ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1971

Seria: ELEKTRYKA 29 Nr kol. 297

ALEKSANDER SZENDZIELORZ
Katedra Elektroenergetyki

# ANALIZA WPŁYWU NASŁONECZNIENIA NA OBCIĄŻALNOŚĆ PRĄDOWĄ KABLA W ZIEMI

Streszczenie. Na podstawie pomiarów rozkładu temperatury przeprowadzonych w ziemi wokół kabla pod obciążeniem, stwierdzono, że jest on zmienny w ciągu roku, nawet wtedy gdy prąd o stałym natężeniu płynie przez żyły kabla przez czas długi rzędu kilkudziesięciu dni. Zmiany pola temperaturowego zależą bowiem od warunków atmosferycznych poprzedzających pomiar i są różne dla różnych pór roku. W pracy podjęto próbę matematycznego określenia rozkładu wypadkowego pola cieplnego wokół kabla elektroenergetycznego zakopanego bezpośrednio w ziemi i wpływu zmian tego pola na dopuszczalną obciążalność prądową długotrwałą kabla.

## Wstęp

Na powierzchnię ziemi oddziaływuje ciepło słoneczne, zależne od warunków atmosferycznych i wywołuje w ziemi, do głębokości 6 - 16 m, zmienne pole temperaturowe. Dobowe i roczne zmiany temperatury zachodzące na powierzchni ziemi przenikają w postaci fali cieplnej w głąb ziemi, przy czym przebieg ten posiada charakter tłumiony z powodu dyfuzyjności cieplnej właściwej ziemi.

Jeżeli ponadto powierzchnia odcinka kabla o długości jednostkowej, obciążonego prądowo, wydziela w jednostce czasu stałą ilość ciepła $q^x$ (przez żyły kabla płynie prąd o stałym natężeniu), to w bryle ziemi otaczającej kabel powstanie pole temperaturowe zmienne w czasie, będące wypadkową działania obydwu strumieni cieplnych: słonecznego (pomijając strumień ciepła z wnętrza ziemi) i kablowego

$$\vartheta_{\Sigma} = f(x,y,t) \tag{1}$$

Rozpatrując dla uproszczenia grunt izotropowy, o własnościach

$$\lambda \neq f(\vartheta) \quad i \quad c \neq f(\vartheta) \tag{2}$$

można rozłożyć teoretycznie wypadkowe pole temperaturowe na dwa, pochodzące od ciepła słońca i od ciepła kabla.
Równanie przewodzenia ciepła kabla w bryle ziemi otaczającej, w współrzędnych walcowych, ma postać (początek układu współrzędnych pokrywa się z osią kabla)

$$\frac{\partial \vartheta_k}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \left(\frac{\partial^2 \vartheta_k}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \vartheta_k}{\partial r}\right) \tag{3}$$

przy założeniach dodatkowych:

$$\frac{\partial^2 \vartheta_k}{\partial \varphi^2} = 0 \quad \text{oraz} \quad \frac{\partial^2 \vartheta_k}{\partial z^2} = 0 \tag{4}$$

gdzie:

$\lambda$ - przewodność cieplna właściwa ziemi,

$c$ - ciepło właściwe ziemi,

$\gamma$ - ciężar objętościowy ziemi.

Natomiast równanie przewodzenia ciepła słonecznego w ziemi w dowolnej głębokości $y$, można wyrazić

$$\frac{\partial^2 \vartheta_a}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial \vartheta_a}{\partial t} \tag{5}$$

gdzie:

$\alpha$ - dyfuzyjność cieplna właściwa ziemi.

Początek układu współrzędnych leży na osi $y$ na powierzchni ziemi. Na rozkład wypadkowego pola temperaturowego w ziemi, wokół kabla, wywierają zasadniczy wpływ następujące czynniki atmosferyczne:

1) ciepło słoneczne, w zależności od stopnia nasłonecznienia powierzchni ziemi, jej pokrycia i siły wiatru,
2) opady atmosferyczne w postaci śniegu lub deszczu.

Wpływ ciepła słonecznego na wypadkowy rozkład natężenia strumienia cieplnego w ziemi

Rozwiązując równanie różniczkowe 3, dla stanu cieplnie ustalonego, tj. dla $\frac{\partial \vartheta_k}{\partial t} = 0$, dochodzi się do zależności

$$\vartheta_{k1} - \vartheta_{k2} = \frac{q^x}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (6)$$ x)

a uwzględniając ponadto metodę "źródeł i upustów" (lustrzanej odbitki źródła ciepła), otrzymuje się wzór

$$\vartheta_{x,y} = q^x \frac{\varrho}{2\pi} \cdot \ln \sqrt{\frac{x^2 + (2h-v)^2}{x^2 + y^2}} \quad (7)$$

przy założeniu np. jednostrumieniowego przepływu ciepła od kabla w kierunku powierzchni ziemi.

