

Janusz TYKOCKI\*  
Andrzej JORDAN\*

## ANALIZA POLA TEMPERATURY UKŁADU TRÓJFAZOWEGO KABLI WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Zmodyfikowaną „zasadę Pareto” zastosowano do analizy pola temperatury w układach trójfazowych kabli wysokiego napięcia. Pole temperatury uzależniono od trzynastu parametrów, w których wyodrębniono wymiary geometryczne układu. Rozwiązując 2<sup>13</sup> razy równanie przewodnictwa cieplnego metodą elementów skończonych wyznaczono parametry należące do zbioru  $A$  mające decydujący wpływ na temperaturę żyły kabla. Do opisu zbiorów  $ABC$  zastosowano elementy algebry liniowej. W uwagach końcowych przedstawiono wstępną procedurę optymalizacji układu.

SŁOWA KLUCZOWE: *Reguła Pareto*, kabel wysokiego napięcia, układ trójfazowy, temperatura żyły

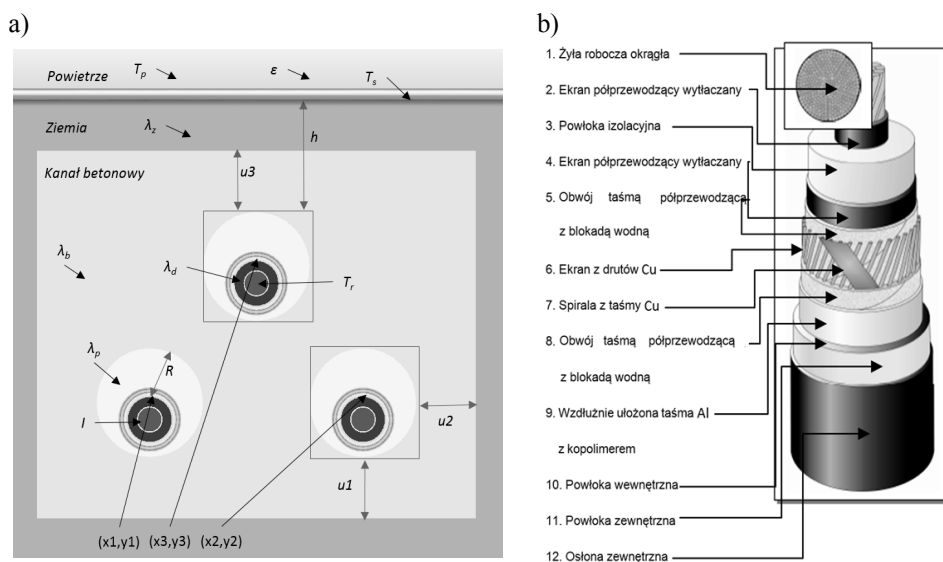
### 1. WSTĘP

Dystrybucja energii elektrycznej na terenach zurbanizowanych jest podstawową przyczyną stosowania kabli energetycznych umieszczanych pod powierzchnią ziemi. Maksymalna dopuszczalna temperatura żyły głównej kabla determinuje ilość energii dostarczanej przez trójfazowe linie kablowe.

W pracach [1, 2, 3] przedstawiono analizę wpływu parametrów trójfazowego układu kablowego wysokiego napięcia położonego w ziemi na temperaturę układu. W pracy [1] omówiono rozkład temperatury w żyłce kabla, ekranie i na jego powierzchni dla różnych odległości układu od powierzchni ziemi  $h$  oraz w zależności od przewodności cieplnej ziemi. W pracy [2] przedstawiono zastosowanie *Zasady Pareto* [8, 9] z wynikającymi z niej wykresami  $ABC$  do analizy pola temperatury w układzie pojedynczego kabla wysokiego napięcia umieszczonego na różnych głębokościach w ziemi. Analizowano wpływ kilku parametrów takich jak: temperatura powietrza nad powierzchnią ziemi  $T_p$ , przewodność cieplną ziemi  $\lambda_s$ , obciążenie prądowe  $I$  kabla na temperaturę żyły. W artykule [3] przedstawiono rozkład pola temperatury w układach trójfazowych wprowadzając dodatkowo wpływ przewodności cieplnej bloku betonowego  $\lambda_b$  oraz przewodność cieplną kanału powietrznego  $\lambda_p$ , w którym umieszczono kabel.

\* Państwowa Wyższa Szkoła Informatyki i Przedsiębiorczości w Łomży.

W niniejszej pracy rozszerzono zakres rozważań dotyczących układu trójfazowego kabli wysokiego napięcia o wpływ wymiarów geometrycznych układu na pole temperatury.



Rys. 1. a) Trójfazowy układ kablowy wysokiego napięcia (110 kV) ułożony w kanale betonowym, b) konstrukcja kabla miedzianego 64/110 kV [11]

Na rys. 1a zaznaczono parametry konstrukcyjne badanego układu. W tym przypadku  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  są odległościami bloku betonowego,  $R$  jest promieniem kanału powietrznego w bloku betonowym,  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  i  $(x_3, y_3)$  reprezentują współrzędne środków kanałów powietrznych, w których umieszczono kable. W badanym układzie założono:  $x_3 = x_2/2$  oraz  $\Delta w = x_2 = y_3$ ,  $x_1 = y_1 = y_2 = 0$ .

