

Ocena skuteczności odprowadzania ciepła z kabla w podziemnej linii elektroenergetycznej

Streszczenie. W artykule przedstawiono propozycję prostej procedury oceny efektywności odprowadzania ciepła z podziemnych kabli elektroenergetycznych w rurach osłonowych, możliwej do wykorzystania w trakcie napełniania tych rur substancją o odpowiedniej przewodności cieplnej. Procedura umożliwia kontrolę poprawności napełnienia poszczególnych rur. Sformułowano ją na podstawie wyników badań doświadczalnych na opracowanym modelu podziemnej linii energetycznej, gdzie obok pomiarów temperatur realizowano pomiary spadków napięć na odcinkach kabla.

Abstract. The article presents a proposal for a simple procedure for assessing the efficiency of heat removal from underground power cables in casing pipes, which can be used when filling these pipes with a substance with appropriate thermal conductivity. The procedure allows you to check whether individual pipes are filled correctly. It was formulated on the basis of the results of experimental tests carried out on the developed model of an underground power line, where, in addition to temperature measurements, voltage drops were also measured on cable sections. (**Assessment of the efficiency of heat removal from a cable in an underground power line**).

Słowa kluczowe: podziemne linie kablowe, ocena odprowadzania ciepła z kabla, kontrola napełnienia rury osłonowej, pomiary spadków napięcia.

Keywords: underground cable lines, assessment of heat dissipation from the cable, control of the casing pipe filling, voltage drop measurements.

Wstęp

Dystrybucja energii elektrycznej z wykorzystaniem podziemnych linii kablowych, w miejsce linii napowietrznych, jest rozwiązaniem coraz szerzej stosowanym na świecie ze względu na większą odporność linii podziemnych na zjawiska klimatyczne i akty sabotażu, przy mniejszej uciążliwości dla środowiska i eliminacji zaburzania harmonii krajobrazu. Podziemne linie kablowe wykazują przy tym lepsze tłumienie przepięć i zwarć oraz pola elektromagnetyczne w ich otoczeniu.

Koszty budowy podziemnych linii elektroenergetycznych są większe od kosztów linii napowietrznych [1]. W porównaniu z liniami napowietrznymi, kable podziemne mogą przewodzić dużo większe prądy awaryjne w stosunku do ich wartości znamionowych. Jednakże, dopuszczalne wartości prądu w kablach podziemnych w normalnych warunkach pracy są mniejsze niż w linii napowietrznej o analogicznych parametrach. Kable podziemne umieszczane są bezpośrednio w wykopie lub dodatkowo zabezpieczane rurami osłonowymi.

Odprowadzanie ciepła jest istotnym elementem w eksploatacji kabli energetycznych, ponieważ prąd elektryczny płynący w kablu o określonej rezystancji generuje ciepło (efekt Joule'a). Różnorodne analizy odnoszące się do tej tematyki, oparte zarówno na wynikach badań eksperymentalnych, jak i symulacyjnych, zawarto w licznych publikacjach, np. w [2,3,4]. Wartość dopuszczalnego prądu w kablu związana jest ze zdolnością odprowadzania z niego ciepła i zależy od rodzaju materiału przewodzącego, izolacji kabla oraz właściwości termicznych otoczenia kabla. Nadmierna ilość wydzielanego ciepła prowadzi do wzrostu temperatury materiału przewodzącego prąd, co z kolei może powodować przegrzanie i degradację izolacji kabla skutkującą awarią systemu [5]. Wymusza to konieczność ograniczenia wartości płynącego w kablu prądu. Wybór materiału przewodzącego prąd i jego izolacji, a także odpowiedni materiał otaczający kabel podziemny, są kluczowe dla zapewnienia efektywnego odprowadzania ciepła i utrzymania bezpiecznego przepływu prądu przez kabel energetyczny. Jednocześnie dodatkowe problemy pojawiają się w związku ze stosowaniem rur osłonowych

kabla, stosowanych zwykle w niewaligicznych częściach linii podziemnej, np. pod ruchliwą drogą. Rury powinny być starannie wypełnione substancją o dobrym przewodnictwie cieplnym. Powietrze otaczające kabel na pewnym odcinku rury utrudnia odprowadzanie z niego ciepła, co powoduje, że odcinek ten staje się najsłabszym ogniwem linii energetycznej, do którego musi być dostosowana maksymalna wartość prądu płynącego w całym segmencie linii.

