenia h kabli, dla różnych sposobów ich ułożenia

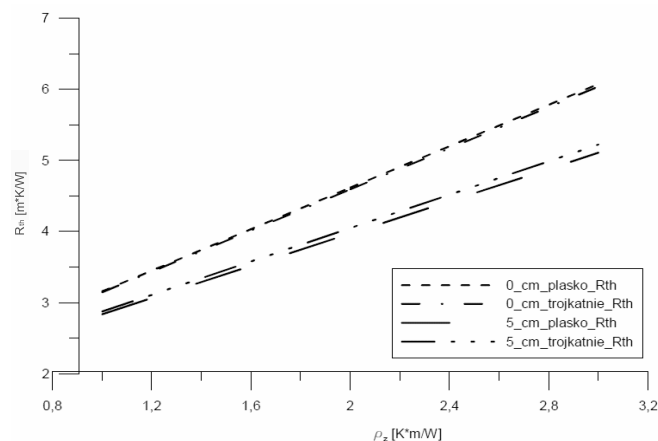


Rys. 4. Zależność obciążalności prądowej długotrwałej I_{dd} od głębokości pograżenia h kabli, dla różnych sposobów ich ułożenia

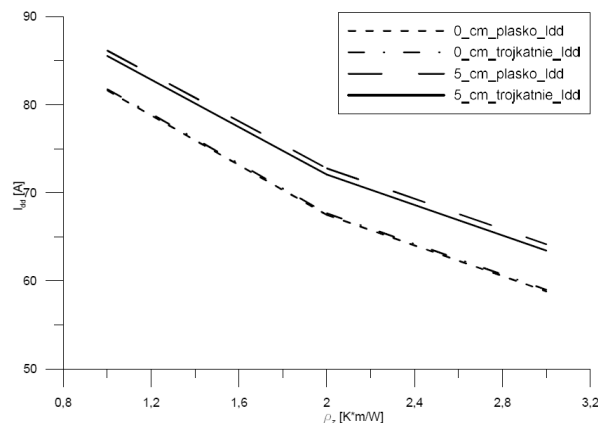
Dopuszczalne przez normę N SEP-E-004 [10] oddalenie od siebie kabli zwiększa obciążalność I_{dd} w porównaniu z kablami stykającymi się – w przypadku oddalenia o 5 cm następuje wzrost obciążalności prądowej o ok. 6%.

Na rysunku 5 przedstawiono wpływ rezystywności cieplej gruntu ρ_z na opór przenoszenia ciepła R_{th} pomiędzy kablem a ziemią. Widać znaczny wpływ ρ_z na opór przenoszenia ciepła. Pomiedzy skrajnymi wartościami rezystywności cieplej gruntu ρ_z , wartości oporu cieplnego R_{th} zmieniają się blisko dwukrotnie.

Z wykresu na rysunku 6 wynika wniosek podobny do tego z rysunku 4 – oddalenie od siebie kabli zwiększa obciążalność I_{dd} w porównaniu z kablami stykającymi się. Wzrost rezystywności cieplej gruntu ρ_z powoduje natomiast zmniejszanie się obciążalności prądowej długotrwałej I_{dd} .



Rys. 5. Zależność oporu przenoszenia ciepła R_{th} pomiędzy żyłą roboczą kabla a ziemią od rezystywności cieplej gruntu ρ_z , dla różnych sposobów ułożenia kabli

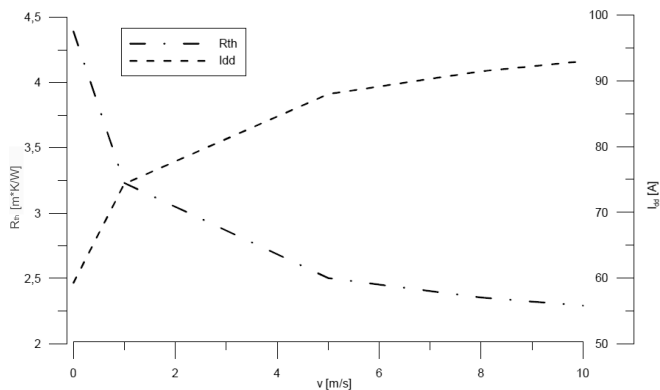


Rys. 6. Zależność obciążalności prądowej długotrwałej I_{dd} kabli od rezystywności cieplej gruntu ρ_z , dla różnych sposobów ułożenia kabli