## 2. ANALIZA POŁA TEMPERATURY UKŁADU Z UWZGLĘDNIENIEM JEGO WYMIARÓW GEOMETRYCZNYCH

Ułożenie kabla w ziemi wymaga zastosowania pewnych zabezpieczeń przed uszkodzeniami mechanicznymi, gryzoniami, jak i nieświadomą ingerencją człowieka wynikającą z przeprowadzanych prac ziemnych. Umieszczenie kabli w kanele betonowym rozszerza zakres czynników wpływających na rozkład pola temperatury badanego układu do trzynastu pozycji.

W dotychczas analizowanych przypadkach podstawowymi parametrami mającymi decydujący wpływ na temperaturę żył, były: temperatura powietrza

nad powierzchnią ziemi  $T_p$ , przewodność cieplna ziemi  $\lambda_z$  oraz obciążalność prądowa kabli  $I$ .

W niniejszej pracy analizowano dodatkowo wpływ geometrii ułożenia kabli w bloku betonowym wypełnionym powietrzem lub częściowo wodą. Interesujące jest zbadanie wpływu odległości między żyłami na ich temperaturę. Do badań wykorzystano zmodyfikowaną autorską metodę analizy układów wieloparametrycznych, wynikającą z „zasady Pareto”, w której wykorzystuje się wykresy  $ABC$ , definiujące zbiory  $A$ ,  $B$ , i  $C$  mające decydujący, średni i minimalny wpływ na temperaturę żyły [2,7,8,9]. Opierając się na powyższej zasadzie zostanie przedstawiona analiza wpływu trzynastu parametrów występujących w układzie na temperaturę żył. Na podstawie poprzednich badań stwierdzono, że podstawowymi parametrami wpływającymi na temperaturę żyły były:  $T_p$ ,  $\lambda_z$  i  $I$ , przewodność cieplna dielektryka  $\lambda_d$  oraz bloku betonowego  $\lambda_b$ , przewodność cieplna kanału powietrznego  $\lambda_p$ , przewodność cieplna żyły kabla  $\lambda_{Cu}$ , konwekcyjny współczynnik wymiany ciepła nad powierzchnią ziemi  $\varepsilon$ . Do tych parametrów dochodzi pięć parametrów definiujących wymiary geometryczne układu:  $u_1, u_2, u_3$  – parametry definiujące odległości kanałów powietrznych od powierzchni bocznych bloku betonowego, promień kanałów powietrznych  $R$  i ich wzajemne położenie  $\Delta w$  (rys. 1a). Wobec tego temperatura żył  $T_r$  kabli w układzie trójfazowym zależy od następujących czynników:

$$T_r = f(\lambda_z, T_p, I, \varepsilon, \lambda_d, \lambda_{Cu}, \lambda_p, \lambda_b, u_1, u_2, u_3, R, \Delta w) \quad (1)$$

Do analizy układu trójfazowego wybrano kabel energetyczny produkowany przez Tele-Fonika Kable S. A. napięcie zmianowe 64/110 kV (IEC 60840) o następujących podstawowych parametrach: obciążalność prądowa długotrwała  $I = 1140$  A, maksymalna dopuszczalna temperatura żyły  $90^\circ\text{C}$ . Na rys. 1b przedstawiono konstrukcję kabla [11].

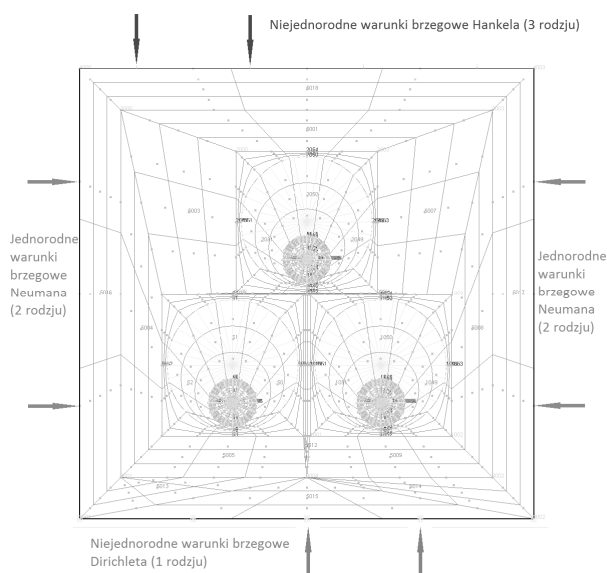
Pole temperatury w stanie ustalonym układu przedstawionego na rys. 1a jest opisane równaniem przewodnictwa cieplnego [4]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -\frac{g}{\lambda} \quad (2)$$

gdzie:  $g = j^2 \cdot \rho$  [ $\text{W}/\text{m}^3$ ] jest wydajnością przestrzennych źródeł ciepła w żyłach kabli,  $\lambda$  [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ] reprezentuje przewodność cieplną poszczególnych elementów układu, a  $T = T(x,y)$  rozkład temperatury w systemie.