Dla uproszczenia rozwiązania nawiązano do jednostrumieniowego przepływu ciepła, aczkolwiek w rzeczywistości istnieją dwa strumienie przepływu ciepła [1], jeden skierowany ku powierzchni ziemi, drugi w głąb ziemi, do izotermy $\vartheta$ = const. (niezależnej od ciepła słonecznego). Postępując wg wywodu poniższego można dla tego przypadku wyprowadzić podobne zależności.

Na podstawie znanego rozkładu pola temperatury kabla, dla stanu cieplnie ustalonego, znaleźć można natężenie strumienia cieplnego kabla w dowolnym punkcie ziemi otaczającej kabel, wg prawa Fouriera:

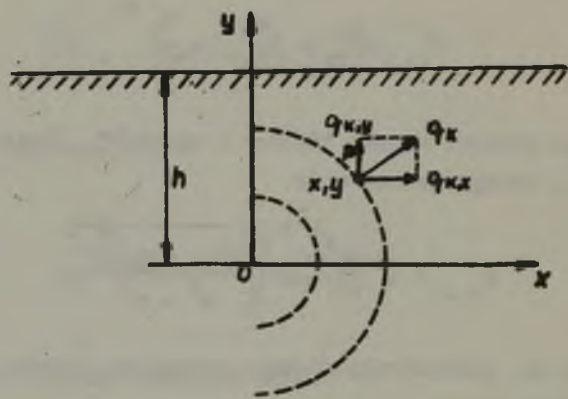
$$q_k = -\lambda \frac{\partial \vartheta_k}{\partial n} = -\lambda \operatorname{grad} \vartheta_k \quad (8)$$

x) $q^x$ ciepło wydzielające się w kablu na jednostkę długości.

Rozkładając natężenie strumienia cieplnego kabla na dwie składowe $q_x$ i $q_y$ (Rys. 1) można znaleźć ich wartości w dowolnym punkcie bryły ziemi otaczającej kabel wg wzorów

$$q_{k,x} = -\lambda \frac{\partial \vartheta_k}{\partial x} \tag{9}$$

$$q_{k,y} = -\lambda \frac{\partial \vartheta_k}{\partial y} \tag{10}$$




Rys. 1. Rozkład natężenia strumienia cieplnego na dwie składowe

Po znalezieniu pochodnych cząstkowych funkcji $\vartheta_{x,y}$ i wprowadzeniu ich do równań (9) i (10) otrzymuje się

$$q_{k,x} = \frac{q^x}{\pi} \frac{2hx(h-y)}{\left[x^2 + (2h-y)^2\right](x^2+y^2)} \tag{11}$$

$$q_{k,y} = \frac{q^x}{\pi} \frac{h(x^2+2hy-y^2)}{\left[x^2 + (2h-y)^2\right](x^2+y^2)} \tag{12}$$

Całkowite natężenie strumienia cieplnego wypadkowego w dowolnym punkcie o współrzędnych (x,y) znaleźć można z zależności

$$q_k = \sqrt{q_{k,x}^2 + q_{k,y}^2} \tag{13}$$

Z największym stopniem oddziaływania ciepła słonecznego na wypadkowe pole temperaturowe należy się liczyć w obszarze ziemi tuż pod jej powierzchnią, gdzie natężenie strumienia cieplnego kabla jest stosunkowo małe, a natężenie strumienia ciepła słonecznego stosunkowo duże (natężenie strumienia ciepła słonecznego maleje z głębokością). Wobec tego natężenie strumienia cieplnego kabla obliczono dla przykładu nad kablem, w odległości 0,875 h, tj. 0,12 h pod powierzchnią ziemi. Wtedy

$$x = 0 \qquad i \qquad y = 0{,}875\ h$$

$$q_{k,x} = 0; \quad q_{k,y} = \frac{q^x \cdot h}{\pi(2h-y)y} \tag{14}$$

W przypadku kabla obciążonego prądem nominalnym (wg PN-55/E-05021), np przy q = 500 mW/cm, zakopanego na głębokości 80 cm, natężenie strumienia cieplnego tuż przy powierzchni ziemi nad kablem wynosi

$$q_{k,y} = \frac{500 \cdot 80}{\pi(160-70)70} = 2{,}02\ \frac{mW}{cm^2}$$

dla y = 0,875 h

Rozwiązując równanie różniczkowe (5) dla przewodzenia ciepła słonecznego, otrzymuje się zależność

$$\vartheta_{a,y} = \vartheta_m \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot y\right) \cdot \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot y\right) \tag{15}$$

gdzie:

$\vartheta_{a,y}$ - temperatura punktu o współrzędnej $y$ w ziemi,

$\vartheta_m$ - amplituda temperatury na powierzchni ziemi,

$2\pi f = \omega$ - pulsacja temperatury,

$f$ - częstotliwość zmian temperatury,

$\alpha$ - dyfuzyjność cieplna właściwa ziemi,

$y$ - głębokość rozpatrywanego punktu w ziemi, w odległości $y$ od jej powierzchni.

Krzywe rozkładu temperatury ograniczone są krzywymi o równaniu

$$\vartheta'_{a,y} = \pm \vartheta_m \cdot e^{-\sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}} \cdot y} \tag{16}$$

Natężenie strumienia ciepła słonecznego równe jest w chwili $t$

$$q_{a,y} = -\lambda \frac{\partial \vartheta_{a,y}}{\partial y} \tag{17}$$

stąd

$$q_{a,y} = \lambda \cdot \vartheta_m \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot y} \left[-\sin(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} y) + \right.$$

$$\left. + \cos(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot y)\right] \tag{18}$$

Rozpatrując przypadek największego natężenia strumienia cieplnego dla obwiedni o równaniu (16) można obliczyć jego wartość wg wzoru

$$q_{a,y} = -\lambda \frac{\partial \vartheta'_{a,y}}{\partial y} = \pm \lambda \cdot \vartheta_m \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot f}{\alpha}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}} \cdot y} \tag{19}$$

Znak $\pm$ oznacza, że natężenie strumienia ciepła słonecznego jest latem skierowane w głąb ziemi, zaś zimą skierowane ku powierzchni ziemi. Dla przykładu na głębokości $y = 10$ cm obliczono wartość natężenia strumienia ciepła słonecznego, która wynosi

$$q_{a,y} = 0{,}56 \frac{mW}{cm^2}$$

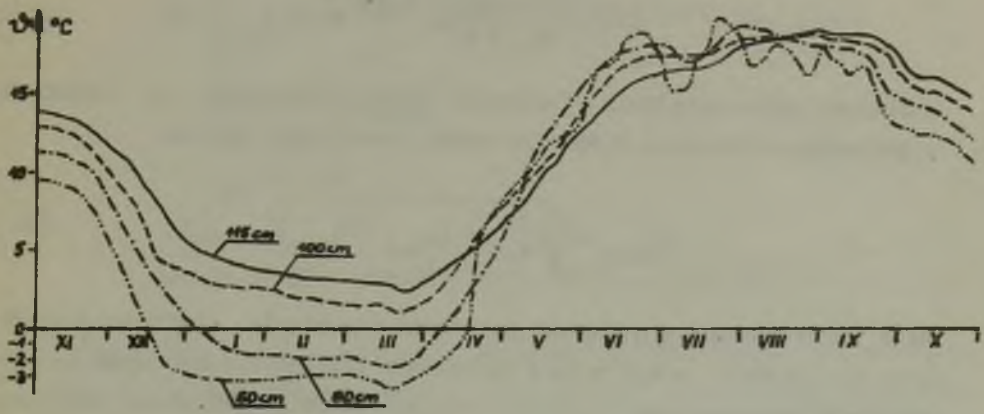
dla oporności cieplnej właściwej gruntu pochodzenia żużlowego

$\varrho = 135 \frac{deg\ cm}{W}$, rocznej amplitudy wahań temperatury

$\vartheta_m = 20^oC$ x), rocznej częstotliwości zmian temperatury

$f = \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} \frac{1}{s}$, dyfuzyjności cieplnej właściwej

gruntu pochodzenia żużlowego, $\alpha = 4{,}0 \cdot 10^{-3} \frac{cm^2}{s}$.




