

DOI 10.21008/j.1897-0737.2020.103.0003

Tomasz SZCZEGIELNIAK\*, Dariusz KUSIAK\*, Zygmunt PIĄTEK\*

## ANALIZA STRAT MOCY ORAZ TEMPERATURY KABLA ELEKTROENERGETYCZNEGO ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

W artykule przedstawiono matematyczny model wyznaczania strat mocy oraz temperatury w kablu elektroenergetycznym średniego napięcia. Dokładne wyznaczenie mocy wydzielanej w kablu, a w konsekwencji jego temperatury jest bardzo skomplikowane. Straty mocy generowane w kablu uzależnione są od prądu oraz od napięcia. Straty zależne od prądu odnoszą się do ciepła generowanego w elementach przewodzących kabla (żyły roboczej oraz ekranie). Z kolei straty generowane w izolacji kabla związane są z napięciem roboczym. W niniejszym artykule wyznaczono straty mocy i temperaturę kabla pomijając straty występujące w izolacji. Obliczenia wykonano dla przypadku kabla z izolowanym ekranem oraz z prądem powrotnym w ekranie. W obliczeniach uwzględniono zjawisko naskórkowości oraz zbliżenia.

SŁOWA KLUCZOWE: kabel elektroenergetyczny, gęstość prądu, straty mocy, temperatura.

### 1. WSTĘP

Wzrost poziomu zużycia energii elektrycznej jest główną przyczyną rozwoju konstrukcji urządzeń elektrycznych służących do jej wytwarzania, przesyłania i użytkowania. W aglomeracjach miejskich o dużej gęstości zaludnienia, gdzie nie jest możliwe stosownie linii napowietrznych budowane są linie kablowe o dużej obciążalności prądowej. Duża wartość prądu przepływającego przez linię kablową wiąże się z wysokim emitowanym polem elektromagnetycznym oraz z dużymi stratami mocy objawiającym się w postaci generowanego ciepła [1–6].

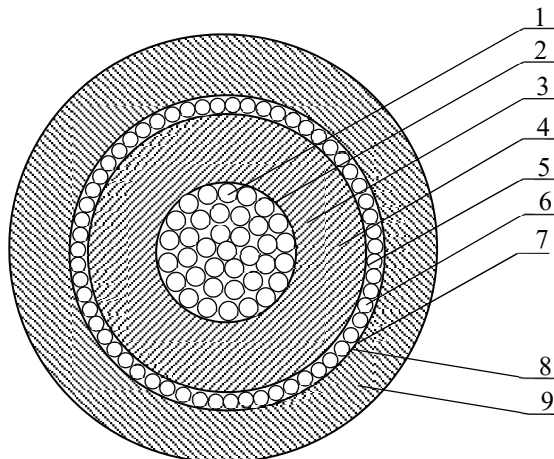
Umiejętność określania maksymalnej wartości prądu, który płynąc długotrwale w żyły roboczej kabla nie spowoduje przegrzania izolacji, ma ogromne znaczenie praktyczne, pozwala bowiem na optymalne wykorzystanie możliwości przesyłowych linii kablowej. Dopuszczalny prąd roboczy zależy zarówno od konstrukcji samego kabla, jak i od parametrów fizycznych środowiska, w którym został ułożony [1, 5].

Typowy kabel elektroenergetyczny średniego napięcia składa się z jednej lub kilku żył przewodzących prąd elektryczny oraz szeregu warstw pomocniczych pełniących funkcje izolacyjne, ekranujące i ochronne [1, 2, 5, 6]. Przykładową

---

\* Politechnika Częstochowska

konstrukcję kabla w izolacji z polietylenu usieciowanego przedstawiono na rysunku 1 [6].