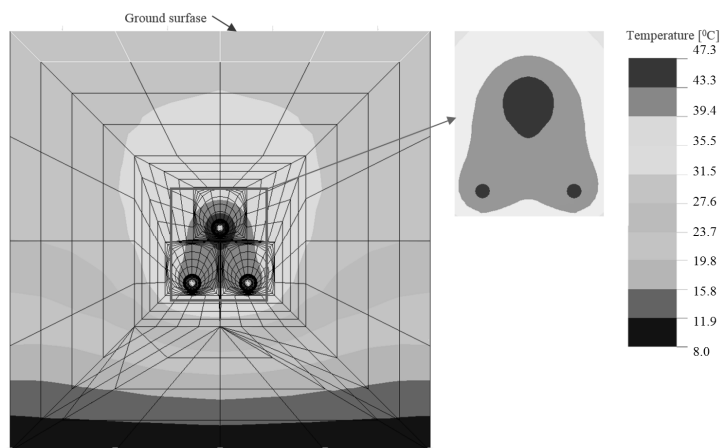
W celu przeprowadzenia analizy równanie (2) rozwiązano  $2p$  razy metodą elementów skończonych, przy czym  $p$  jest liczbą analizowanych parametrów [5]. W celu analizy równania (2) opracowano model numeryczny układu przedstawiony na rys. 2, gdzie zaznaczono również przyjęte do obliczeń warunki brzegowe dyskutowane w pracach [1, 2, 3], przyjmując na dolnej krawędzi  $T_0 = 8^\circ\text{C}$ . Na górnej krawędzi układu  $T_p$  i  $T_s$  są odpowiednio temperaturą powietrza i temperaturą powierzchni ziemi,  $\varepsilon$  [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ] jest

konwekcyjnym współczynnikiem wymiany ciepła (charakteryzującym prędkość wiatru nad powierzchnią ziemi [9]), rys. 1a.



Rys. 2. Trójfazowa linia kablowa wysokiego napięcia w bloku betonowym pod powierzchnią ziemi. Siatka modelu numerycznego układu z zaznaczonymi warunkami brzegowymi

Przykładowy rozkład temperatury w układzie położonym na głębokości 1 m, dla parametrów przedstawionych w tabeli 1 został przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Rozkład pola temperatury układu trójfazowego ( $h = 1\text{m}$ )

### 3. REGUŁA PARETO ORAZ WYKRESY ABC BADANEGO UKŁADU

Do analizy rozkładu temperatury w analizowanym systemie zastosowano zmodyfikowaną metodę opartą na „regule Pareto” [2, 7, 8]. Przyjęte zakresy zmian parametrów wpływających na temperaturę żyły kabla nazwano *zakresem zmian bazowych* analizowanych parametrów.

*Def. 1. Zmiany podstawowych parametrów mających wpływ na rozkład temperatury w żyłce kabla, wynikające ze zmiennych warunków fizycznych występujących w warunkach polskich lub założone zmiany procentowe wynikające z technologii produkcji nazywamy „zakresem zmian bazowych”.*

Występujący rozkład temperatury w żyłce kabla wysokiego napięcia ze względu na bardzo mały gradient jest charakteryzowany przez temperaturę maksymalną i nazywamy „temperaturą żyły kabla”.

Wykorzystując „regulę Pareto” oraz wykresy ABC przeprowadzono „Pareto – ABC” analizę badanego układu energetycznego stosując następujące zależności [2]:

$$T_{k,w} = \frac{T_{k,max} - T_{k,min}}{T_{k,max}}, \quad k = (1, \dots, p) \quad (3)$$

gdzie:  $T_{k,w}$  –względna temperatura żyły kabla górnego dla  $k$ -tego parametru,  $T_{k,max}$ ,  $T_{k,min}$  – odpowiednio, wartość max. i wartość min. temperatury żyły kabla, wynikająca z zakresu zmian bazowych parametrów.

$$T_s = \sum_k T_{k,w} = \sum_k \frac{T_{k,max} - T_{k,min}}{T_{k,max}} \quad (4)$$

przy czym  $T_s$  –jest sumą względnych zmian temperatury żyły.

$$S_k = \frac{T_{k,w}}{\sum_k T_{k,w}} \quad (5)$$

$S_k$  - element skumulowanej wartości temperatury będący jednocześnie współczynnikiem wagi  $b_k$ .

$$S = \sum_k S_k = \sum_k b_k = 1, \quad (6)$$

gdzie  $S$  jest skumulowaną względną wartością temperatury w żyłce kabla.

Do analizy pola temperatury w układzie przedstawionym na rys. 1a przyjęto wartości parametrów omówionych w tabeli 1, które są wartościami znamionowymi układu.

Głębokość umieszczenia systemu trójfazowego zmieniano od 1 do 20 m [2]. Zakres zmian bazowych parametrów przyjętych do obliczeń oraz oznaczenia poszczególnych parametrów  $a_k$  ( $k = 1, \dots, 13$ ) przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 1. Parametry przyjęte do analizy rozkładu pola temperatury w układzie trójfazowym

Symbol	Wartość	Jednostka	Parametr
$T_p$	+30	$^{\circ}\text{C}$	temperatura powietrza
$\lambda_z$	1	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	przewodność cieplna ziemi
$\varepsilon$	16,6	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	konwekcyjny współczynnik wymiany ciepła nad powierzchnią ziemi
$I$	1140	A	obciążalność długootrwała kabla
$\lambda_d$	3	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	przewodność cieplna dielektryka
$\lambda_{cu}$	360	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	przewodność cieplna żyły kabla
$\lambda_p$	0,6	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	przewodność cieplna kanału powietrznego [10]
$\lambda_b$	0,7	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	przewodność cieplna betonu [10]
$\rho_{Cu}$	1,75E-8	$\Omega\cdot\text{m}$	rezystywność miedzi
$R$	0,16	m	promień kanałów powietrznych
$x_2$	0,43	m	odległość geometryczna $x$ środka kanału powietrznego
$y_3$	0,43	m	odległość geometryczna $y$ środka kanału powietrznego
$u_1$	0,2	m	odległości kanałów powietrznych od powierzchni bocznych bloku betonowego - dolna
$u_2$	0,2	m	odległości kanału powietrznego od powierzchni bocznej bloku betonowego - boczna
$u_3$	0,2	m	odległość kanału powietrznego od powierzchni bocznej bloku betonowego - górna