Rys. 2. Temperatura ziemi w ciągu roku 1963/64 na różnych głębokościach. Śródmieście Katowic: grunt nasypowy z przewagą żużla wielkopiecowego

Porównując wartość natężenia strumienia cieplnego kabla, w stanie cieplnie ustalonym, w miejscu oddalonym od kabla o 70 cm (w osi + y), z wartością maksymalną natężenia strumienia ciepła słonecznego w tym samym punkcie ziemi, pochodzenia żużlowego, należy stwierdzić, że jest ona ok. 4 razy większa tzn.

$$\frac{q_{k,y}}{q_{a,y}} = \frac{2{,}02}{0{,}56} \cong 3{,}6$$

x) Latem średnia dobowa temperatura ziemi na głębokości 10 cm nie przekraczała +25°C, natomiast zimą - 15°C (dane z okresu 1963-64). Miejsce pomiaru było ocienione drzewami (Rys. 2).

Ogólnie stosunek ten dla dowolnego punktu w ziemi otaczającej kabel można wyrazić:

$$\frac{q_{k,y}}{q_{a,y}} = \pm \frac{q^x}{\pi} \cdot \frac{h(x^2+2hy-y^2)}{\left[x^2+(2h-y)^2\right] \cdot (x^2+y^2)} :$$

$$: \lambda \cdot \vartheta_m \cdot \sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}}\, e^{-\sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}}\, y} \qquad (20)$$

Natomiast wpływ natężenia strumienia ciepła słonecznego na natężenie wypadkowego strumienia cieplnego można przedstawić wzorem:

$$q_{k,x,y} = \sqrt{q^2_{k,x} + (q_{k,y} \pm q_{a,y})^2} \qquad (21)$$

Wzór ten odpowiada wypadkowemu natężeniu strumienia cieplnego w punkcie x,y. Jednak zmiany w polu wypadkowym temperaturowym wywołane oddziaływaniem zmiennego strumienia ciepła słonecznego zależą od pory roku.

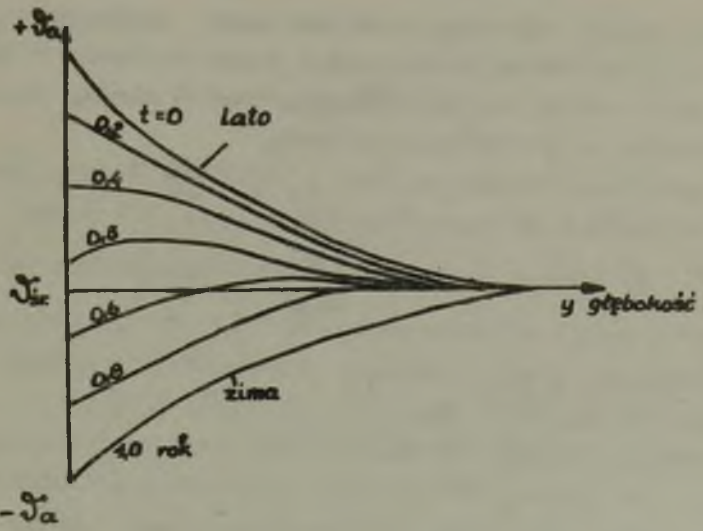
Poprzednio porównywano wielkości natężenia strumienia cieplnego kabla z natężeniem strumienia ciepła słonecznego dla stosunkowo dużych, ekstremalnych pochodnych cząstkowych $\frac{\partial \vartheta_a}{\partial y}$ (dla obwiedni wahań temperatury).

W rzeczywistości jednak krzywa rozkładu temperatury $\vartheta_a = f(y)$ będzie się pokrywać z obwiednią wahań temperatury tylko dla jakiegoś skończonego przedziału czasu, np. dla 1 miesiąca, natomiast w okresach dłuższych wystąpią krzywe rozkładu mniej strome (Rys. 3).

Stąd rozpatrując wpływ natężenia strumienia ciepła słonecznego na natężenie wypadkowego strumienia ciepła w innym przedziale czasowym, należy przyjąć jeszcze mniejsze wartości tego pierwszego.

Wtedy dla omawianego przykładu liczbowego stosunek

$$\frac{q_{k,y}}{q_{a,y}} > 4 \qquad \text{np. } 8 \div 10.$$




Rys. 3. Rozkład temperatury w ziemi w przekroju roku

Biorąc ponadto pod uwagę, że oddziaływanie strumienia ciepła słonecznego na wypadkowy strumień cieplny maleje wraz z głębokością, należy stwierdzić, że jego wpływ na rozkład strumienia cieplnego wypadkowego, w stanie cieplnie ustalonym, jest z aspektu całego obrazu pola w przybliżeniu pomijalny, tzn. że ewentualne zmiany w wypadkowym obrazie natężenia strumienia cieplnego, a tym samym w wypadkowym obrazie pola temperaturowego, są nieznaczne.