Rys. 1. Konstrukcja kabla w izolacji z polietylenu usieciowanego [6]: 1 – żyła robocza wykonana z miedzi lub aluminium, uszczelniona wzdłużnie, 2 – ekran półprzewodzący wytłaczany z polietylenu usieciowanego XLPE, 3 – izolacja z polietylenu usieciowanego XLPE; 4 – ekran półprzewodzący z XLPE, 5 – obwój z taśmy półprzewodzącej z barierą przeciwwilgociową, 6 – żyła powrotna z drutów miedzianych i spirali przeciwskrętnej z taśmy miedzianej, 7 – obwój na żyłę powrotnej z taśmy półprzewodzącej z barierą wodną, 8 – taśma aluminiowa z kopolimerem, ułożona wzdłużnie z zakładką, 9 – powłoka zewnętrzna z polietylenu powłokowego

W niniejszym artykule przedstawiona zostanie analityczna metoda wyznaczania strat mocy i temperatury w kablu elektroenergetycznym średniego napięcia. W obliczeniach uwzględnione zostaną zjawiska naskórkowości i zbliżenia.

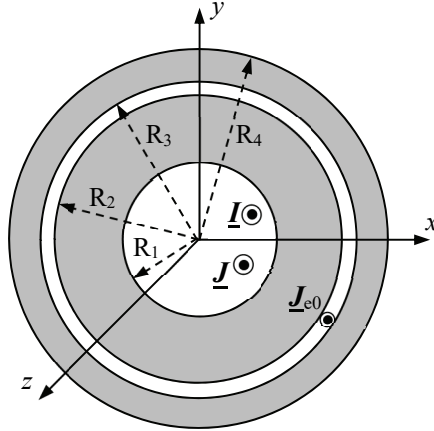
## 2. STRATY MOCY ORAZ TEMPERATURA KABLA Z IZOLOWANYM EKRANEM

Rozważmy kabel elektroenergetyczny przedstawiony jest na rysunku 2. Jeżeli założy się, że żyła robocza stanowi przewód walcowy o promieniu zewnętrznym  $R_1$ , z prądem sinusoidalnym o skutecznej wartości zespolonej  $\underline{I}$ , wówczas gęstość prądu w żyłę jest określona wzorem [4]:

$$\underline{J}(r) = \frac{\underline{\Gamma} \underline{I}}{2 \pi R_1} \frac{I_0(\underline{\Gamma}r)}{I_1(\underline{\Gamma}R_1)} \quad (1)$$

przy czym funkcje  $I_0(\underline{\Gamma}r)$  oraz  $I_1(\underline{\Gamma}R_1)$  są zmodyfikowanymi funkcjami Bessela pierwszego rodzaju, odpowiednio zerowego oraz pierwszego rzędu, natomiast

$\underline{\Gamma} = \sqrt{j\omega\mu_0\gamma}$  oznacza zespoloną stałą propagacji,  $\omega$  jest pulsacją,  $\gamma$  oznacza konduktywność przewodu, a  $\mu_0$  przenikalność magnetyczną próżni [4].



Rys. 2. Przekrój poprzeczny kabla elektroenergetycznego z ekranem izolowanym

Z kolei, jeżeli ekran stanowi przewód rurowy o promieniu wewnętrznym  $R_2$  oraz zewnętrznym  $R_3$ , wówczas w ekranie na skutek zjawiska zbliżenia będą indukować się prądy wirowe o następującej gęstości [4]:

$$\underline{J}_{e0}(r) = \mathbf{1}_z J_{e0}(r) = \frac{\underline{\Gamma}_e I}{2\pi R_2} j_{e0}(r) = \mathbf{1}_z J_{e0}(r) \exp[j\phi_{J_{e0}}(r)] \quad (2)$$

gdzie

$$j_{e0}(r) = \frac{b_0 I_0(\underline{\Gamma}_e r) + c_0 K_0(\underline{\Gamma}_e r)}{d_0} \quad (2a)$$

oraz

$$d_0 = I_1(\underline{\Gamma}_e R_3) K_1(\underline{\Gamma}_e R_2) - I_1(\underline{\Gamma}_e R_2) K_1(\underline{\Gamma}_e R_3) \quad (2b)$$

$$b_0 = \beta_e K_1(\underline{\Gamma}_e R_2) - K_1(\underline{\Gamma}_e R_3) \quad (2c)$$

$$c_0 = \beta_e I_1(\underline{\Gamma}_e R_2) - I_1(\underline{\Gamma}_e R_3) \quad (2d)$$

$$\beta_e = \frac{R_2}{R_3} \quad \text{przy czym } (0 \leq \beta_e \leq 1) \quad (2e)$$