Zmieniając ułożenie systemu kablowego pod powierzchnią ziemi w zakresie od 1 m do 20 m obliczono wartości skumulowane  $S$  oraz temperatury względne  $T_w$  według procedury opracowanej dla pojedynczego kabla ułożonego w ziemi [2] oraz wzorów (3)-(6). Na ich podstawie opracowano macierz  $\mathbf{B} = [b_{ij}]$ , gdzie  $i = 1, \dots, 7$  jest jednocześnie odległością  $h$  układu od powierzchni ziemi,  $j = 1, \dots, 13$  liczbą rozpatrywanych parametrów.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & a_8 & a_9 & a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 0,4138 & 0,0008 & 0,1179 & 0,2547 & 0,0079 & 0,0000 & 0,0669 & 0,1118 & 0,0044 & 0,0054 & 0,0065 & 0,0011 & 0,0087 \\ 0,3262 & 0,0009 & 0,1406 & 0,3018 & 0,0087 & 0,0000 & 0,0747 & 0,1203 & 0,0047 & 0,0059 & 0,0070 & 0,0012 & 0,0082 \\ 0,2730 & 0,0006 & 0,1548 & 0,3275 & 0,0091 & 0,0000 & 0,0796 & 0,1268 & 0,0050 & 0,0062 & 0,0087 & 0,0012 & 0,0074 \\ 0,2361 & 0,0005 & 0,1651 & 0,3450 & 0,0096 & 0,0000 & 0,0833 & 0,1321 & 0,0039 & 0,0065 & 0,0090 & 0,0013 & 0,0078 \\ 0,2066 & 0,0005 & 0,1712 & 0,3549 & 0,0116 & 0,0000 & 0,0854 & 0,1352 & 0,0053 & 0,0066 & 0,0106 & 0,0027 & 0,0093 \\ 0,1292 & 0,0002 & 0,1890 & 0,3826 & 0,0107 & 0,0000 & 0,0917 & 0,1494 & 0,0157 & 0,0072 & 0,0100 & 0,0014 & 0,0129 \\ 0,0762 & 0,0000 & 0,2024 & 0,4031 & 0,0116 & 0,0002 & 0,0972 & 0,1553 & 0,0169 & 0,0078 & 0,0108 & 0,0047 & 0,0139 \end{bmatrix} \begin{matrix} h_1 = 1\text{m} \\ h_2 = 2\text{m} \\ h_3 = 3\text{m} \\ h_4 = 4\text{m} \\ h_5 = 5\text{m} \\ h_6 = 10\text{m} \\ h_7 = 20\text{m} \end{matrix} \quad (7)$$

Współczynniki  $b_k$  są równe elementom skumulowanej wartości temperatury,  $b_k = S_k$  oraz  $\sum_k b_k = S = I$ . Należy zaznaczyć, że np. dla  $h_1 = 1$  m,  $b_1$  równe jest elementowi  $b_{11}$  macierzy  $\mathbf{B}$ , ( $b_1 = b_{11}$ ).

Przykładowe współczynniki wagi  $b_k$  oraz ich udział w skumulowanej wartości  $S$  przedstawiono poniżej dla  $h_2 = 2$  m. W nawiasach podano numer parametru (tabela 2):

$$S = \sum_k b_k = 0,3262(a_1) + 0,0009(a_2) + 0,1406(a_3) + 0,3018(a_4) + 0,0087(a_5) + 0,0000(a_6) + 0,0747(a_7) + 0,1203(a_8) + 0,0047(a_9) + 0,0059(a_{10}) + 0,0070(a_{11}) + 0,0012(a_{12}) + 0,0082(a_{13}) = 1.$$

Tabela 2. Zakres zmian bazowych parametrów dla trój-fazowego układu umieszczonego na głębokości od 1 m do 20 m