Z wzoru (20) i (21) wynika, że wpływ natężenia strumienia ciepła słonecznego na natężenie wypadkowego strumienia cieplnego zależy od ilości ciepła jednostkowego wydzielanego przez kabel. Im mniejszy prąd o stałym natężeniu, płynie przez żyły przewodzące kabla, tym większe oddziaływanie ciepła słonecznego na obraz wypadkowego pola temperaturowego. Natomiast im mniejsza oporność cieplna właściwa ziemi, w której zakopany jest kabel, oraz im mniejsza dyfuzyjność cieplna właściwa ziemi, tym większy stopień oddziaływania natężenia strumienia ciepła słonecznego na natężenie wypadkowego strumienia ciepła.

Należy tu podkreślić, że tylko w omawianym, konkretnym przypadku kabla, pracującego w ziemi pochodzenia żużlowego, o stosunkowo dużej

oporności cieplnej właściwej ziemi oraz małej dyfuzyjności cieplnej właściwej i obciążonego dużym prądem o stałym natężeniu - wpływ strumienia ciepła słonecznego na wypadkowy strumień cieplny jest stosunkowo nieznaczny, co potwierdzono pomiarami.

W innych typach gruntu, np. gdy $\varrho_z = 40 \frac{\text{deg cm}}{\text{W}}$ oraz przy obciążeniu kabla prądem o stałym natężeniu, równym np. 50% wartości znamionowej ($q^x = \frac{500}{4}$ mW/cm), - stosunek $\frac{q_{k,y}}{q_{a,y}}$ będzie mniejszy od jedności. Można o tym wnosić na podstawie wzorów (14) i (19). Wtedy wpływ natężenia strumienia ciepła słonecznego na wypadkowe natężenie strumienia cieplnego nie jest pomijalny.

Rozwiązując równanie różniczkowe 3 dla ruchu ciepła kabla, w stanie cieplnie nieustalonym, dla przedziału czasu rzędu kilkudziesięciu do kilkuset godzin (nie oddziaływuje jeszcze ujemne źródło ciepła - "upust") - otrzymuje się zależność

$$\vartheta_{k,x,y} = \frac{q^x \cdot \varrho}{4\pi} \cdot \int_{\frac{x^2+y^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u}\, du = -\frac{q^x \varrho}{4\pi} \operatorname{Ei}\left(-\frac{x^2+y^2}{4\alpha t}\right) \tag{22}$$

Stąd składowa natężenia strumienia cieplnego chwilowego, wzdłuż osi x

$$q_{k,x} = -\lambda \frac{\partial \vartheta_{k,x,y}}{\partial x} =$$

$$= \frac{q^x}{4\pi} \cdot \frac{e^{-\frac{x^2+y^2}{2\alpha t}} \left[\left(\frac{x^2+y^2}{4\alpha t}\right)^2 + 1\right]}{\left[\frac{x^2+y^2}{4\alpha t}\right]^3} \cdot \frac{x}{2\alpha t} \tag{23}$$

oraz wzdłuż osi y

$$q_{k,y} = -\lambda \frac{\partial \vartheta_{k,x,y}}{y} =$$

$$= \frac{q^x}{4\pi} \frac{e^{-\frac{x^2+y^2}{2\alpha t}} \left[\left(\frac{x^2+y^2}{4\alpha t}\right)^2 + 1\right]}{\left[\frac{x^2+y^2}{4\alpha t}\right]^3} \cdot \frac{y}{2\alpha t} \tag{24}$$

Całkowite natężenie strumienia cieplnego wypadkowego, chwilowego (zmiennego w czasie), w dowolnym punkcie o współrzędnych (x,y) znaleźć można z zależności

$$q_k(t) = \sqrt{\left[q_{k,x}(t)\right]^2 + \left[q_{k,y}(t)\right]^2} \tag{25}$$

Przeprowadzając analogiczną analizę porównawczą na temat oddziaływania natężenia strumienia ciepła słonecznego na natężenie strumienia cieplnego wypadkowego, dla stanu cieplnie nieustalonego kabla, stwierdza się, że

dla $x = 0$

$$q_{k,y} = \frac{8q^x}{\pi} \cdot \frac{e^{-\frac{y^2}{2\alpha t}} \left[\left(\frac{y^2}{4\alpha t}\right)^2 + 1\right]}{y^5} \cdot \alpha^2 \cdot t^2 \tag{26}$$