We wzorach (2-2d)  $\underline{\Gamma}_e$  oznacza zespolony współczynnik propagacji fali elektromagnetycznej w ekranie, który wynosi  $\underline{\Gamma}_e = \sqrt{j\omega\mu\gamma_e} = \sqrt{\omega\mu\gamma_e} \exp[j\frac{\pi}{4}]$ , natomiast  $\gamma_e$  jest konduktywnością ekranu [4].

Straty mocy w żyłce roboczej oraz ekranie można wyznaczyć z prawa Joule'a, tj:

$$P = \iiint_V \frac{1}{\gamma} \underline{J}(r) \underline{J}^*(r) dV \quad (3)$$

przy czym gęstość prądu  $\underline{J}(r)$  określona jest odpowiednio wzorem (1) lub (2).

Straty mocy w żyłce roboczej będą zatem określone wzorem:

$$P = \frac{I^2 \underline{\Gamma} l}{4\pi R_1 \gamma} \frac{I_0(\underline{\Gamma} R_1) I_1^*(\underline{\Gamma} R_1) - j I_0^*(\underline{\Gamma} R_1) I_1(\underline{\Gamma} R_1)}{I_1(\underline{\Gamma} R_1) I_1^*(\underline{\Gamma} R_1)} \quad (4)$$

natomiast straty mocy czynnej w ekranie mają postać:

$$P_{e0} = \frac{\underline{\Gamma}_e l I^2}{4\pi \gamma_e \beta_e^2 R_3} \frac{\underline{a}_0}{\underline{d}_0 \underline{d}_0^*} \quad (5)$$

gdzie

$$\begin{aligned} \underline{a}_0 = & \underline{b}_0 \underline{b}_0^* \left\{ I_0^*(\underline{\Gamma}_e R_3) I_1(\underline{\Gamma}_e R_3) + j I_0(\underline{\Gamma}_e R_3) I_1^*(\underline{\Gamma}_e R_3) - \right. \\ & \left. - \beta_e \left[ I_0^*(\underline{\Gamma}_e R_2) I_1(\underline{\Gamma}_e R_2) + j I_0(\underline{\Gamma}_e R_2) I_1^*(\underline{\Gamma}_e R_2) \right] \right\} - \\ & - \underline{c}_0 \underline{c}_0^* \left\{ K_0^*(\underline{\Gamma}_e R_3) K_1(\underline{\Gamma}_e R_3) + j K_0(\underline{\Gamma}_e R_3) K_1^*(\underline{\Gamma}_e R_3) - \right. \\ & \left. - \beta_e \left[ K_0^*(\underline{\Gamma}_e R_2) K_1(\underline{\Gamma}_e R_2) + j K_0(\underline{\Gamma}_e R_2) K_1^*(\underline{\Gamma}_e R_2) \right] \right\} - \end{aligned} \quad (5a)$$

$$- \underline{c}_0 \underline{b}_0^* \left\{ I_0^*(\underline{\Gamma}_e R_3) K_1(\underline{\Gamma}_e R_3) - j K_0(\underline{\Gamma}_e R_3) I_1^*(\underline{\Gamma}_e R_3) - \right. \\ \left. - \beta_e \left[ I_0^*(\underline{\Gamma}_e R_2) K_1(\underline{\Gamma}_e R_2) - j K_0(\underline{\Gamma}_e R_2) I_1^*(\underline{\Gamma}_e R_2) \right] \right\} +$$