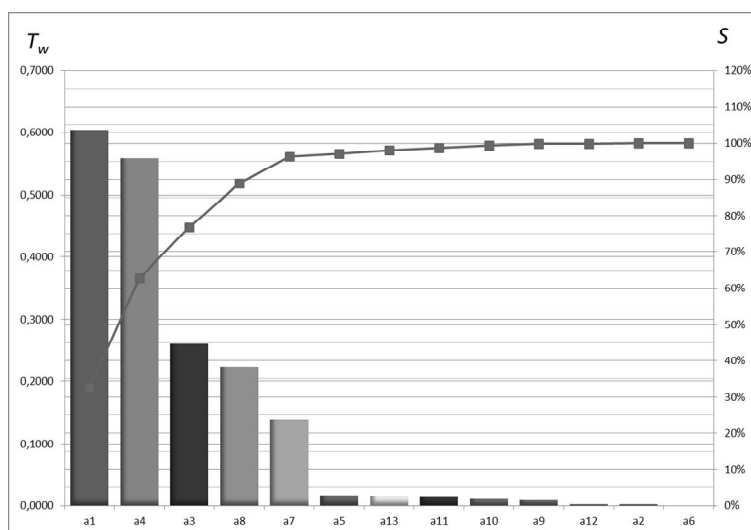
Parametr	Nazwa	Symbol	Jedn.	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
a1	temperatura powietrza	$T_p$	$^{\circ}\text{C}$	-30	+30
a2	konwekcyjny współczynnik wymiany ciepła [10]	$\varepsilon$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	16,6	150
a3	obciążalność długotrwała kabli	$I$	A	1026	1254
a4	przewodność cieplna ziemi	$\lambda_z$	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	0,2	1,4
a5	przewodność cieplna dielektryka	$\lambda_d$	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	2	5
a6	przewodność cieplna rdzenia kabla	$\lambda_{Cu}$	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	360	400
a7	przewodność cieplna betonu [6]	$\lambda_b$	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	0,7	1,4
a8	przewodność cieplna kanału powietrznego [6]	$\lambda_p$	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	0,2	1,4
a9	odległości geometryczne środków kanałów powietrznych $\Delta x$ [m](zmiana 20%)	$\Delta w$	m	0,36	0,5
a10	odległości kanałów powietrznych od powierzchni bocznych bloku betonowego - dolna	$u_1$	m	0,16	0,24
a11	odległości kanału powietrznego od powierzchni bocznej bloku betonowego - boczna	$u_2$	m	0,16	0,24
a12	odległość kanału powietrznego od powierzchni bocznej bloku betonowego - górna	$U_3$	m	0,16	0,24
a13	promień kanałów powietrznych	$R$	m	0,12	0,19

Przyjmując wartości  $b_k \leq 0.05$  i oznaczając je przez  $R$  otrzymujemy macierz  $B$  zawierająca wartości elementów zbiorów  $A$  i  $B$ .

$$\mathbf{B} = \begin{matrix} & a1 & a2 & a3 & a4 & a5 & a6 & a7 & a8 & a9 & a10 & a11 & a12 & a13 \\ \left[ \begin{array}{cccccccccccc} 0,4138 & 0 & 0,1179 & 0,2547 & 0 & 0 & 0,0669 & 0,1118 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,3262 & 0 & 0,1406 & 0,3018 & 0 & 0 & 0,0747 & 0,1203 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,2730 & 0 & 0,1548 & 0,3275 & 0 & 0 & 0,0796 & 0,1268 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,2361 & 0 & 0,1651 & 0,3450 & 0 & 0 & 0,0833 & 0,1321 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,2066 & 0 & 0,1712 & 0,3549 & 0 & 0 & 0,0854 & 0,1352 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1292 & 0 & 0,1890 & 0,3826 & 0 & 0 & 0,0917 & 0,1494 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0762 & 0 & 0,2024 & 0,4031 & 0 & 0 & 0,0972 & 0,1553 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] & \begin{array}{l} h_1 = 1\text{m} \\ h_2 = 2\text{m} \\ h_3 = 3\text{m} \\ h_4 = 4\text{m} \\ h_5 = 5\text{m} \\ h_6 = 10\text{m} \\ h_7 = 20\text{m} \end{array} \end{matrix} \quad (8)$$

$$S = \sum_k b_k + R = 0,3262 + 0,1406 + 0,3018 + 0,0747 + 0,1203 + R = 0,9635 + R \quad (9)$$

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykładowe wykresy  $ABC$  oraz krzywą Lorenza opracowane dla analizowanego układu na podstawie macierzy  $\mathbf{B}$  przy odległościach  $h$  od powierzchni ziemi równych 2 m i 10 m.

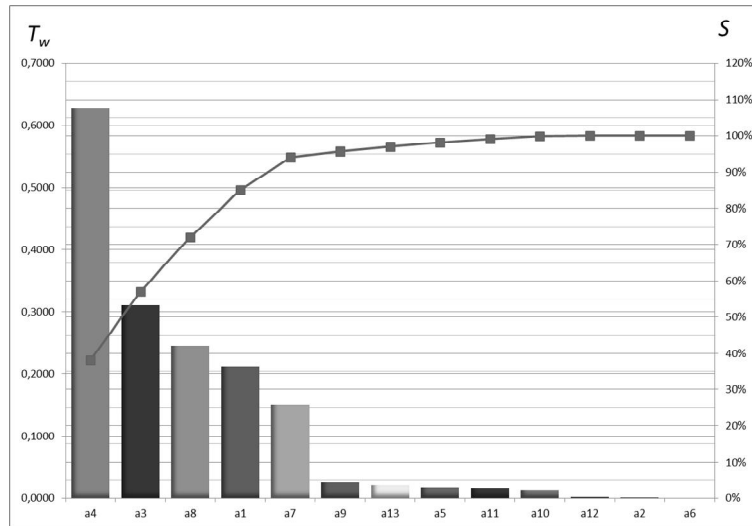


Rys. 4. Wykres  $ABC$  trój-fazowego układu kablowego umieszczonego na głębokości  $h = 2$  m

