

Odrowadzanie ciepła z kabla w podziemnych liniach elektroenergetycznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję stanowiska do badań warunków odprowadzania ciepła z kabla w rurze osłonowej, z odcinkami rury wypełnionymi różnymi ośrodkami, oraz pokazano wyniki badań wybranych substancji wypełniających rurę osłonową, w tym substancji o konsystencji żelowej, o przewodności cieplnej lepszej niż gleba, powietrze, woda lub bentonit kablowy, nie zawierającej cząstek destrukcyjnych dla układów mechanicznych, łatwo aplikowalnej do rur osłonowych za pomocą dostępnych pomp.

Abstract. The article presents the concept of the developed stand for testing heat dissipation from the cable in a casing pipe, with pipe sections filled with various media, and the results of tests of selected substances filling the casing pipe, including substances with a gel-like consistency, with a thermal conductivity better than soil, air, water or cable bentonite, not containing particles destructive to mechanical systems, easily applied to casing pipes using available pumps. (*Heat dissipation from the cable in underground power lines*).

Słowa kluczowe: podziemne kable energetyczne, odprowadzanie ciepła, bentonit kablowy, przewodność cieplna.

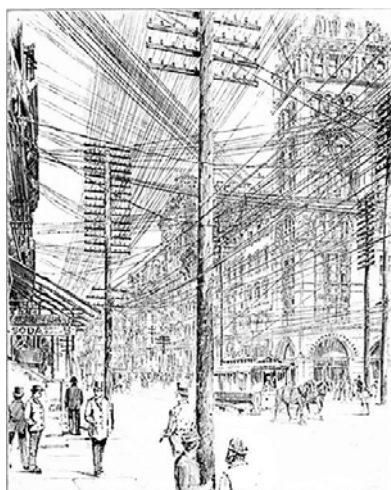
Keywords: underground power cables, heat dissipation, cable bentonite, thermal conductivity.

Wstęp

Dostarczanie energii elektrycznej od jej wytwórców do konsumentów odbywa się z wykorzystaniem linii napowietrznych bądź podziemnych linii kablowych. Obydwie technologie wykorzystywane są w przesyłaniu energii zarówno w sieciach WN, SN, jak i nN (odpowiednio: wysokiego, średniego lub niskiego napięcia).

Sposób ułożenia kabla ma zasadniczy wpływ na jego dopuszczalną obciążalność prądową. Te same kable ułożone w ziemi mają obciążalność prądową o 20÷30 % większą, niż gdy są prowadzone w powietrzu [1].

Linie napowietrzne są tańsze w eksploatacji, przeglądach i konserwacji. Narażone są jednak na oddziaływanie zewnętrzne, które mogą powodować zwarcia. Koszt budowy linii napowietrznej jest do 5 razy mniejszy niż linii podziemnej [2,3], jednakże eksploatacja linii napowietrznych musi uwzględniać ogromne koszty usuwania skutków klęsk żywiołowych. Ich obecność zakłóca harmonię środowiska i przysparza licznych ograniczeń w zakresie urbanistyki, zagospodarowania i wykorzystania terenu, przez który przebiegają. Linie napowietrzne stanowią element zanieczyszczania krajobrazu oraz źródło pola elektromagnetycznego, niekorzystnie oddziałującego na otoczenie [4]. Na rysunku 1 pokazano widok XIX-wiecznej ulicy Nowego Yorku. W wielu miejscach świata wciąż można znaleźć podobnie wyglądające ulice współczesnych miast.



Rys. 1. Ulica w końcu XIX wieku [5]

Linie podziemne, chociaż droższe w budowie i eksploatacji, jednakże są one znacznie bardziej odporne na klęski żywiołowe, w efekcie ich eksploatacji towarzyszy niższe ryzyko awarii. Linie podziemne cechuje dużo lepsza tłumienność przepięć i zwarc, a także są one mniej uciążliwe dla otoczenia.

Obecnie w USA instalacje napowietrzne w stanowią 97 % sieci elektroenergetycznych [2]. W Holandii 100 % instalacji nN i SN stanowią linie podziemne, zaś w Polsce linie podziemne obejmują 35% instalacji nN i 27 % SN [6].

Przesyłanie energii elektrycznej w obszarach zabudowanych, zwłaszcza w aglomeracjach miejskich, jest zwykle realizowane z wykorzystaniem podziemnych linii kablowych. Najpowszechniej w praktyce stosuje się podziemne kable umieszczone w otaczających je rurach osłonowych.

