

Wpływ skrzyżowania linii kablowych wysokiego napięcia 110 kV na ich długotrwałą obciążalność prądową

Streszczenie. Niniejszy artykuł dotyczy skomplikowanego przypadku wzajemnego skrzyżowania się linii kablowych wysokiego napięcia 110 kV. W artykule przedstawiono praktyczne aspekty wyboru metod obliczeniowych wraz z opisem ich istotnych ograniczeń. Wybór metody obliczeniowej uzależniony jest od stopnia skomplikowania rozpatrywanego przypadku i zależy przede wszystkim od właściwości termicznych środowiska pracy linii kablowych oraz od liczby krzyżowanych obwodów kablowych. Ilość generowanego ciepła przez krzyżujące się linie kablowe, pionowa odległość między obwodami i kąt skrzyżowania są głównymi parametrami mającymi wpływ na ich długotrwałą obciążalność prądową. Wybór właściwej metody obliczeniowej oraz zastosowanie odpowiednich rozwiązań projektowych i wykonawczych umożliwia minimalizację wzajemnego cieplnego oddziaływania krzyżujących się linii kablowych na ich długotrwałą obciążalność prądową.

Abstract. This paper discusses a complicated case of an intersection of buried 110 kV high voltage cable lines. Practical aspects of choosing computational methods with brief description of their important limitations are discussed in the paper. Choice of the method depends on the complexity level of an intersection in which major factors are thermal properties of the crossing surroundings and number of crossed circuits. An amount of heat generated by the intersection, vertical distance between circuits and angle at which those circuits are crossed are main factors which have influence on the steady state ampacity. Choice of the computational method, design and implementation solutions are crucial to minimise mutual heating influence of crossing buried cable lines on their steady state ampacity. (Influence of crossing buried 110 kV high voltage cable lines on their steady state ampacity)

Słowa kluczowe: linie kablowe wysokiego napięcia, obciążalność prądowa, skrzyżowanie linii kablowych z zewnętrznymi źródłami ciepła.

Keywords: electric power cables, calculation of the current rating, cables crossing external heat sources.

Wstęp

W ostatnim czasie obserwujemy znaczący rozwój sieci kablowych wysokiego napięcia 110 kV wśród operatorów sieci dystrybucyjnych, głównie na terenach aglomeracji miejskich gdzie coraz częściej linie kablowe wypierają linie elektroenergetyczne w wykonaniu napowietrznym z uwagi na brak dostępności wolnego terenu. Ponadto, wzrost liczby linii kablowych wysokiego napięcia oraz ograniczone możliwości zajęcia terenu pod budowę wiążą się z koniecznością układania w jednym wykopie równolegle kilku obwodów, a w wyjątkowych przypadkach również skrzyżowań linii kablowych wysokiego napięcia.

Ocena wpływu krzyżujących się linii kablowych na ich długotrwałą obciążalność prądową wiąże się z wyborem odpowiedniej metody obliczeniowej. Natomiast przyjęcie właściwych rozwiązań projektowych umożliwi minimalizację wzajemnego wpływu krzyżujących się obwodów.

Przedstawienie sytuacji projektowej

Rozpatrywane skrzyżowanie dotyczy 4 linii kablowych 110 kV operatora sieci dystrybucyjnej, oznaczonego jako system dolny, z dwoma liniami kablowymi 110 kV operatora sieci przesyłowej, oznaczonych jako system górny.

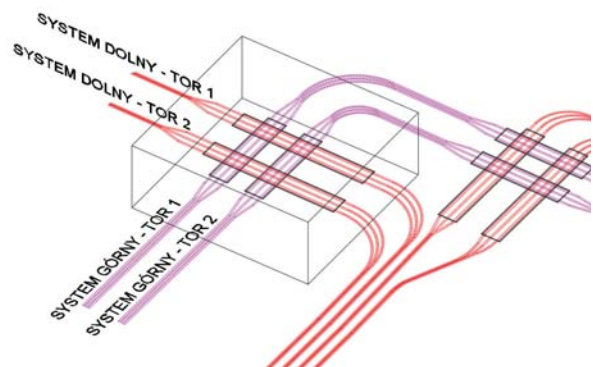
Opis krzyżujących się systemów kablowych:

a) Systemy kablowe dolne składają się z czterech niezależnych linii kablowych o założonej obciążalności prądowej każdej linii na poziomie 810 A. Linie kablowe stanowią wyprowadzenie mocy z rozdzielni R110 kV stacji elektroenergetycznej w kierunku głównych punktów zasilania – typ kabla 4x3x1 XRUHKXS RMC 1000/200 mm².