$$+ \underline{b}_0 \underline{c}_0^* \left\{ I_1(\underline{\Gamma}_e R_3) K_0^*(\underline{\Gamma}_e R_3) - j I_0(\underline{\Gamma}_e R_3) K_1^*(\underline{\Gamma}_e R_3) - \right. \\ \left. - \beta_e \left[ I_1(\underline{\Gamma}_e R_2) K_0^*(\underline{\Gamma}_e R_2) - j I_0(\underline{\Gamma}_e R_2) K_1^*(\underline{\Gamma}_e R_2) \right] \right\}$$

$$\underline{b}_0^* = \beta_e K_1^*(\underline{\Gamma}_e R_2) - K_1^*(\underline{\Gamma}_e R_3) \quad (5b)$$

$$\underline{c}_0^* = \beta_e I_1^*(\underline{\Gamma}_e R_2) - I_1^*(\underline{\Gamma}_e R_3) \quad (5c)$$

$$\underline{d}_0^* = I_1^*(\underline{\Gamma}_e R_3) K_1^*(\underline{\Gamma}_e R_2) - I_1^*(\underline{\Gamma}_e R_2) K_1^*(\underline{\Gamma}_e R_3) \quad (5d)$$

Na podstawie wyznaczonych strat mocy można określić gęstość wewnętrznych źródeł ciepła w żyłce roboczej oraz ekranie. Gęstość wewnętrznych źródeł ciepła w żyłce roboczej określona jest wzorem:

$$q_V = \frac{P}{V} = \frac{I^2 \underline{\Gamma}}{4\pi^2 R_1^3 \gamma} \frac{I_0(\underline{\Gamma} R_1) I_1^*(\underline{\Gamma} R_1) - j I_0^*(\underline{\Gamma} R_1) I_1(\underline{\Gamma} R_1)}{I_1(\underline{\Gamma} R_1) I_1^*(\underline{\Gamma} R_1)} \quad (6)$$

Natomiast gęstość wewnętrznych źródeł ciepła w ekranie ma postać:

$$q_{Ve} = \frac{P_{e0}}{V_e} \quad (7)$$

przy czym  $P_{e0}$  określone jest wzorem (5), natomiast objętość ekranu wynosi

$$V_e = \pi(R_3^2 - R_2^2)l \quad (8)$$

Należy dodać, że gęstości wewnętrznych źródeł ciepła (6) i (7) przeliczana jest na 1 m długości kabla.

Rozważa się pole temperatury w kablu elektroenergetycznym średniego napięcia przedstawionym na rysunku 3. Zakładając, że długość kabla jest wielokrotnie większa od jego rozmiarów poprzecznych można przyjąć, że nie ma przepływu energii cieplnej w kierunku osiowym, natomiast cała energia cieplna wydzielana w kablu rozchodzi się promieniowo. W stanie ustalonym temperatura w żyłce roboczej spełnia równanie [7]:

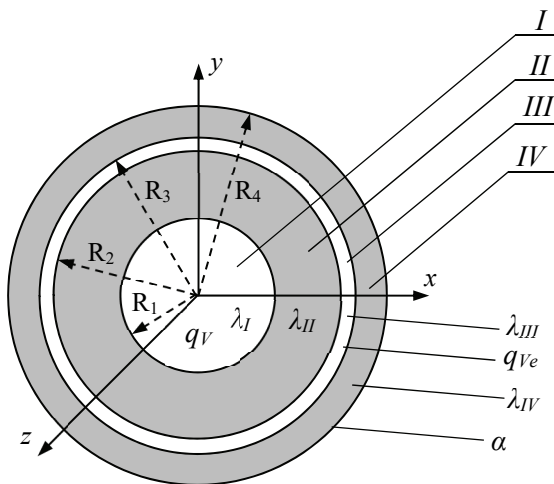
$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = -\frac{q_V}{\lambda_I} \quad (9)$$

W izolacji zawartej pomiędzy żyłą roboczą a ekranem oraz ponad ekranem pole temperatury spełnia równanie:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (10)$$

Podobnie, w ekranie temperatura opisana jest równaniem:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = -\frac{q_{Ve}}{\lambda_{III}} \quad (11)$$