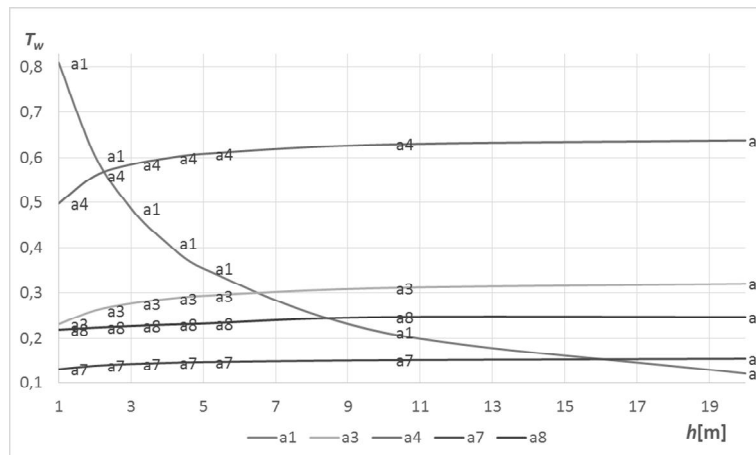
Należy zaznaczyć, że lewa skala rysunków dotyczy wykresów słupkowych temperatury względnej  $T_w$ , natomiast prawa dotyczy przyrostów wartości skumulowanej  $S$  wyrażonych przez  $S_k = b_k$  (przyrosty na krzywej Lorenza).

Wykresy względnych zmian temperatury  $T_w$  żyły kabla dla założonego zakresu zmian bazowych parametrów wymienionych w tabeli 2. i różnych wartości  $h$  przedstawiono na rys. 6. W celu przejrzystości rysunku, wykresy opracowano dla wybranych parametrów układu:  $a_1, a_4, a_3, a_7$  i  $a_8$ .



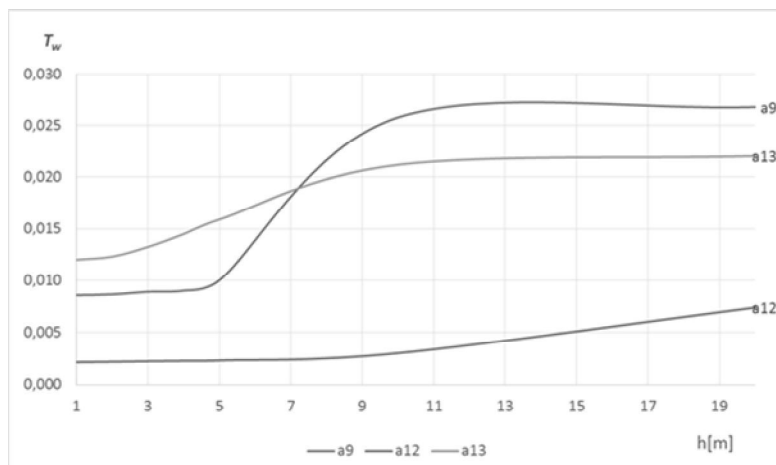


Rys. 5. Wykres ABC trój-fazowego układu kablowego umieszczonego na głębokości  $h = 10$  m



Rys. 6. Zależności względnych zmian temperatury żyły  $T_w$  w funkcji odległości układu kablowego od powierzchni ziemi dla parametrów ze zbiorów A i B

Analizując rys. 7 możemy zdefiniować zbiory  $A$ ,  $B$  i  $C$  w zależności od głębokości ułożenia systemu kablowego. Do głębokości 5 m zbiór  $A$  stanowią:  $a_1$  - temperatura nad powierzchnią ziemi oraz  $a_4$  - przewodność cieplna ziemi,  $A = \{a_1, a_4\}$ . Zbiór  $B$ :  $a_3$  - obciążalność długotrwała kabla,  $a_7$  - przewodność cieplna betonu,  $a_8$  - przewodność cieplna kanału powietrznego,  $B = \{a_3, a_7, a_8\}$ . Natomiast minimalny wpływ na temperaturę rdzenia kabla mają elementy zbioru  $C = \{a_2, a_5, a_6, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$ .



Rys. 7. Zależności względnych zmian temperatury żyły  $T_w$  w funkcji odległości układu kablowego od powierzchni ziemi dla parametrów  $\Delta w$  ( $a_9$ ,  $u_3(a_{12})$ ) i  $R(a_{13})$

Wraz ze wzrostem głębokości  $h$  powyżej 10m sytuacja ulega zmianie. Zbiór  $A$  zawiera przewodność cieplną ziemi, obciążalność długotrwałą kabla oraz przewodność cieplną kanału powietrznego,  $A = \{a_4, a_3, a_8\}$ , zbiór  $B$ : temperaturę powietrza, oraz przewodność cieplną bloku betonowego,  $B = \{a_1, a_7\}$ , natomiast zbiór  $C$  pozostaje bez zmian,  $C = \{a_2, a_5, a_6, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$ .

Badając wpływ parametru  $a_1$  (temperatura nad powierzchnią ziemi) możemy zauważyć jego decydującą rolę w układzie zbiorów  $A$  i  $B$ . Do głębokości  $h = 2,2\text{m}$  ma on największy wpływ na temperaturę żyły kabla. Powyżej tej głębokości obserwujemy zmianę - największy wpływ mają zmiany przewodności cieplnej ziemi (parametr  $a_4$ ).

Wpływ wybranych parametrów układu:  $a_9$  - odległości geometryczne środków kanałów powietrznych  $\Delta w$ ,  $a_{12}$  - szerokość kanału betonowego (górna) i  $a_{13}$  - promień kanałów powietrznych, związanych z geometrią i wymiarami kanału betonowego możemy zaobserwować na rys. 7. Wszystkie należą do zbioru  $C$  parametrów analizowanego systemu i wywierają minimalny wpływ na temperaturę żył kabli w całym zakresie głębokości ułożenia.