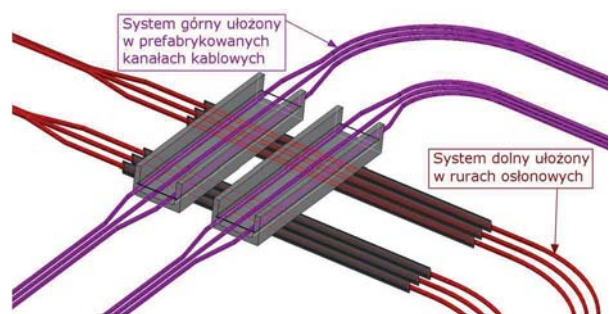
b) System kablowy górny stanowi wyprowadzenie mocy z autotransformatora o łącznej mocy 450 MVA. Zastosowano układ 2 kabli na każdą fazę. Założona sumaryczna obciążalność prądowa linii kablowej systemu górnego na poziomie 2800 A - typ kabla 2x3x1 XRUHKXS RMS 2000/340 mm².

Wybór przyjętych rozwiązań projektowych poprzedzony został przeprowadzeniem szeregu analiz oraz wstępnych obliczeń obciążalności prądowej długotrwałej projektowanych linii kablowych, zgodnie z IEC [4]. Głównym powodem zastosowania poniższych środków technicznych była minimalizacja wzajemnego oddziaływania krzyżowanych linii kablowych przy zachowaniu założonych zdolności przesyłowych linii kablowych 110 kV.

Na poniższych rysunkach nr 1 i nr 2 przedstawiono widok sytuacyjny przedmiotowego skrzyżowania wraz z układem przestrzennym.



Rys.1. Widok skrzyżowania linii kablowych systemu górnego (kolor fioletowy) z systemami dolnymi (kolor czerwony)



Rys.2. Widok przestrzenny zastosowanych rozwiązań w miejscu skrzyżowania

Przedstawienie przyjętych rozwiązań technicznych:

a) Rozdzielono cztery obwody równoległych linii kablowych systemu dolnego na dwie grupy po dwa obwody, tak aby skrzyżowanie z dwoma obwodami systemu górnego wykonać w dwóch oddalonych od siebie miejscach.

b) Linie kablowe systemu dolnego umieszczono w rurach osłonowych, wypełnionych zaczynem cementowo-wapiennym, w otulinie mieszanki piaskowo-cementowej, zagłębionych na głębokość około 1,5 m.

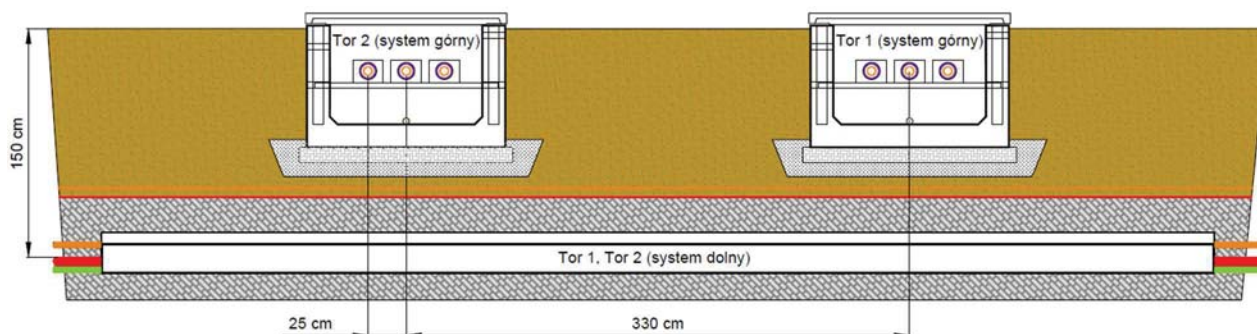
c) Linie kablowe systemu dolnego rozsunięto osiowo na odległość 4 m, a odległości międzyfazowe w każdej linii wynoszą 60 cm.