Wtedy dla danych liczbowych

$q^x$ = 500 mW/cm

y = 70 cm (10 cm pod powierzchnią ziemi),

$\alpha = 4{,}0 \cdot 10^{-3} \frac{cm^2}{s}$ dla gruntu pochodzenia żużlowego,

t = 14.24.3600 s dla 14 dni pracy kabla, przy prądzie o stałym natężeniu

$$q_{k,y} = 11,4 \frac{mW}{cm^2}$$

$$\text{dla} \quad y = 0,875 \cdot h$$

Otrzymany wynik liczbowy na natężenie strumienia cieplnego kabla, dla punktu ziemi leżącego na osi y (nad kablem) w odległości 10 cm pod powierzchnią ziemi, dla stanu cieplnie nieustalonego kabla wskazuje, że to natężenie jest większe od natężenia strumienia cieplnego dla stanu ustalonego:

$$11,4 > 2,02 \ mW/cm^2$$

Stąd wniosek, że wpływ natężenia strumienia ciepła słonecznego na natężenie strumienia cieplnego wypadkowego jest mniejszy dla stanu cieplnie nieustalonego kabla, aniżeli dla stanu ustalonego.

Wobec powyższego, ponieważ oddziaływanie natężenia strumienia ciepła słonecznego na natężenie strumienia cieplnego wypadkowego maleje wraz z głębokością, należy stwierdzić, że jego wpływ na rozkład strumienia cieplnego wypadkowego jest tym bardziej dla stanu cieplnie nieustalonego kabla pomijalny, z aspektu całego obrazu pola, tzn. że ewentualne zmiany w obrazie wypadkowego natężenia strumienia cieplnego, a tym samym w obrazie wypadkowego pola temperaturowego są jeszcze mniejsze.

Rozważania powyższe są słuszne pod warunkiem spełnienia zależności

$$\lambda \neq f(\vartheta) \qquad \text{i} \qquad c \neq f(\vartheta)$$

Wtedy bowiem może znaleźć zastosowanie zasada superpozycji pól cieplnych. Ponieważ w rzeczywistości jednak istnieją zależności pomiędzy temperaturą a przewodnością cieplną właściwą i pojemnością cieplną właściwą (np. $\lambda$ rośnie przy wzroście temperatury; w przypadku piasku suchego o $0,001 \frac{W}{deg\ cm}$), powstaje zasadnicze pytanie, czy wolno stosować zasadę superpozycji pól przy analizie teoretycznej zjawiska od-

działywania pola ciepła słonecznego na wypadkowe pole cieplne. Czy nie zachodzi deformacja pola cieplnego samego kabla pod wpływem pola ciepła słonecznego; czy wypadkowa oporność cieplna bryły ziemi otaczającej kabel i odprowadzającej jego ciepło, będzie w przybliżeniu wartością niezależną od zmian natężenia strumienia ciepła słonecznego.

Na powyższe zasadnicze pytanie znaleziono odpowiedź za pomocą eksperymentu. Wyniki kilku sezonowych kilkunastodobowych serii pomiarowych, w czasie których utrzymywano w żyłach kabla prąd o stałym natężeniu, potwierdzają możliwość zastosowania zasady superpozycji pól cieplnych w omawianym przypadku.

Na podstawie konfrontacji wyników dwóch wielodobowych serii pomiarowych, dla kabla 3 x 50 $mm^2$, typu AKFtA, 6 kV, zakopanego w gruncie nasypowym, pochodzenia żużlowego, przeprowadzonych w czasie:

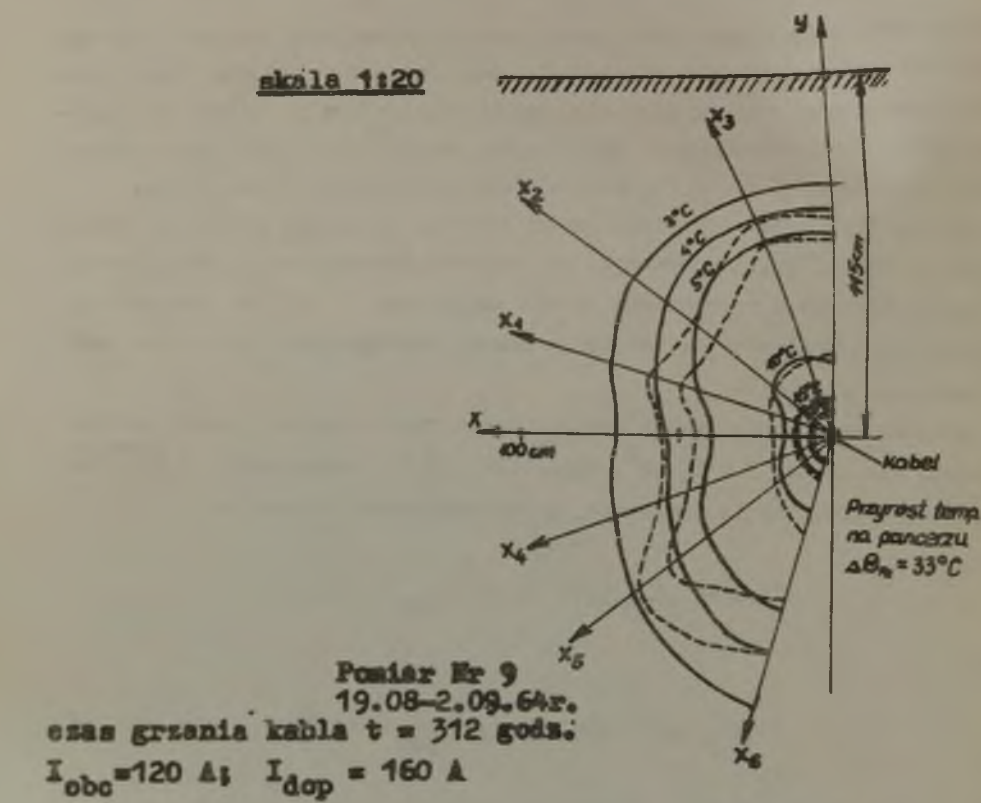
$$11{,}5 - 1{,}6 \,.\, 1964 \quad \text{przy} \quad I_{pom} = 120 \ \text{A}$$

oraz

$$19{,}8 - 2{,}9 \,.\, 1964 \quad \text{przy} \quad I_{pom} = 120 \ \text{A}$$

1. Stwierdzono, że kształty i rozkłady pól temperaturowych pochodzących od kabla ($\Delta\vartheta_{Fe-z}$) są prawie identyczne po kilkunastu dobach pracy kabla pomimo, że w maju naturalny rozkład temperatur w ziemi charakteryzował się znacznymi zmianami na głębokościach 60-115 cm (przyrosty temperatury wynosiły ok. 7-15°C w ciągu miesiąca), zaś w sierpniu był stosunkowo stabilny (temperatura w ziemi na głębokościach 60--115 cm 16-19°C - Rys. 4).

2. Wprawdzie pole temperaturowe z sierpnia (naniesione linią ciągłą na załączonym Rys. 4), związane jest z czasem grzania o jedną dobę krótszym (13 dni), aniżeli w miesiącu maju (14 dni), ale zmiany temperatur poszczególnych punktów pomiędzy 13 a 14 dobą grzania, nie przekroczyłyby wartości 0,5°C/dobę.




Rys. 4. Pole temperaturowe kabla typu AKFtA 3x50 $mm^2$ ułożonego w ziemi

Linie przeryw. - pomiar z maja 1964 r. Linie ciągłe - pomiar z sierpnia 1964

3. Wyniki pomiarów w miesiącu sierpniu wskazują na to, że przyrost temperatury pomiędzy pancerzem kabla, a powierzchnią ekwitermiczną 20°C w promieniu ok. 8 cm od osi kabla, jest większy o ponad 7°C w stosunku do wartości uzyskanych w miesiącu maju, przy pozostałych przyrostach temperatur w przybliżeniu tych samych. Przyczyną tego nadmiernego przyrostu temperatury jest częściowo zjawisko migracji wilgoci oraz wysuszenie warstwy piasku w pobliżu kabla, pod gąsiorami.

4. Zaobserwowane prawidłowości - prawie identyczne rozkłady pól temperaturowych, pochodzących od samego kabla, niezależne od zmienności

warunków atmosferycznych - zachodziły przy prawie tych samych opornościach właściwych cieplnych gruntu.

Autorzy Nease i Bauer [2] opisują wyniki wieloletnich badań na temat wpływu warunków atmosferycznych na zmienność rozkładu pola cieplnego pochodzącego od kabla.

Analiza wyników pomiarowych vw. autorów wskazuje również na to, że rozkład pola temperaturowego pochodzącego od kabla nie jest praktycznie (dostrzegalnie) zależny od zmienności natężenia strumienia ciepła słonecznego w ziemi.