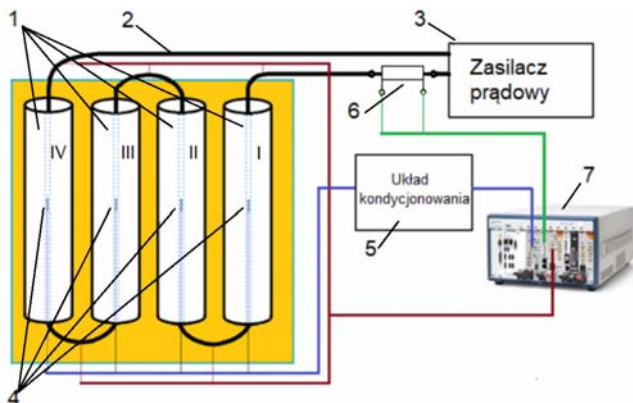
Badania właściwości kabli energetycznych i linii kablowych w odniesieniu do możliwości przesyłania energii elektrycznej, napięć nominalnych i jakości izolacji prowadzone są różnymi metodami [6,7,8]. W literaturze [9,10,11] dostępne są również wyniki badań zjawisk związanych z wydzielaniem ciepła w podziemnych liniach elektroenergetycznych i dopuszczalnych prądów w kablu.

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na opracowanym modelu podziemnej linii elektroenergetycznej wraz z propozycją oryginalnej metody oceny poprawności napełnienia rury osłonowej substancją odprowadzającą ciepło z kabla.

Stanowisko testowe

W [12] omówiono wstępne założenia odnoszące się do konfiguracji stanowiska laboratoryjnego do badania rozpraszania ciepła w kablu energetycznym prowadzonym w rurze osłonowej. Na rysunku 1 pokazano elementy wykorzystywanego stanowiska laboratoryjnego. Źródłem energii elektrycznej jest zespół zasilaczy prądowych 3 typu S-LS-42 (Stamos) o łącznej wydajności 180 A. Rejestracji mierzonych wielkości dokonano przy wykorzystaniu platformy pomiarowej 7 w systemie NI PXI. Do badań wykorzystano kabel miedziany 2 typu YKY 1x25 RMC 0,6/1 kV (Telefonika) o przekroju 25 mm² w izolacji z polichlorku winylu (PVC). Dopuszczalna długoterminowa obciążalność kabla wynosi 137 A, natomiast długoterminowa dopuszczalna temperatura izolacji PVC wynosi 70°C. Kabel poprowadzono przez zestaw rur osłonowych 1 RHDPEp 90x6.3 o średnicy zewnętrznej 90 mm i grubości ścianki 6,3 mm. Wartość prądu stałego przepływającego przez

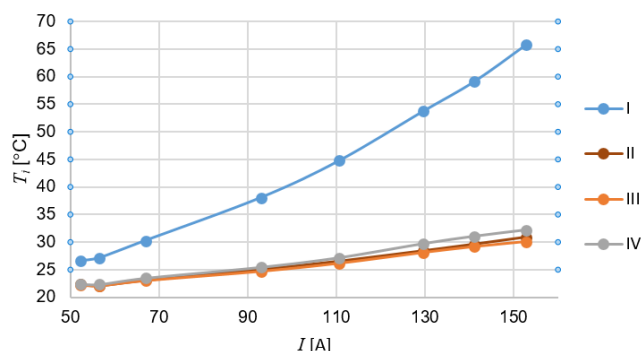
kabel regulowano w zasilaczu 3 i mierzono w układzie 7 za pomocą bocznika 6 (rys.1). Pomiaru temperatury przeprowadzono z wykorzystaniem miniaturowych hermetycznych czujników termistorowych 4.