d) Linie kablowe systemu górnego, w miejscu skrzyżowania, umieszczono w prefabrykowanych, betonowych kanałach kablowych z otworami wentylacyjnymi. Linie kablowe systemu górnego rozsunięto osiowo na

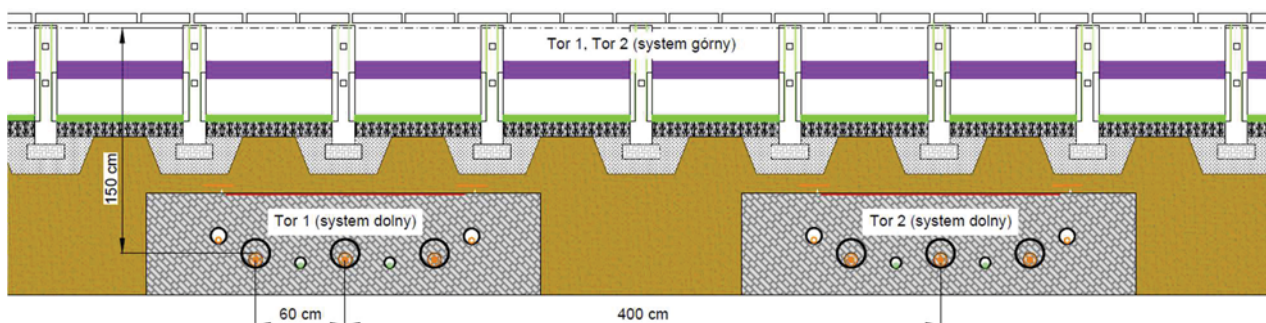
odległość 3,3 m, a odległości międzyfazowe w każdej linii wynoszą 25 cm.

e) Kąt skrzyżowania linii kablowych systemu górnego i dolnego wynosi 90°.

Przyjęte rozwiązania techniczne przedstawiono na poniższych rysunkach nr 3 i nr 4.



Rys.3. Widok przekroju poprzecznego rozpatrywanego skrzyżowania linii kablowych



Rys.4. Widok przekroju podłużnego rozpatrywanego skrzyżowania linii kablowych

Wybór metody obliczeniowej

Wybór metody obliczeniowej, mającej na celu wyznaczenie wielkości wzajemnego oddziaływania krzyżujących się linii kablowych, uzależniony jest od stopnia skomplikowania rozpatrywanego przypadku. Stopień skomplikowania zależy przede wszystkim od właściwości termicznych środowiska pracy linii kablowych oraz od liczby krzyżowanych obwodów kablowych.

Kiedy dwa obwody krzyżują się wzajemnie, każdy z nich zachowuje się jak źródło ciepła dla drugiego. Ilość generowanego ciepła, pionowa odległość między obwodami i kąt skrzyżowania są głównymi parametrami mającymi wpływ na ocenę wzajemnego oddziaływania.

Obliczenia wzajemnego oddziaływania krzyżujących się linii kablowych można wykonać w oparciu o model obliczeniowy przedstawiony w normie międzynarodowej IEC Standard 60287-3-3 "Electric cables - Calculation of the current rating - Part 3-3: Sections on operating conditions - Cables crossing external heat sources" z 2007 r. [4]. Przedstawiona w dokumencie [4] metoda pozwala na obliczanie obciążalności prądowej kabli elektroenergetycznych przecinających się pod zadanym kątem, ale z pewnymi istotnymi ograniczeniami. Najważniejszym z nich to założenie, że krzyżowane kable ułożone są w jednorodnym środowisku. Jest to o tyle istotne, iż w rzeczywistych układach pracy linii najczęściej jest inaczej, z uwagi na chociażby konieczność lokalnej wymiany gruntu i zastąpienia go mieszkanką betonitową lub zastosowanie rur osłonowych w miejscach skrzyżowania linii

kablowych z innym uzbrojeniem podziemnym [10]. Metoda obliczeniowa, przedstawiona w IEC 60287-3-3 [4], jest wykorzystywana z powodzeniem do obliczeń wstępnych, których podstawowym celem jest wyznaczenie szacunkowej wielkości oddziaływania oraz kierunku poszukiwania rozwiązań technicznych minimalizujących wzajemny wpływ linii kablowych. Wstępne obliczenia wykonywane są przy założeniu jednorodności środowiska krzyżujących się linii.