Rys. 3. Przekrój kabla elektroenergetycznego średniego napięcia

Rozwiązaniem równań (9), (10) i (11) w obszarach zaznaczonych na rysunku 3 są odpowiednio:

$$T_I(r) = A \ln r - \frac{q_V r^2}{4\lambda_I} + B \quad (12)$$

$$T_{II}(r) = C \ln r + D \quad (13)$$

$$T_{III}(r) = E \ln r - \frac{q_{Ve} r^2}{4\lambda_{III}} + F \quad (14)$$

$$T_{IV}(r) = G \ln r + H \quad (15)$$

Na brzegach poszczególnych obszarów kabla (rys. 3) spełnione są warunki:

$$\left. \frac{dT_I}{dr} \right|_{r=0} = 0 \quad (16)$$

$$T_I(R_1) = T_{II}(R_1) \quad (17)$$

$$\lambda_I \left( \frac{dT_I}{dr} \right)_{r=R_1} = \lambda_{II} \left( \frac{dT_{II}}{dr} \right)_{r=R_1} \quad (18)$$

$$T_{II}(R_2) = T_{III}(R_2) \quad (19)$$

$$\lambda_{II} \left( \frac{dT_{II}}{dr} \right)_{r=R_2} = \lambda_{III} \left( \frac{dT_{III}}{dr} \right)_{r=R_2} \quad (20)$$

$$T_{III}(R_3) = T_{IV}(R_3) \quad (21)$$

$$\lambda_{III} \left( \frac{dT_{III}}{dr} \right)_{r=R_3} = \lambda_{IV} \left( \frac{dT_{IV}}{dr} \right)_{r=R_3} \quad (22)$$

$$\lambda_{IV} \left( \frac{dT_{IV}}{dr} \right)_{r=R_4} = -\alpha(T_{IV} - T_o) \quad (23)$$

przy czym  $T_o$  oznacza temperaturę otoczenia,  $\alpha$  jest współczynnikiem oddawania ciepła, zaś  $\lambda_i$  oznacza współczynnik przewodzenia ciepła  $i$ -tego obszaru.

Jeśli uwzględnione zostaną warunki od (16) do (23) wówczas:

$$A = 0 \quad (24)$$

$$B = \frac{q_V}{4\lambda_I} R_1^2 + C \ln R_1 + D \quad (25)$$

$$C = -\frac{q_V}{2\lambda_{II}} R_1^2 \quad (26)$$

$$D = -\frac{q_{Ve}}{4\lambda_{III}} R_2^2 + E \ln R_2 - C \ln R_2 + F \quad (27)$$

$$E = -\frac{q_V}{2\lambda_{III}} R_1^2 + \frac{q_{Ve}}{2\lambda_{III}} R_2^2 \quad (28)$$

$$F = \frac{q_{Ve}}{4\lambda_{III}} R_3^2 - E \ln R_3 + G \ln R_3 + H \quad (29)$$

$$G = -\frac{q_{Ve}}{2\lambda_{IV}} R_3^2 - \frac{q_V}{2\lambda_{IV}} R_1^2 + \frac{q_{Ve}}{2\lambda_{IV}} R_2^2 \quad (30)$$

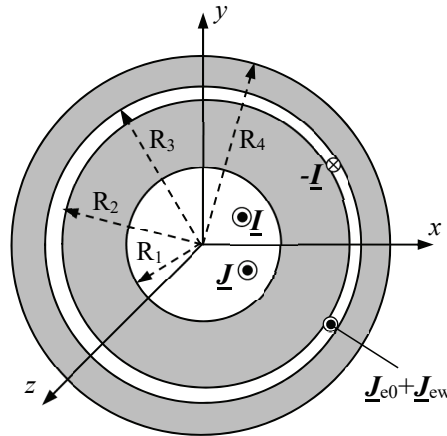
$$H = T_0 - \frac{\lambda_{IV}}{\alpha} \frac{G}{R_4} - G \ln R_4 \quad (31)$$