Na podstawie przytoczonej analizy eksperymentalnej wpływu natężenia strumienia ciepła słonecznego na rozkład natężenia strumienia cieplnego kabla, a tym samym na rozkład pola temperaturowego kabla, przeprowadzonej dla stanu cieplnie nieustalonego i ustalonego oraz w oparciu o przeprowadzone pomiary w przypadku trzech różnych kabli zakopanych w gruntach o różnych własnościach ($\alpha$, $\varrho$, c) można stwierdzić, że wpływ ten z aspektu obliczanej wypadkowej oporności cieplnej bryły ziemi, a tym samym z punktu widzenia przyrostu temperatury między pancerzem kabla a temperaturą ziemi, na głębokości jego zakopania (poza polem temperaturowym kabla), nie powoduje błędów dużych (1-2$^{o}$C) w warunkach ekstremalnych.

Podsumowując rozważania na temat wpływu warunków atmosferycznych na rozkład pola temperatury wokół kabla należy stwierdzić, że

1. Wpływ zmiennego natężenia strumienia ciepła słonecznego na wypadkowy rozkład natężenia strumienia cieplnego kabla jest praktycznie pomijalny tylko w przypadku obciążenia prądowego kabla, zbliżonego do dopuszczalnego długotrwałego oraz gdy oporność cieplna właściwa gruntu jest duża (większa od 150 $\frac{deg\ cm}{W}$), a dyfuzyjność cieplna właściwa jest mała (mniejsza od $5.10^{-3}\ \frac{cm^2}{s}$). Wpływ ten jest pomijalny w przypadku pracy kabla w stanie cieplnie nieustalonym.

2. Zmiany zawilgocenia gruntu wynikłe z opadów atmosferycznych, rozpatrywane w przekroju bryły ziemi otaczającej kabel (do głębokości rzędu paru metrów) i w przekroju roku są na ogół małe i powolne.

W związku z tym wpływ opadów atmosferycznych na rozkład pola natężenia strumienia cieplnego kabla jest w przeciętnych warunkach pomijalny[x]. Przez warunki przeciętne należy rozumieć:

przeciętny stan zawilgocenia gruntu w granicach 10-20% (wagowo), niewystępowanie zjawiska migracji wilgoci, stosunkowo płaska charakterystyka $\varrho_z = f$ (wilgoci).

3. Ponieważ obciążalność dopuszczalna długotrwała kabla elektroenergetycznego w ziemi zależy przede wszystkim od rozkładu pola temperaturowego w ziemi, a tym samym od rozkładu "obrazu" natężenia strumienia cieplnego, należy stwierdzić, że jest ona praktycznie niezmienna w przekroju roku w aspekcie zmian oporu cieplnego bryły ziemi odprowadzającej ciepło kabla.

4. Z przytoczonych rozważań wynika, że można stosować zasadę superpozycji w odniesieniu do pola cieplnego kabla i pola cieplnego atmosferycznego w ziemi, nie popełniając praktycznie błędu.

LITERATURA

[1] Bladowski S.: Przepływ ciepła z kabli ułożonych w ziemi, Energetyka 1965, luty-marzec.

[2] Nease R.J. i Bauer A.: A study of the superposition of heat fields and the Kennelly formula as applied to underground cable systems, TAIEE 1958 str. 1330.

Przyjęto do druku w sierpniu 1970 r.

[x] W następnej publikacji autor omówi szczegółowiej wpływ opadów atmosferycznych na obciążalność prądową kabli.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИНСОЛЯЦИИ НА ТОКОВУЮ НАГРУЗОЧНУЮ СПОСОБНОСТЬ КАБЕЛЯ В ЗЕМЛИ

Р е з ю м е

На основе измерений распределения температуры, проведенных в земли вокруг кабеля при нагрузке доказано, что оно изменяется на протяжении года, даже в случаях, когда по кабелю через длительное время несколько десятков дней проходит ток с постоянным напряжением. Изменения теплового поля именно зависят от атмосферных условий, происходящих до проведения измерений и отличаются в зависимости от времен года. Были предприняты пробы математического определения распределения результирующего теплового поля вокруг электроэнергетического кабеля, находящегося в земли и влияния изменений этого поля на допустимую длительную токовую нагрузочную способность кабеля.

AN ANALYSIS OF INSOLATION INFLUENCE ON CURRENT-CARRYING CAPACITY ON A CABLE IN EARTH

S u m m a r y

On the base of temperature distribution measurement carried out around a loaded cable in earth there has been stated, that it changes along a year's period even then when the constant tensure current flows in a cable's conductor during a long time of about some days.

The changes in a temperature field depend namely on atmospheric conditions which precede the measurement and vary in various seasons of the years.

In this work there has been undertaken the test of a mathematical determination of the resultant heat field around an electromagnetic cable burried directly in earth, and the influence of changes of this field on the admissible long-lasting current-carrying capacity of a cable.