Obliczenia wzajemnego oddziaływania krzyżujących się linii kablowych można również wykonać z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania typu CYMCAP wyposażonego w dodatkowy moduł *Circuits Crossing (Xing)*, oparty na standardzie [4]. Program pozwala na obliczanie obciążalności prądowych linii kablowych dla prostych przypadków skrzyżowań o liczbie dwóch przecinających się obwodów z jednym kablem na fazę, ułożonych w jednorodnym środowisku.

W sytuacjach skomplikowanych, do których zaliczamy skrzyżowania wielotorowe ułożone w niejednorodnym środowisku, można stosować modyfikację modelu obliczeniowego zawartego w [4] lub wykonać obliczenia numeryczne, z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

W sytuacjach, gdy brak jest szczegółowych informacji na temat warunków pracy krzyżujących się linii kablowych stosowane jest podejście konserwatywne, które zakłada wykonanie obliczeń jak dla obwodów ułożonych równolegle. Takie założenie pociąga za sobą konieczność przyjęcia do obliczeń zerowego kąta skrzyżowania linii kablowych,

a w efekcie do wyznaczenia ich maksymalnego wzajemnego oddziaływania. Konserwatywne podejście obliczeniowe obarcza koniecznością stosowania wysokich współczynników zmniejszających obciążalność prądową dla wszystkich krzyżowanych linii kablowych. Wartości współczynników redukcyjnych kształtują się na poziomie 0,6 - 0,9 w zależności od warunków pracy linii kablowych, a w szczególności od liczby obwodów, sposobu ułożenia i wzajemnych odległości pomiędzy poszczególnymi liniami kablowymi.

W poniższej tabeli przedstawiono porównawcze zestawienie najważniejszych ograniczeń wynikających z przyjętej metody obliczeniowej.

Tabela 1. Zestawienie porównawcze metod obliczeniowych

	Środowisko			
	jednorodne		niejednorodne	
	Skrzyżowanie			
	jedno-torowe	wielo-torowe	jedno-torowe	wielo-torowe
IEC 60287-3-3 [4]	+	+	-	-
CYMCAP Circuits Crossing (Xing)	+	-	-	-
Metoda elementów skończonych (FEM)	+	+	+	+

Przedstawienie metody obliczeniowej zgodnej z normą IEC 60287-3-3 [4]

Poniżej przedstawiono sposób postępowania dla wyznaczenia wartości współczynnika redukcyjnego obciążalności prądowej linii kablowej.

$$(1) DF = \sqrt{1 - \frac{\Delta\theta(0)}{\Delta\theta_{\max} - \Delta\theta_d}}$$

gdzie: DF – współczynnik redukcyjny obciążalności długotrwałej linii kablowej. Dla rozpatrywanego kabla, współczynnik ten jest mnożony przez obciążalność prądową tego kabla obliczaną z pominięciem przecinającego go drugiego źródła ciepła. $\Delta\theta(0)$ – przyrost temperatury w linii kablowej na skutek skrzyżowania ze źródłem ciepła w punkcie skrzyżowania, $\Delta\theta_{\max}$ – maksymalny dopuszczalny przyrost temperatury w linii kablowej, $\Delta\theta_d$ – przyrost temperatury w linii kablowej wskutek strat dielektrycznych.

$$(2) \Delta\theta(0) = \sum_{h=1}^k T_{mh} \times W_h$$

gdzie: T_{mh} – wzajemna rezystancja cieplna pomiędzy rozpatrywaną linią kablową a analizowanym źródłem ciepła, W_h – ciepło generowane przez zewnętrzne źródło ciepła, k – liczba źródeł ciepła krzyżujących rozpatrywany kabel.