Temperatura na powierzchni kabla ( $r = R_4$ ) będzie określona wzorem:

$$T(r = R_4) = T_0 - \frac{\lambda_{IV}}{\alpha} \frac{1}{R_4} \left[ -\frac{q_{Ve}}{2\lambda_{IV}} R_3^2 - \frac{q_V}{2\lambda_{IV}} R_1^2 + \frac{q_{Ve}}{2\lambda_{IV}} R_2^2 \right] \quad (32)$$

### 3. STRATY MOCY W KABLU Z PRĄDEM POWROTNYM W EKRANIE

W punkcie tym rozpatrzony zostanie przypadek kabla elektroenergetycznego z prądem powrotnym w ekranie (rys. 4).



Rys. 4. Przekrój poprzeczny kabla elektroenergetycznego z prądem powrotnym w ekranie

W przypadku kabla elektroenergetycznego przedstawionego na rysunku 4 wypadkowa gęstość prądu w ekranie określona jest wzorem [4]:

$$\underline{J}_e(r) = \underline{J}_{e0}(r) + \underline{J}_{ew}(r) \quad (33)$$

przy czym gęstość prądu  $\underline{J}_{e0}(r)$  z uwzględnieniem wewnętrznego zjawiska zbliżenia dana jest wzorem (2), a gęstość prądu  $\underline{J}_{ew}(r)$  ma postać

$$\underline{J}_{ew}(r) = -\frac{\underline{\Gamma}_e I}{2 \pi R_3} j_{ew}(r) = J_{ew}(r) \exp[j \phi_{J_{ew}}(r)] \quad (34)$$

gdzie

$$j_{ew}(r) = \frac{K_1(\underline{\Gamma}_e R_2) I_0(\underline{\Gamma}_e r) + I_1(\underline{\Gamma}_e R_2) K_0(\underline{\Gamma}_e r)}{d_0} \quad (34a)$$

oraz

$$d_0 = I_1(\underline{\Gamma}_e R_3) K_1(\underline{\Gamma}_e R_2) - I_1(\underline{\Gamma}_e R_2) K_1(\underline{\Gamma}_e R_3) \quad (34b)$$

Straty mocy czynnej wydzielanej w żyłce roboczej kabla z prądem powrotnym w ekranie określone są wzorem (4). Natomiast moc czynna wydzielana w ekranie może być obliczona ze wzoru:

$$P_e = P_{e0} + P_{ew} \quad (35)$$

przy czym moc  $P_{e0}$  określona jest wzorem (5) zaś moc:

$$P_{ew} = \frac{\underline{\Gamma} l I^2}{4 \pi \gamma R_3} \frac{\underline{a}_e}{\underline{b}_e \underline{b}_e^*} \quad (36)$$

gdzie

$$\begin{aligned} \underline{a}_e = & K_1(\underline{\Gamma} R_2) K_1^*(\underline{\Gamma} R_2) \left[ I_0(\underline{\Gamma} R_3) I_1^*(\underline{\Gamma} R_3) - j I_1(\underline{\Gamma} R_3) I_0^*(\underline{\Gamma} R_3) \right] - \\ & - I_1(\underline{\Gamma} R_2) I_1^*(\underline{\Gamma} R_2) \left[ K_0(\underline{\Gamma} R_3) K_1^*(\underline{\Gamma} R_3) - j K_1(\underline{\Gamma} R_3) K_0^*(\underline{\Gamma} R_3) \right] + \\ & + I_1(\underline{\Gamma} R_2) K_1^*(\underline{\Gamma} R_2) \left[ K_0(\underline{\Gamma} R_3) I_1^*(\underline{\Gamma} R_3) + j K_1(\underline{\Gamma} R_3) I_0^*(\underline{\Gamma} R_3) \right] - \\ & - K_1(\underline{\Gamma} R_2) I_1^*(\underline{\Gamma} R_2) \left[ I_0(\underline{\Gamma} R_3) K_1^*(\underline{\Gamma} R_3) + j I_1(\underline{\Gamma} R_3) K_0^*(\underline{\Gamma} R_3) \right] \end{aligned} \quad (36a)$$