Rys.1. Elementy stanowiska laboratoryjnego [12]

Głównym celem pomiarów było wyznaczenie rozkładu temperatur w rurach osłonowych wypełnionych substancjami o różnych współczynnikach przewodności cieplnej λ . W rurze I (rys.1) pozostawiono powietrze. Około rok przed pomiarami spadków napięć rurę II napełniono substancją oznaczoną symbolem CC [13] o dobrym przewodnictwie cieplnym ($\lambda > 3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), rurę III napełniono substancją CC krótko przed pomiarami, zaś również w tym czasie rurę IV napełniono substancją CC do połowy jej objętości. Metodę prowadzonych badań szczegółowo opisano w [14], zaś w [15] omówiono ich wyniki.

Na rysunku 2 pokazano pomierzone wartości temperatur w poszczególnych rurach osłonowych (I-IV na rys.1) w funkcji prądu płynącego w kablu, po stabilizacji temperatur dla każdej z wartości prądu. Wynika z niego wyraźnie, że powietrze otaczające kabel w rurze I przyczynia się do nadmiernego wzrostu temperatury kabla w stosunku do przypadków rur z innymi wypełnieniami.



Rys.2. Temperatury kabla w poszczególnych rurach osłonowych w funkcji prądu w kablu

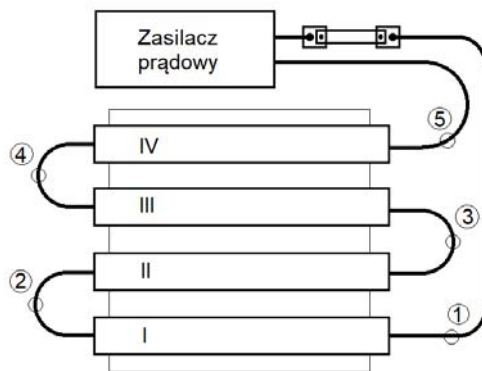
Obok badań zjawisk cieplnych przeprowadzono pomiary spadków napięć na poszczególnych odcinkach kabla w rurach osłonowych. Ich celem była próba znalezienia zależności pomiędzy zmianą rezystancji poszczególnych odcinków kabla w funkcji prądu płynącego w kablu, a także w relacji do temperatur w poszczególnych sekcjach rur. Podjęto próbę wykorzystania wyników pomiarów spadków napięć na poszczególnych odcinkach kabla do zgrubnej oceny efektywności odprowadzania ciepła tych odcinków.

Pomiary spadków napięć na kablu

Na rysunku 3 pokazano punkty pomiarowe spadków napięć na poszczególnych odcinkach kabla na stanowisku testowym, oznaczone od ① do ⑤ na kablu, w rurach osłonowych od I do IV. Wyniki pomiaru spadków napięć U_i na poszczególnych odcinkach kabla, przy różnych wartościach prądu I w kablu, przedstawiono w tabeli 1 (gdzie: indeks i odpowiada I, II, III lub IV, odpowiednio dla odcinków kabla 1-2, 2-3, 3-4 lub 4-5 na rys. 3). W tabeli 1 uwzględniono także spadki napięć U_{1-5} na całym odcinku kabla. Rysunek 4 zawiera graficzną prezentację tych zmian.

Na rysunku 5 przedstawiono ilości ciepła Q generowanego w poszczególnych odcinkach kabla, dla różnych wartości prądu.