$$(3) T_{mh} = \frac{\rho \times (e^{\gamma \times \Delta z} - 1)}{4\pi} \times \sum_{v=1}^N e^{-v \times \gamma \times \Delta z} \times \ln \frac{(L + L_h)^2 + [(|z_r - z_h| + v \times \Delta z) \times \sin \beta_h]^2}{(L - L_h)^2 + [(|z_r - z_h| + v \times \Delta z) \times \sin \beta_h]^2}$$

gdzie: ρ – rezystywność cieplna gruntu, γ – współczynnik tłumienia energii cieplnej, Δz – długość analizowanego odcinka, N – liczba iteracji dyskretyzacji przestrzennej, L – głębokość położenia linii kablowej, L_h – głębokość położenia źródła ciepła, z_r – rzędna najgorętszego punktu

linii kablowej, z_h – rzędna źródła ciepła, β_h – kąt skrzyżowania.

Współczynnik tłumienia obliczany jest ze wzoru:

$$(4) \gamma = \sqrt{(1 - \Delta W \times T) \times \frac{T_L}{T_r}}$$

gdzie: ΔW – inkrementalne ciepło generowane wskutek zmiany rezystancji w żyłce roboczej linii kablowej, T – zastępcza rezystancja cieplna kabla w odniesieniu do żyły roboczej, T_L – rezystancja cieplna wzdłużna żyły roboczej, T_r – całkowita rezystancja cieplna kabla w odniesieniu do żyły roboczej.

$$(5) T = T_1 + n \times [(1 + \lambda_1) \times T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \times (T_3 + T_4)]$$

gdzie: λ_1 – stosunek strat całkowitych w powłokach metalicznych (żyłce powrotnej) do całkowitych strat w żyłce roboczej (współczynnik strat w żyłce powrotnej), λ_2 – stosunek całkowitych strat w pancerzu do całkowitych strat w żyłce roboczej (współczynnik strat w pancerzu), T_1 – rezystancja cieplna pomiędzy żyłą boczną a żyłą powrotną kabla, n – liczba żył roboczych w kablu, T_2 – rezystancja cieplna między żyłą powrotną a pancerzem kablowym, T_3 – rezystancja cieplna zewnętrznej osłony ochronnej, T_4 – rezystancja cieplna ośrodka otoczenia (stosunek wzrostu temperatury powierzchni kabla powyżej temperatury otoczenia do strat na jednostkę długości).

$$(6) T_L = \frac{\rho_{cr}}{A \cdot 10^{-6}}$$

gdzie: ρ_{cr} – rezystywność cieplna żyły roboczej, A – pole przekroju żyły roboczej.

$$(7) T_r = T_1 + n \cdot (T_2 + T_3 + T_4)$$

W pierwszej iteracji wzoru (2) przyjmuje się:

$$(8) \Delta\theta(0) = \frac{\rho}{4 \times \pi} \times \sum_{h=1}^k W_h \times \ln \frac{(L + L_h)^2 + (z_r - z_h)^2}{(L - L_h)^2 + (z_r - z_h)^2}$$

Kolejne składniki współczynnika redukcyjnego DF zdefiniowane są wzorami:

$$(9) \Delta\theta_d = W_d \times \left[\frac{T_1}{2} + n \times (T_2 + T_3 + T_4) \right]$$

gdzie: W_d – straty dielektryczne na jednostkę długości.

$$(10) \Delta W = \Delta W_0 \times \left[1 - \frac{\Delta\theta(0)}{\Delta\theta_{\max} - \Delta\theta_d} \right]$$

gdzie: ΔW – inkrementalne ciepło generowane wskutek zmiany rezystancji w żyłce roboczej (przyrost ciepła). Współczynnik ΔW_0 w równaniu (10) obliczany jest ze wzoru:

$$(11) \Delta W_0 = \frac{R \times \alpha_{20} \times I^2}{1 + \alpha_{20} \times (\theta_{\max} - 20)}$$

gdzie: R – rezystancja żyły roboczej w temperaturze 20 °C, α_{20} – współczynnik temperaturowy rezystywności elektrycznej dla materiału przewodzącego, I – maksymalny dopuszczalny prąd dla rozpatrywanej linii kablowej, θ_{\max} – maksymalna dopuszczalna temperatura żyły roboczej.