oraz

$$\underline{b}_e = I_1(\underline{\Gamma} R_3) K_1(\underline{\Gamma} R_2) - I_1(\underline{\Gamma} R_2) K_1(\underline{\Gamma} R_3) \quad (36b)$$

$$\underline{b}_e^* = I_1^*(\underline{\Gamma} R_3) K_1^*(\underline{\Gamma} R_2) - I_1^*(\underline{\Gamma} R_2) K_1^*(\underline{\Gamma} R_3) \quad (36c)$$

#### 4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Przykładowe obliczenia temperatury wykonane zostały dla kabla typu N2XS2Y 12/20 kV 1×500/50 przy założeniu [3]:  $\gamma_{Cu} = 55 \cdot 10^6 \frac{S}{m}$ ,

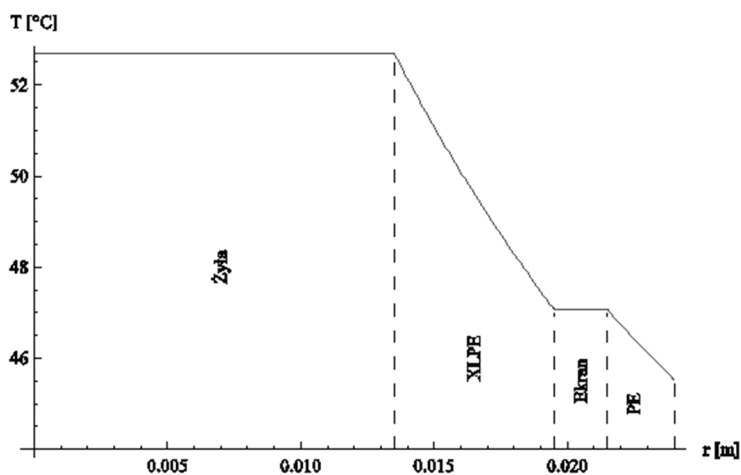
$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{H}{m}, \quad \alpha = 5 \frac{W}{m^2 K}, \quad T_0 = 20^\circ C, \quad \underline{I} = 750 A, \quad f = 50 Hz,$$

$$\lambda_I = \lambda_{III} = 400 \frac{W}{mK}, \quad \lambda_{II} = 0,2 \frac{W}{mK}, \quad \lambda_{IV} = 0,22 \frac{W}{mK} \quad \text{oraz} \quad R_1 = 0,0135 m, \\ R_2 = 0,0195 m, \quad R_3 = 0,0215 m, \quad R_4 = 0,024 m.$$

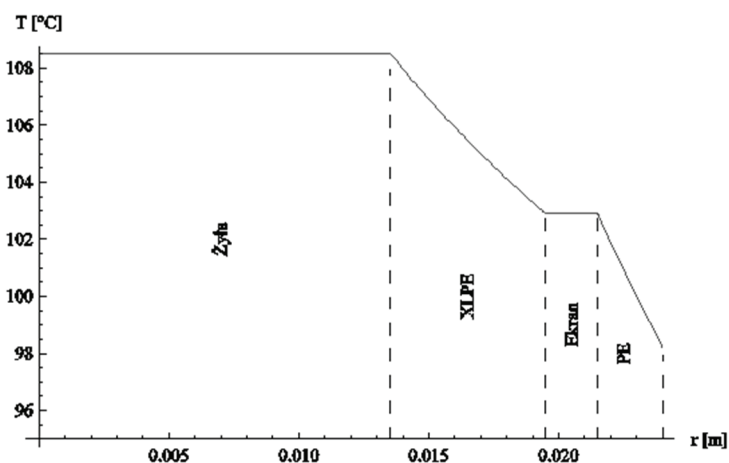
W przypadku kabla z izolowanym ekranem gęstości wewnętrznych źródeł ciepła wynoszą odpowiednio:  $q_V = 33587,51 \frac{W}{m^3}$  oraz  $q_{Ve} = 96,83 \frac{W}{m^3}$ , natomiast rozkład temperatury wzdłuż promienia przedstawiony jest na rysunku 5.