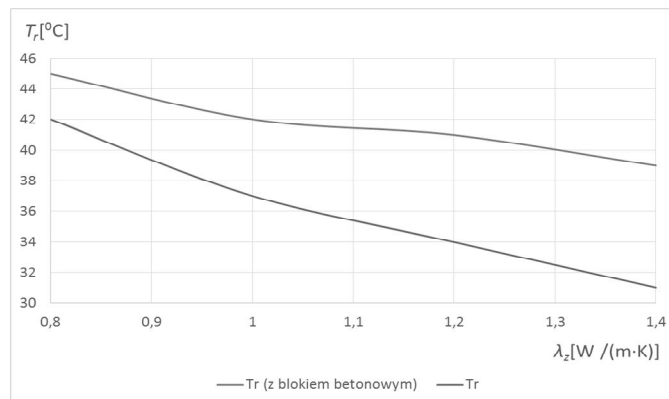
Analizując macierz (8) zauważamy, że na poszczególnych głębokościach  $h$  zasadniczy wpływ na temperaturę żyły kabla  $T_r$  ma pięć podstawowych parametrów: temperatura nad powierzchnią ziemi  $T_p$ , przewodność cieplna ziemi  $\lambda_z$ , obciążalność prądowa kabla  $I$ , przewodność cieplna kanału powietrznego  $\lambda_p$ , oraz przewodność cieplna betonu  $\lambda_b$ , czyli

$$T_r = f(T_p, \lambda_z, I, \lambda_p, \lambda_b) \quad (10)$$

przy czym kolejność poszczególnych elementów w zbiorach  $A$  i  $B$  zależy od głębokości  $h$  położenia układu.

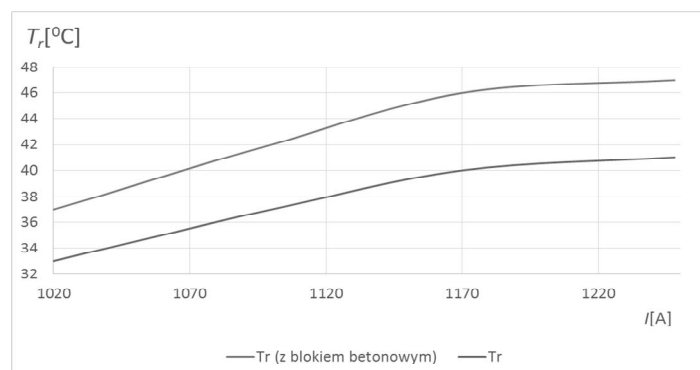
#### 4. PORÓWNANIE TEMPERATURY ŻYŁY KABLA UKŁADU TRÓJFAZOWEGO UMIESZCZONEGO BEZPOŚREDNIO W ZIEMI Z TEMPERATURĄ ŻYŁY POŁOŻONEJ W KANALE BETONOWYM

Na rys. 8 przedstawiono wpływ przewodności cieplnej  $\lambda_z$  zmienianej od 0,8 do 1,4 [W/(m·K)] na temperaturę żyły układu kablowego umieszczone w bloku betonowym oraz umieszczonego bezpośrednio w ziemi.



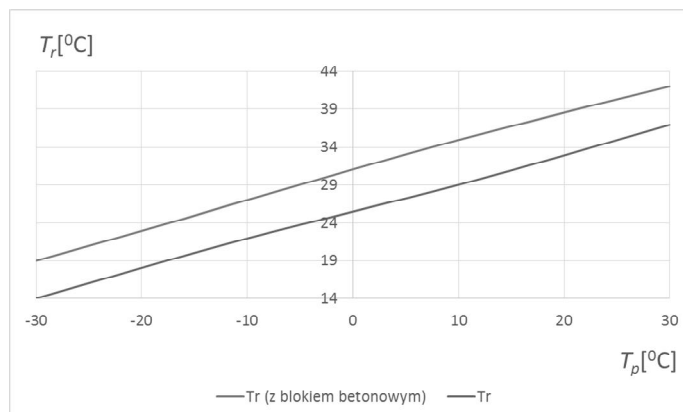
Rys. 8. Zmiany temperatury żyły  $T_r$  przy założonych zmianach przewodności cieplnej ziemi  $\lambda_z$  badanego układu umieszczonego w bloku betonowym oraz bezpośrednio w ziemi. Pozostałe parametry wg. tabeli 1,  $h = 1$  m

Rysunek 9 przedstawia zmiany temperaturę żyły układu kablowego umieszczonego w bloku betonowym oraz położonego bezpośrednio w ziemi, przy zmianie obciążenia długotrwałego kabla  $I$  w zakresie od 1026 A do 1254 A.



Rys. 9. Zmiany temperatury żyły  $T_r$  przy założonych zmianach obciążalności długotrwałej kabla  $I$  badanego układu umieszczonego w bloku betonowym i bezpośrednio w ziemi. Pozostałe parametry wg. tabeli 1,  $h = 1$  m

Wpływ temperatury powietrza  $T_p$  na temperaturę żyły układu kablowego umieszczonego w bloku betonowym oraz umieszczonego bezpośrednio w ziemi przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Zmiany temperatury żyły  $T_r$  przy założonych zmianach temperatury powietrza badanego układu umieszczonego w bloku betonowym oraz bezpośrednio w ziemi. Pozostałe parametry wg. tabeli 1,  $h = 1$  m

## 5. UWAGI I WNIOSKI

Wyniki uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań umożliwiają sformułowanie następujących wniosków:

- podstawowy wpływ na temperaturę żyły kabla układu trójfazowego umieszczonego w bloku betonowym pod powierzchnią ziemi mają:
  - temperatura powietrza nad powierzchnią ziemi,
  - przewodność cieplna ziemi,
  - obciążalność prądowa układu  $I$ ,
  - przewodność cieplna kanału powietrznego,
  - przewodność cieplna betonu,
- w analizowanym układzie na głębokości do 2,2 m zasadniczy wpływ na temperaturę rdzenia mają kolejno: temperatura powietrza nad powierzchnią ziemi oraz przewodność cieplna ziemi, poniżej głębokości 2,2 m występuje dominujący wpływ przewodności cieplnej ziemi. Na głębokości  $h = 10$  m następuje zmiana w elementach zbiorów  $A$  i  $B$  w stosunku do mniejszych głębokości, mianowicie  $A = \{a4, a3, a8\}$ ,
- i  $B = \{a1, a7\}$ ,
- minimalny wpływ na temperaturę rdzenia mają parametry charakteryzujące właściwości fizyczne materiałów użytych do konstrukcji kabla oraz

- współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła, charakteryzujący z pewnym przybliżeniem prędkość wiatru nad powierzchnią ziemi,
- parametry konstrukcyjne badanego układu:  $u_1, u_2, u_3, R, \Delta w$  - wszystkie należą do grubo  $C$  analizowanego systemu i wywierają minimalny wpływ na temperaturę żył kabli w całym badanym zakresie głębokości ich ułożenia,
  - różnica temperatur żył kabli w systemie z blokiem betonowym i kablami umieszczonymi bezpośrednio w ziemi w zależności od podstawowych parametrów ( $\lambda z, I, Tp$ ) waha się w granicach kilku stopni dla założonych zmian bazowych badanych parametrów.

Opracowana metoda analizy temperatury w układzie trójfazowym kabli wysokiego napięcia może zostać wykorzystana do wstępnej optymalizacji układu. Model optymalizacji jest następujący:

stosując algorytm genetyczny wyznaczamy

$$\min \frac{1}{3} \sum_k T_{r,l} \quad l = 1, \dots, 3$$

odnośnie do

$$\nabla^2 T = -\frac{g}{\lambda}, \quad \text{z założonymi warunkami brzegowymi}$$

$$m_k \leq p_k \leq n_k, \quad k = 1, \dots, s, \quad p_k \in A$$

$$T_r \leq 90^\circ C$$

gdzie:  $T_{r,l}$  jest temperaturą żył układu trój-fazowego,  $m_k$  i  $n_k$  określają zakres zmian bazowych poszczególnych parametrów,  $s$  jest liczbą elementów w zbiorze  $A$  z dodatkowo przyjętą odległością  $h$  układu od powierzchni ziemi.

W poszczególnych krokach algorytmu analizy pola temperatury wykorzystano profesjonalny program NISA/Heat Transfer wykorzystujący w obliczeniach metodę elementów skończonych (MES), stosując dodatkowo „makro-definicje”.

## LITERATURA

- [1] Tykocki J., Yong Yue, Jordan A.: „Analysis of thermal field in 110 kV cable systems”, *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 142-145, 06/2012.
- [2] Tykocki J., Jordan A.: „Pareto - ABC Analysis of High Voltage Single Core Cable Temperature”, *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 172-178, 10/2014.
- [3] Tykocki J., Jordan A., Surowik D.: “Pareto - ABC Analysis of Temperature Field in High Voltage Three-Phase Cable Systems” *Przegląd Elektrotechniczny*, (przyjęty do druku).
- [4] Kącki E. „Równania różniczkowe cząstkowe w elektrotechnice”, WNT Warszawa 1992.

- [5] Zienkiewicz, O.C.; Taylor, R.L.; Zhu, J.Z. „The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals” Butterworth-Heinemann, 2005
- [6] Kmiec A. „Procesy cieplne i aparaty” Politechnika Wroclawska 2005
- [7] Bowersox D.J., Closs D.J., Cooper M.B.: ”Supply chain logistics management”, Mc Graw-Hill, 2007.
- [8] Ultsch A.: ”Proof of Pareto’s 80/20 Law and Precise Limits for ABC-Analysis”, Technical Report 2002/c, University of Marburg- Germany,2002.
- [9] Motadel M.R.,Eshlagy A.T.,Ghasemi S.: ”The Presentation of a Mathematical Model to Assess and Control the Inventory Control System Through ABC Analysis Approach”, International Journal of Information, Security and Systems Management, Vol.1,No.1, pp. 1-13, 2012.
- [10] Moon P.,Spencer D.E., „Teoria pola”, PWN, Warszawa (1966)
- [11] Produkty firmy TELE-FONIKA Kable S.A .<http://www.tfkable.com/pl/katalog-on-line.html>

#### **INVESTIGATION OF TEMPERATURE FIELD IN A 3-PHASE HIGH VOLTAGE CABLE SYSTEM**

A modified "Pareto principle" has been applied to the analysis of the temperature field in three-phase high-voltage cables. In the paper the temperature field is described by thirteen distinct parameters including the geometrical dimensions of the system. By solving the thermal conductivity equation  $2p$  times, it is possible to determine the parameters belonging to set  $A$ , which exert a decisive influence on the temperature of the cable core. To describe the  $ABC$  sets elements of linear algebra are applied. The paper’s concluding notes present a preliminary optimization procedure of the system.