Przedstawienie założeń do obliczeń

Założenia przyjęte do obliczeń, dla przedmiotowego skrzyżowania, określone zostały na podstawie wymagań Inwestora z uwzględnieniem przyjętych rozwiązań projektowych:

- Wymagana obciążalność prądowa linii kablowej dla systemu górnego na poziomie 2800 A oraz 3200 A przy dwugodzinnym przeciążeniu.
- Wymagana obciążalność prądowa linii kablowej dla systemu dolnego na poziomie 810 A, dla każdej z czterech linii.
- Maksymalna temperatura żyły roboczej systemu górnego i dolnego w warunkach normalnej pracy to 90 °C oraz 105 °C w stanie dwugodzinnego przeciążenia dla systemu górnego.
- Współczynnik zmienności obciążenia dla wszystkich linii kablowych równy 1,0 (100%).
- Rezystywność betonitu jak i gruntu otaczającego równa 1,0 K·m/W.
- Temperatura otoczenia gruntu wynosi 20 °C.
- Temperatura otoczenia powietrza 30 °C.
- Wszystkie kable mają jednostronne uziemienie żył powrotnych.



Rys.5. Widok zakończenia linii kablowych na terenie stacji elektroenergetycznej – linie kablowe systemu górnego



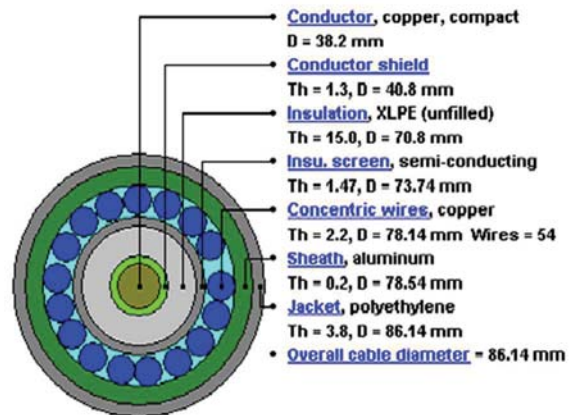
Rys.6. Widok wykopu kablowego dla czterech linii kablowych 110 kV

Analiza i dyskusja wyników

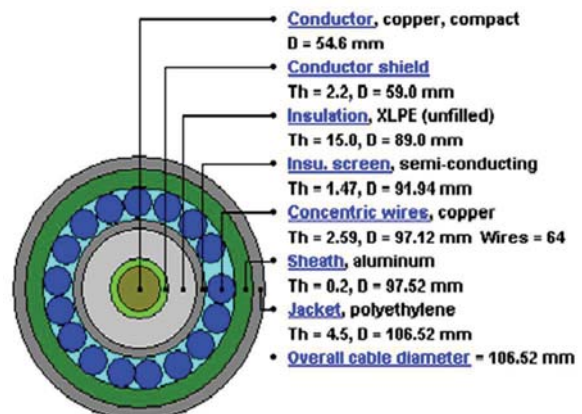
Ze względu na skomplikowane ułożenie rozpatrywanych linii kablowych, obliczenia wykonano w oparciu o metodę

numeryczną. W prostszych przypadkach przecięcia linii kablowej z innymi źródłami ciepła, obliczenia można wykonać metodą podaną w standardzie IEC [4].

Obliczenia wykonane zostały dla konstrukcji kabli pokazanych na rysunkach nr 7 i nr 8. Pole rozkładu temperatury w okolicach skrzyżowania linii kablowych zostało obliczone przy użyciu metody elementów skończonych. Rozkład ten pokazany jest na rysunkach nr 9 i nr 10.