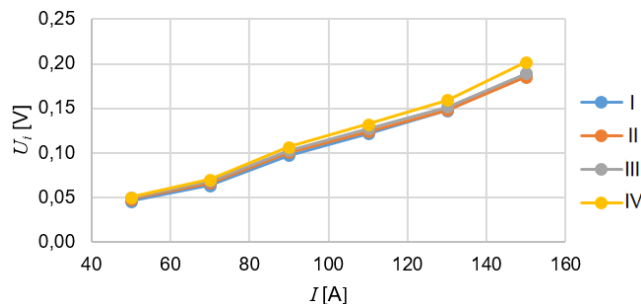
Skuteczne odprowadzanie ciepła z kabla prowadzi do utrzymania w nim odpowiednio niskiej temperatury, co umożliwi przewożenie prądu w określonym zakresie wartości. Na podstawie zmian wartości spadków napięć w funkcji wartości prądu na poszczególnych odcinkach kabla, jak również wartości wydzielanego ciepła, trudno jest wnioskować o skuteczności odprowadzenia z kabla wydzielanego w nim ciepła w poszczególnych rurach osłonowych. Jednakże, analiza relacji między pomierzonymi napięciami prowadzi do ciekawych wniosków.



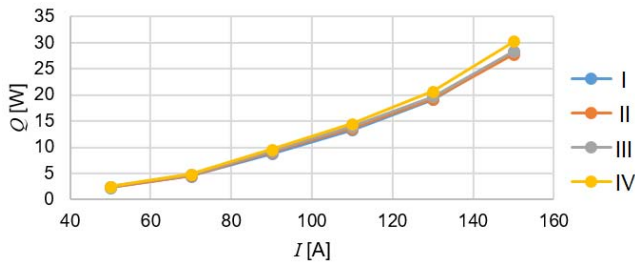
Rys.3. Punkty pomiarowe spadków napięć na kablu

Tabela 1. Spadki napięć na odcinkach kabla przy różnych prądach

I [A]	50	70	90	110	130	150
U_I [V]	0,046	0,0638	0,0975	0,1215	0,1479	0,1883
U_{II} [V]	0,048	0,0661	0,1004	0,124	0,1481	0,1856
U_{III} [V]	0,0497	0,0682	0,103	0,1269	0,1515	0,1893
U_{IV} [V]	0,0505	0,07	0,1067	0,1323	0,1596	0,2019
U_{1-5} [V]	0,1942	0,2677	0,4072	0,5047	0,6071	0,7651



Rys.4. Zmiany spadków napięć na odcinkach kabla w funkcji prądu płynącego w kablu



Rys.5. Ciepło wydzielane na odcinkach kabla w funkcji prądu płynącego w kablu

Analiza wyników

Jak wspomniano, na podstawie uzyskanych wyników (tab.1) trudno jest wprost wnioskować o skuteczności odprowadzania ciepła w odcinkach kabla w poszczególnych rurach osłonowych. Analiza porównawcza zmian spadków napięć na odcinkach kabla w poszczególnych rurach osłonowych może być przeprowadzona w formie procedury opartej na wyznaczeniu dla każdego odcinka kabla zbioru współczynników V_i , opisanych zależnością (1), a następnie zbioru współczynników V_{in} , zgodnie z zależnością (2).

$$(1) \quad V_i = \frac{U_i}{U_{i,50}}$$

gdzie: i – numer odcinka kabla (I, II, III lub IV na rys.2); U_i – napięcia na badanym odcinku i kabla dla poszczególnych wartości prądu I w kablu; $U_{i,50}$ – łączny spadek napięcia na badanym kablu dla poszczególnych wartości I .