Z kolei dla kabla z prądem powrotnym w ekranie gęstości wewnętrznych źródeł ciepła wynoszą:  $q_V = 33587,51 \frac{W}{m^3}$  oraz  $q_{Ve} = 154232 \frac{W}{m^3}$ . Rozkład temperatury w takim kablu przedstawiony jest na rysunku 6.





Rys. 5. Rozkład temperatury w kablu N2XS2Y 12/20 kV 1×500/50 z izolowanym ekranem



Rys. 6. Rozkład temperatury w kablu N2XS2Y 12/20 kV 1×500/50 z prądem powrotnym w ekranie

## WNIOSKI

Zaprezentowana w pracy analityczna metoda wyznaczania strat mocy i temperatury w kablu elektroenergetycznym średniego napięcia może być pomocna podczas określania możliwości przesyłowych linii kablowych. W przedstawionej w pracy metodzie nie uwzględniono zmian parametrów fizycznych materiałów, z których wykonany jest kabel, wraz ze zmianą temperatury, nie mniej jednak zmiany te można uwzględnić wykonując obliczenia iteracyjnie. Ponadto w obliczeniach temperatury kabli należy uwzględnić straty dielektryczne w materiale

izolacji, bowiem ciepło jest generowane nie tylko na skutek strat mocy czynnej w żyły i ekranie kabla, ale również na skutek strat dielektrycznych. Formuły pozwalające na określenie strat dielektrycznych w materiale izolacji przedstawione są m.in. w pracy [1].

Z wykonanych w pracy przykładowych obliczeń (rys. 5 i 6) wynika, że temperatura kabla jest silnie uzależniona od wartości prądu w ekranie. Oznacza to, że podczas budowy linii kablowych należy unikać możliwości zwierania ekranów, gdyż mogą pojawić się w nich prądy powrotne o wartościach zbliżonych do prądów fazowych, a tym samym nastąpi znaczny wzrost temperatury kabli.

*Projekt finansowany w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019–2022 nr projektu 020/RID/2018/19, kwota finansowania 12 000 000 PLN.*

## LITERATURA

- [1] Domke K., Grzybowski A., Nadolny Z., Rakowska A., Siodła K., Wyznaczanie temperatury żyły roboczej kabla elektroenergetycznego wysokiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 86, nr 11b, 2010.
- [2] Grobicki J., Germata M., *Przewody i kable elektroenergetyczne*, WNT Warszawa 2012.
- [3] Kable do zastosowań w energetyce wiatrowej, Tele-Fonika Kable, [www.tfkable.com](http://www.tfkable.com).
- [4] Piątek Z., *Modelowanie linii, kabli i torów wieloprądowych*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2007.
- [5] Rakowska A., *Rozwój linii kablowych – a oczekiwania eksploatacyjne*, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3, s. 31–35, 2005.
- [6] Stępień J.C., *Metody analizy i oceny niezawodności kablowych układów zasilających średnich napięć*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2011.
- [7] Wiśniewski St., Wiśniewski T.S., *Wymiana Ciepła*, WNT, Warszawa, 2000.

## ANALYSIS OF THE POWER LOSSES AND TEMPERATURE OF THE MEDIUM VOLTAGE CABLE

The paper presents a mathematical model for determining power losses and temperature in a medium voltage cable. The exact determination of the power emitted in the cable and, consequently, its temperature is very complicated. The power losses generated in the cable depend on the current and voltage. Current-dependent losses refer to the heat generated in the cable's conductive elements (phase conductor and screen). In turn, the losses generated in the cable insulation are associated with the operating voltage. In the paper the power losses and cable temperature, excluding insulation losses were determined. The calculations were made for a cable with insulated shield and with return current in the shield. The calculations took into account the skin and proximity effects.

*(Received: 24.01.2020, revised: 09.03.2020)*