3.3. Wyniki badań linii kablowej umieszczonej w powietrzu

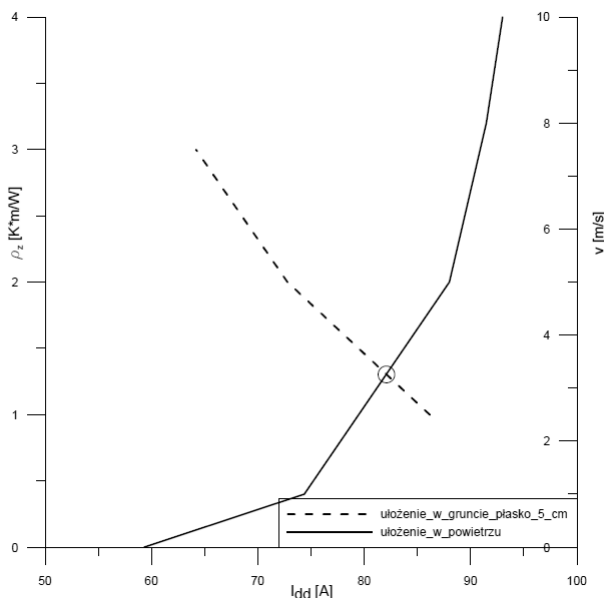
Wzrost prędkości wiatru może powodować znaczne zwiększenie obciążalności prądowej długotrwałej linii kablowej, co przedstawia rysunek 7. Zwiększenie przepływu powietrza jako nośnika ciepła powoduje proporcjonalny wzrost wartości liczby Nusselta, co skutkuje zwiększeniem konwekcyjnego współczynnika przejmowania ciepła α i zmniejszeniem oporu cieplnego R_{th} . W badaniach przyjęto poziomy, prostopadły do linii kablowej kierunek wiatru. Uwzględniono także wpływ natężenia promieniowania słonecznego (przyjęta średnia wartość dla polskich warunków to 450 W/m^2).

Rysunek 8 przedstawia porównanie obciążalności prądowej długotrwałej kabli umieszczonych w ziemi z obciążalnością długotrwałą kabli ułożonych w powietrzu. Punkt przecięcia krzywych na rysunku 8 wskazuje na taką samą (pod względem ilościowym) intensywność wymiany ciepła w kablach dla obu przypadków ułożenia. Przyjęta wartość rezystywności cieplej gruntu to $\rho_z = 1,5 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$.



Rys. 7. Zależność obciążalności prądowej długotrwałej I_{dd} oraz oporu przenoszenia ciepła R_{th} kabli od prędkości wiatru v

Aby obie obciążalności były sobie równe, prędkość powietrza omywającego kable powinna wynosić około 3 m/s. Celowe jest zatem poszukiwanie możliwości intensyfikacji konwekcyjnej wymiany ciepła dla kabli częściowo ułożonych w powietrzu.



Rys. 8. Porównanie obciążalności prądowej długotrwałej I_{dd} kabli dla dwóch wybranych sposobów ich ułożenia

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Opracowane modele i przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły, że:

- wraz ze zwiększeniem głębokości pograżenia kabli w ziemi, wartość ich obciążalności prądowej długotrwałej zmniejsza się,

- oddalenie kabli elektroenergetycznych od siebie pozwala na zwiększenie obciążalności prądowej w porównaniu do kabli stykających się,
- wzrost rezystywności cieplnej gruntu wpływa na zmniejszenie obciążalności prądowej długotrwałej kabli,
- w przypadku kabli ułożonych w powietrzu, wraz ze wzrostem prędkości wiatru znacząco zwiększa się ich obciążalność prądowa długotrwała.

Zwiększenie obciążalności prądowej długotrwałej kabli poprzez intensyfikację konwekcyjnej wymiany ciepła przy pomocy ruchu powietrza stanowi kierunek dalszych badań. Dalsze badania będą prowadzone z użyciem programów komputerowych umożliwiających modelowanie pola temperatur i ciśnień.

5. BIBLIOGRAFIA

- PN-HD 60364-5-52:2011 (wersja angielska) Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 5-52: Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego – Przewodowanie.
- Millar R. J.: A comprehensive approach to real time power cable temperature prediction and rating in thermally unstable environments, Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, Finland, 2006.
- Swaffield D. J., Lewin P. L., Sutton S. J.: Methods for rating directly buried high voltage cable circuits, IET Gener. Transm. Distrib., 2008, vol. 2, no. 3, s. 393–401.
- Liang Y., Zhao J., Du Y., Zhang J.: An optimal heat line simulation method to calculate the steady-stage temperature and ampacity of buried cables, Przegląd Elektrotechniczny, 2012, vol. 88, nr 3b, s. 156–160.
- Youbin F., Shaoxin M., Fugui M., Li Z., Geng L., Yungang F., Yunjie Z., Yu Li: Calculation of current rating for medium and low voltage XLPE cable in clustered layout, Annual Report Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2008, s. 122–124.
- Neher J. H., McGrath M. C.: The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems, AIEE Transactions Part III – Power Apparatus and Systems, vol.76, October 1957, s. 752–772.
- de Leon F.: Calculation of underground cable ampacity, presented at The Electricity Forum, 2005.
- Lindström L.: Evaluating impact on ampacity according to IEC-60287 regarding thermally unfavourable placement of power cables, Masters' Degree Project, KTH Electrical Engineering, Sweden, 2011.
- Usowicz B.: Szacowanie cieplnych właściwości gleby, Acta Agrophysica, 2002, vol. 72, s. 135–165.
- N-SEP-E-004 Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe. Projektowanie i budowa.

THE IMPACT OF THE AMBIENT CONDITIONS ON CURRENT-CARRYING CAPACITY OF POWER CABLES

This paper presents results of analysis of the current-carrying capacity of power cables installed in the ground and in the air. Parameters of ground and air are variable. The results show that reducing the depth of laying of the power cable and increasing the distance between cables have an effect on increasing the current-carrying capacity. Additionally, in this work the impact of wind speed on the heat transfer in the overhead cable line is shown. Increase in wind speed may cause an increase in current-carrying capacity of cables.

Keywords: power cables, current-carrying capacity, heat transfer.