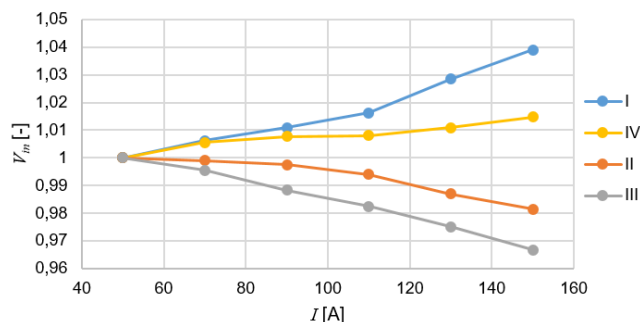
$$(2) \quad V_{in} = \frac{V_{i50}}{V_{i50}}$$

gdzie: V_{i50} – wartości współczynników V_i dla poszczególnych odcinków kabla przy początkowym prądzie w kablu $I = 50$ A.

Wartości tych współczynników zmieniają się w różny sposób dla poszczególnych odcinków kabla wraz ze zmianą płynącego w nim prądu. W tabeli 2 oraz na rysunku 6 pokazano zmiany wartości wyznaczonych współczynników V_{in} w funkcji prądu I w kablu.

Tabela 2. Współczynniki V_{in} wyznaczone dla poszczególnych odcinków kabla przy różnych prądach

I [A]	50	70	90	110	130	150
V_{in} [-]	1	1,0045	1,0103	1,0166	1,0289	1,0396
V_{IIin} [-]	1	0,9974	0,9961	0,9938	0,9866	0,9810
V_{IIIin} [-]	1	0,9937	0,9868	0,9822	0,9747	0,9663
V_{IVin} [-]	1	1,0045	1,0073	1,0083	1,0113	1,0152



Rys.6. Współczynniki V_{in} w funkcji prądu płynącego w kablu

Pokazują one udział spadków napięć na poszczególnych odcinkach kabla w łącznym spadku napięcia na badanym kablu, odniesiony do ich wartości dla prądu początkowego (50 A). Większe nachylenie krzywej rosnącej V_{in} w funkcji prądu oznacza relatywnie większy

wzrost napięcia na odcinku kabla (co za tym idzie jego rezystancji, a zatem temperatury kabla) w stosunku do odcinków o mniejszym (lub ujemnym) nachyleniu krzywej V_{in} .

Porównanie zmian wartości współczynników V_{in} przy różnych prądach w kablu ujawnia pewne prawidłowości związane z właściwościami cieplnymi materiału wypełniającego rury osłonowe. Zmiany współczynników pokazane na rysunku 6 wyraźnie wskazują, że wraz ze wzrostem prądu w kablu wartości tych współczynników maleją dla rur II i III całkowicie wypełnionych substancją CC, natomiast dla rur I i IV zawierających powietrze (rura I – całkowicie wypełniona powietrzem, zaś IV – częściowo, do połowy objętości) współczynniki te rosną. Szybsze narastanie krzywej wynika z większego wzrostu napięcia na odcinku kabla (a co za tym idzie jego rezystancji). Większa różnica wartości V_{in} dla wyższych prądów w kablu oznacza większą różnicę w sprawności odprowadzania ciepła dla badanych odcinków kabla.

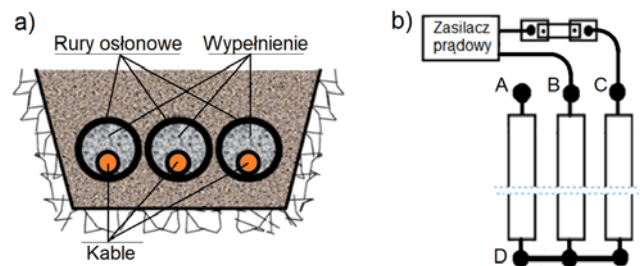
Zaobserwowaną prawidłowość można wykorzystać na etapie napełniania rur osłonowych do wykrycia niedokładnie wypełnionych odcinków rur, w których znajduje się zalegające powietrze.

Zarejestrowane zmiany spadków napięcia, po ustabilizowaniu warunków cieplnych w poszczególnych punktach modelu laboratoryjnego dla różnych prądów płynących w kablu, mogą być wskaźnikiem efektywności odprowadzania ciepła z kabla oraz mogą być pomocne w lokalizacji rury osłonowej, która nie jest prawidłowo wypełniona substancją odprowadzającą ciepło z kabla.