Rys.7. Budowa konstrukcji kabla systemu dolnego typ XRUHKXS RMC 1000/200 mm² udostępniona przez producenta TFkable [11]



Rys.8. Budowa konstrukcji kabla systemu górnego typ XRUHKXS RMS 2000/340 mm² udostępniona przez producenta TFkable [11]

Uzyskane wyniki pozwalają na określenie spełnienia założeń projektowych w zakresie zachowania wymaganych, przez właścicieli linii, obciążalności prądowych oraz dopuszczalnych warunków bezpiecznej pracy linii kablowej.

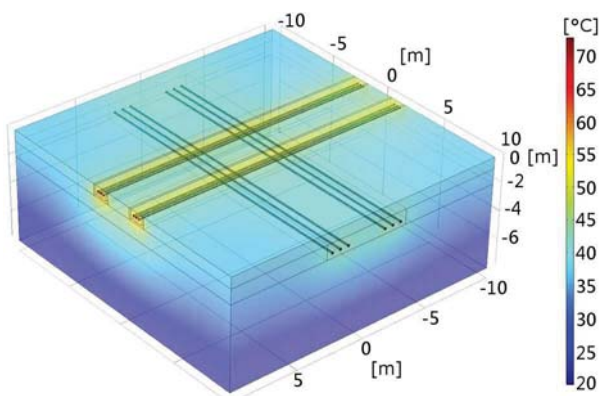
W poniższej tabeli przedstawiono zestawienie porównawcze uzyskanych wyników obliczeń cieplnych.

Tabela 2. Obliczone temperatury żył roboczych przy zadanym obciążeniu prądowym

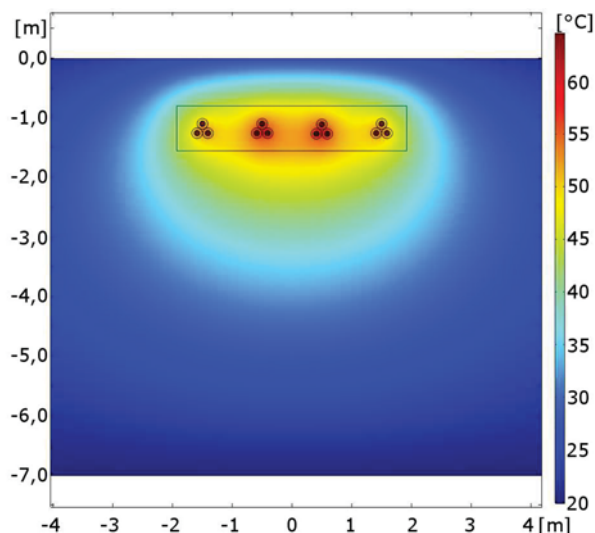
	Obciążenia znamionowe obydwu systemów		Przeciążenie 2h systemu górnego	
	I _d = 810 A	I _g = 2800 A	I _d = 810 A	I _g = 3200 A
System górny	67 °C		72 °C	
System dolny	72 °C		73 °C	

Temperatury żył roboczych poszczególnych systemów przedstawione w tabeli reprezentują wartości dla najcieplejszego kabla danego systemu.

Przyrost temperatury otoczenia krzyżujących się linii kablowych, a w konsekwencji wzrost temperatury w żyłach roboczych rozpatrywanych obwodów, stanowi podstawę do oceny wpływu na ich długotrwałą obciążalność prądową.



Rys.9. Rozkład pola temperatury w okolicy skrzyżowania linii kablowych



Rys.10. Rozkład pola temperatury 4 torów linii kablowych systemu dolnego ułożonych równolegle w jednym wykopie

Wnioski

Wybór metody obliczeniowej oraz zastosowanie odpowiednich rozwiązań projektowych i wykonawczych umożliwia dobór optymalnego przekroju poprzecznego żyły roboczej, krzyżowanych linii kablowych, co wiąże się bezpośrednio z poszanowaniem racjonalnego wykorzystania surowców naturalnych. W celu uzyskania oceny wzajemnego oddziaływania cieplnego można wykorzystać algorytm analityczny przedstawiony w [4] w przypadku linii kablowych ułożonych w jednorodnym środowisku, a w bardziej skomplikowanych sytuacjach używa się metod numerycznych. Zastosowanie jednej lub drugiej metody daje bardziej realistyczne obciążenia i znacznie niższe temperatury niż przy podejściu konserwatywnym, zakładającym równoległe ułożenie obwodów. Konsekwencją podejścia konserwatywnego jest uwzględnienie maksymalnego oddziaływania termicznego, które bardzo często nie odpowiada rzeczywistej sytuacji projektowej i prowadzi do nieuzasadnionego technicznie zwiększania przekroju żyły roboczej linii kablowej. Dodatkowo uwzględnienie rzeczywistego kąta skrzyżowania