Praktyczne wykorzystanie

Zastosowanie praktyczne proponowanej metody jest stosunkowo proste i wymaga użycia źródła prądu stałego o wydajności dostosowanej do dopuszczalnej obciążalności prądowej kabla w badanym kanale oraz rejestratora napięcia o odpowiednich właściwościach metrologicznych.

Współczynniki określone wzorem (2), wyznaczone dla zarejestrowanych spadków napięcia, mogą posłużyć do wstępnej przybliżonej oceny efektywności odprowadzania ciepła z kabla. Może mieć to zastosowanie w przypadkach, gdy kable przewodzące prądy fazowe prowadzone są w oddzielnych rurach osłonowych (rys.7.a).

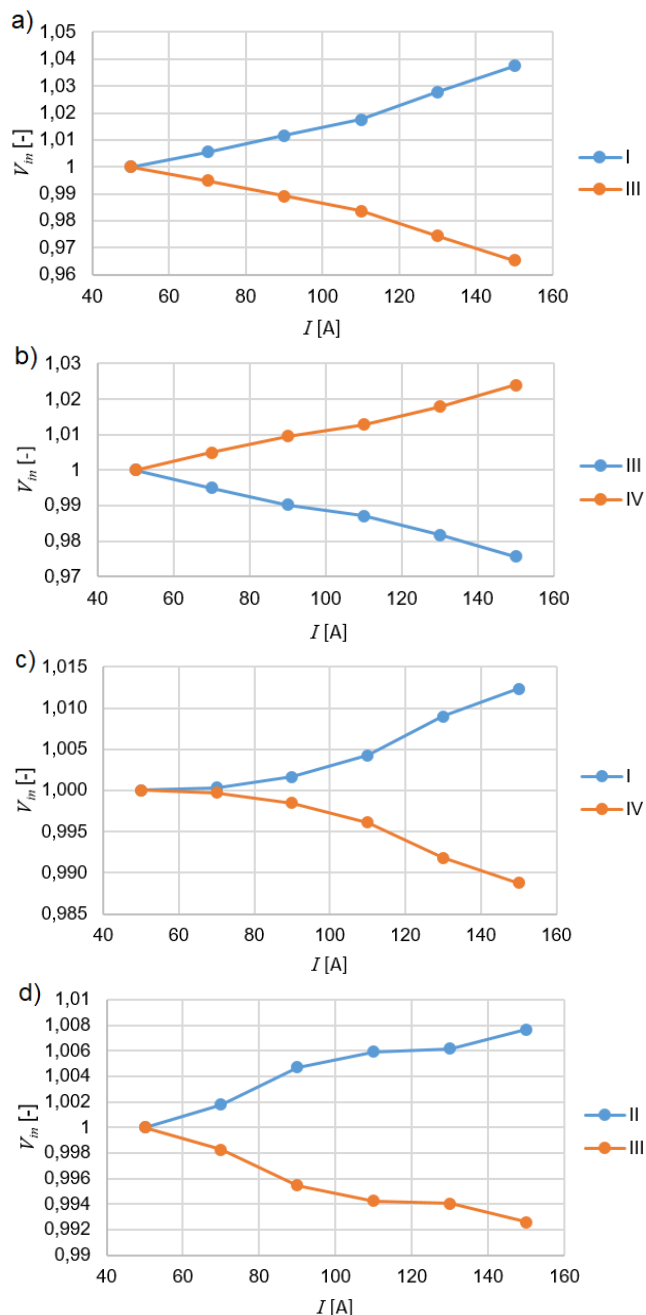


Rys.7. Podziemne kable elektroenergetyczne w rurach osłonowych: a/ przekrój poprzeczny wykopu; b/ przykładowe podłączenie układu testowego: A, B, C – punkty po stronie pomiarowej, D – strona kabli zwarta w celach testowych

Po napełnieniu rur substancją wypełniającą, przy dostępności końcówek kabli na zewnątrz rur, możliwe jest wykonanie zwarcia dostępnych końcówek po jednej stronie rur (punkt D na rys.7.b). Po przeciwnej stronie rur należy zasilić obwód złożony z dwóch kabli, przykładowo punkty B i C na rys.7.b, zaś końcówka A trzeciego kabla będzie wykorzystana do pomiaru spadku napięcia w zwartym punkcie wspólnym obu odcinków kabla (punkt D na rys.7.b). Procedura testowa polega na pomiarze spadków napięcia na trzech kombinacjach połączeń kablowych (punkty

zasilania prądem/kabel pomiarowy): A-B/C, A-C/B i B-C/A (tę kombinację pokazano na rys.7.b).

Dla zilustrowania działania procedury wykorzystano dane zawarte w tabeli 1. Ze względu na prądowy charakter zasilania kabla, spadki napięć na każdym z odcinków kabla są wzajemnie niezależne, zaś wyznaczone współczynniki V_{in} dla wybranych dwóch odcinków kabla zależą wyłącznie od prądu płynącego w kablu oraz od spadków napięć na tych odcinkach, a więc od ich temperatur, które z kolei zależą od skuteczności odprowadzania z nich ciepła. Na rysunku 8 pokazano wartości współczynników V_{in} w funkcji prądu, wyznaczone dla wybranych kombinacji par odcinków kabla, na podstawie danych z tabeli 1 uzyskanych w pomiarach spadków napięć dla odcinków kabla w rurach osłonowych, oznaczonych na rysunkach 1 i 2 symbolami: I, II, III i IV.



Rys.8. Współczynniki V_{in} wyznaczone dla par odcinków kabla: a) I i III; b) III i IV; c) I i IV; d) II i III

W praktyce, proponowana procedura wymaga wyznaczenia współczynników V_{in} i porównania ich wartości jedynie dla dwóch wartości prądu, w warunkach testowych: 50 A i 150 A. W tabeli 3 zestawiono różnice ΔV_{in} między wartościami współczynników (przy prądzie 150 A) dla analizowanych par odcinków kabla, których wykresy V_{in} pokazano na rysunku 8.

Analiza relacji pomiędzy V_{in} dla trzech pierwszych par kabli w tabeli 3 pokazuje, że kabel I ma znacznie wyższą temperaturę niż kabel III (rys.8.a), zaś różnica temperatur między kablami I i IV jest mniejsza, przy czym wyższą temperaturę ma kabel I (rys.8.b).

Tabela 3. Współczynniki ΔV_{in} wyznaczone dla wybranych par odcinków kabla przy prądzie 150 A

Para odcinków kabla	I-III	III-IV	I-IV	II-III
ΔV_{in} [-]	0,0721	-0,0485	0,0236	0,0150

Z kolei ujemna wartość ΔV_{in} dla pary III-IV (rys.8.c) oznacza, że kabel III ma najniższą temperaturę z badanych trzech kabli.

Wartości ΔV_{in} pokazują, obok relacji pomiędzy efektywnością odprowadzania ciepła z poszczególnych kabli, również skalę ilościową skuteczności odprowadzania ciepła. Dla przykładu, na rysunku 8.d pokazano wartości V_{in} , odpowiadające odcinkom kabla w rurach osłonowych II i III z wypełnieniem o bardzo zbliżonych właściwościach cieplnych, dla których ΔV_{in} przyjmuje najmniejsze wartości (tab.3). Powyższe wnioski, wyciągnięte na podstawie analizy spadków napięć na poszczególnych odcinkach kabla w rurach osłonowych, są w pełni zbieżne z wynikami oceny odprowadzania ciepła z kabla, opartej na wynikach testów prowadzonych w identycznych warunkach, w tym na podstawie pomiaru temperatur w wybranych punktach na stanowisku testowym.

Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych w warunkach laboratoryjnych oraz przeprowadzonych na ich podstawie analiz wskazują, że możliwa jest ocena efektywności odprowadzania ciepła z kabla w podziemnej linii elektroenergetycznej bez pomiarów rozkładu temperatur kabla i w jego okolicy, wymagających znacznych dodatkowych zabiegów.

Wnioskowanie na podstawie relacji między spadkami napięć na odcinkach kabla pozwala ocenić jakość napełnienia rury osłonowej substancją odprowadzającą ciepło z kabla.

Projekt finansowany w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019 - 2022 nr projektu 006/RID/2018/19 kwota finansowania 11 870 000 zł.

Autorzy: dr inż. Romuald Maśnicki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: r.masnicki@we.umg.edu.pl; dr hab. inż. Dariusz Świsulski, profesor uczelni, Politechnika Gdańska, Katedra Metrologii i Systemów Informacyjnych, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: dariusz.swisulski@pg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Kowalczyk Z., Analiza techniczno-ekonomiczna realizacji przyłączy elektroenergetycznych w wybranych obiektach aglomeracji wiejskiej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), nr 12, 152-155

- [2] Perka B., Przegląd metod modelowania przepływu ciepła w przewodach elektrycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 97 (2021), nr 7, 90-93
- [3] Borowik L., Barasiński A., Instalacje elektroenergetyczne w budownictwie energooszczędnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 1, 118-121
- [4] Szczegielniak T., Kusiak D., Piątek Z., Analiza strat mocy oraz temperatury kabla elektroenergetycznego średniego napięcia, *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej*, 103 (2020), 25-34
- [5] Verschaffel-Drefke, C. et al., Heat Dissipation in Variable Underground Power Cable Beddings: Experiences from a Real Scale Field Experiment, *Energies*, 14 (2021), 1-24
- [6] Durak S., Partyka J., Gustaw M., Pomiar diagnostyczny linii kablowych średniego napięcia z użyciem różnych źródeł napięć probierczych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020), nr 8, 131-134
- [7] Mikulski J.L., Karpiński L., Zakrzewski S., Badanie systemu kablowego 220 kV, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), nr 10, 184-187
- [8] Chybowski R., Bednarek M., Rybiński J., Diagnostyka termograficzna w podczerwieni kabla 110 kV, *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje*, v. 1 (2003), nr 1, 25-25
- [9] Czapp S., Szultka S., Dzionk A., Borowski K., Wpływ warunków otoczenia na obciążalność prądową długotrwałą kabli elektroenergetycznych, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, nr 51 (2016), 31-34
- [10] Ocloń, P. et al., Numerical simulation of heat dissipation processes in underground power cable system situated in thermal backfill and buried in a multilayered soil. *Energy Conversion and Management*, 95 (2015), 352-370
- [11] Hruška, M. et al., Influence of dry ambient conditions on performance of underground medium-voltage DC cables. *Applied Thermal Engineering*, 149 (2019), 1419-1426
- [12] Maśnicki R., Odprowadzanie ciepła z kabla w podziemnych liniach elektroenergetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 97 (2021), nr 5, 74-77
- [13] Brakelmann, H., Dietrich, J., May, H.P., A new backfill material with an extremely high thermal conductivity. *In Proceedings of the Transaction of the 8th International Conference on Insulated Power Cables (Jicable'11)*, Versailles, France (2011), 1-6
- [14] Maśnicki R., Świsulski D., Multi-channel virtual instrument for measuring temperature-a case study, *Electronics*, 12 (2023), No. 10, 1-17
- [15] Maśnicki R., Mindykowski J., Pałczyńska B., Experiment-Based Study of Heat Dissipation from the Power Cable in a Casing Pipe, *Energies*, 15 (2022), 1-16