w obliczeniach umożliwia dalszą optymalizację doboru przekroju żyły roboczej linii kablowej.

Zastosowane rozwiązania projektowe, przedstawione w rozpatrywanym przypadku, znajdują potwierdzenie swojej słuszności w przeprowadzonym procesie obliczeniowym. Zastosowanie prefabrykowanych kanałów kablowych w miejscu skrzyżowania linii kablowych i umieszczenie w nich linii kablowych systemu górnego pozwoliło na skuteczne odseparowanie cieplne wzajemnie oddziaływujących na siebie systemów. W konsekwencji zastosowanych rozwiązań technicznych wpływ linii górnego systemu, znajdującego się w stanie awaryjnego przeciążenia, nie powoduje istotnego wzrostu temperatury linii kablowych systemu dolnego przy zadanym obciążeniu. Głównym powodem takiego stanu jest bardzo duża konwekcja cieplna powietrza, zapewniająca szybką wymianę generowanego ciepła z otoczeniem poprzez otwory wentylacyjne płyt kanałów kablowych.

Autorzy: prof. dr hab. inż. George Anders, Fellow IEEE, Politechnika Łódzka Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych ul. Wólczańska 221/223, budynek B18,90-924 Łódź, E-mail: anders@dmcs.pl; mgr inż. Maciej Mróz, SPIE ELBUD Gdańsk S.A., ul. Marynarki Polskiej 87, 80-557 Gdańsk, E-mail: maciej.mroz@sagpolska.pl; mgr inż. Mateusz Ellwart, SPIE ELBUD Gdańsk S.A., ul. Marynarki Polskiej 87, 80-557 Gdańsk, E-mail: mateusz.ellwart@sagpolska.pl

LITERATURA

- [1] George J. Anders, Rating of Electric Power Cables – Ampacity Computations for Transmission, Distribution and Industrial Installations, IEEE Press in their Power System Reference Series, 1997
- [2] George J. Anders, Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment, IEEE Press in their Power System Reference Series, 2005
- [3] IEC 60287-2-1. Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2-1: Thermal resistance - Calculation of the thermal resistance, 2015
- [4] IEC 60287-3-3 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 3-3: Sections on operating conditions - Cables crossing external heat sources, 2007
- [5] IEC 60287-1-1 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General, 2006
- [6] IEC 60853-3 Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables - Part 3: Cyclic rating factor for cables of all voltages, with partial drying of the soil, 2002
- [7] IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV, IEEE Std 575™-2014 (Revision of IEEE Std 575-1988)
- [8] IEC 60840, Ed. 4.0: Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV (Um= 36 kV) up to 150 kV (Um= 170 kV) – Test methods and requirements, 2011
- [9] IEC 60228 Conductors of insulated cables, 2004
- [10] N SEP-E-004 Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe. Projektowanie i budowa, 2014
- [11] Droga do energii – kable wysokich napięć. Katalog producenta TFkable, 2014 - wraz z materiałami uzupełniającymi.
- [12] Czapp S., Szultka S., Tomaszewski A.: CFD-based evaluation of current-carrying capacity of power cables installed in free air, 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2017, <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967271>.
- [13] Sedaghat A., de León F.: Thermal analysis of power cables in free air: evaluation and improvement of the IEC standard ampacity calculations, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 5, 2014, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2296912>.
- [14] Dong Dai, Mingli Hu, Ling Luo: Calculation of thermal distribution and ampacity for underground power cable system by using electromagnetic-thermal coupled model, 2014 Electrical Insulation Conference, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2014, <https://doi.org/10.1109/EIC.2014.68693>