Przesyłanie energii wiąże się z jej stratami, wynikającymi głównie z rezystancji linii elektroenergetycznej. Wydzielanie energii cieplnej w kablu prowadzi do wzrostu jego temperatury i do wzrostu rezystancji kabla. W konsekwencji, prowadzi to do ograniczenia dopuszczalnej energii elektrycznej, jaka może być przesyłana daną linią kablową [7,8]. Warunkiem dobrego odprowadzania ciepła z kabla jest zastosowanie właściwego wypełnienia przestrzeni w rurze osłonowej.

Budowę elektroenergetycznych linii kablowych należy wykonać zgodnie z zapisami normy [9]. Zawarto w niej szereg szczegółowych zaleceń odnoszących się do sposobu realizacji takich linii, w tym również parametrów wykorzystywanych kabli energetycznych i sposobu ich ochrony, m.in.:

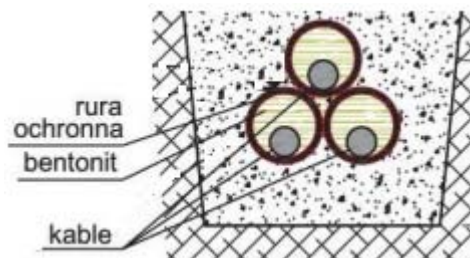
- wartość prądu obciążenia kabla nie może być większa od dopuszczalnej wartości obciążalności prądowej długotrwałej, a wartość prądu zwarcowego nie powodowała przekroczenia dopuszczalnych wartości temperatur żył,
 - przekrój żył roboczych należy dobrać do najbardziej niesprzyjających warunków chłodzenia,
 - średnica wewnętrzna osłony powinna być równa co najmniej 1,5-krotnej zewnętrznej średnicy kabla.
- Aktualnie w Polsce działa 40 Operatorów Systemów Dystrybucyjnych (OSD), z czego najbardziej znani to:
- PGE (odpowiada za dystrybucję prądu na obszarze Polski centralnej, wschodniej i południowo-wschodniej),
 - Enea (dystrybuje prąd w zachodniej i północno-zachodniej części Polski),

- Tauron (odpowiada za transport prądu na terenie południowej i południowo-zachodniej części Polski),
- Innogy (Polska centralna, wschodnia i północno-wschodnia, dystrybucja i wytwarzanie energii elektrycznej),
- Energa (Polska centralna oraz północna, dystrybucja i wytwarzanie energii elektrycznej).

Każde z przedsiębiorstw OSD opiera się na własnych regulacjach odnośnie sposobu wypełniania przestrzeni w rurze osłonowej. Dla przykładu, ENERGA-OPERATOR SA określiła w [10] wytyczne odnoszące się do ogólnych wymagań technicznych, stawianych wybranym elementom elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej będących w jej dyspozycji. Jednakże jedynie Tauron jednoznacznie wymaga wypełniania rur osłonowych bentonitem kablowym [11]. Podobne zalecenia można znaleźć w [1].

Bentonit kablowy jest mieszaniną naturalnych i neutralnych dla środowiska surowców o kontrolowanym przemieszaniu. Przykładowy skład bentonitu kablowego: 100 części mieszanki bentonit/woda (w proporcji 10:1) na 20 części piasku i 8 części cementu [12]. Materiał ten służy do wypełnienia osłon otaczających kable (rur osłonowych) w celu zwiększenia obciążalności prądowej kabli umieszczonych w rurach oraz usztywnienia ułożenia kabli. Materiał wyjściowy w stanie wysuszonej mieszaniny, po upłynięciu wody, wpompowany do rur wypełnia wszystkie wolne przestrzenie wewnątrz rury z kablem podczas budowy linii oraz zostaje się podczas eksploatacji. W razie potrzeby materiał ten można wypłukać strumieniem wody, umożliwiając wyciągnięcie kabla z rury. Rezystywność cieplna zestawionego bentonitu kablowego w stanie wysuszenia nie powinna być większa od 1 K m/W. W [13] zawarto wyniki badań właściwości bentonitu kablowego, oferowanego przez jedną z produkujących go firm.

Na rysunku 2 pokazano przykład podziemnego kanału kablowego.



Rys. 2. Przykładowy podziemny kanał kablowy

Stosowanie bentonitu kablowego przysparza wiele problemów, związanych głównie z jego aplikacją do rury osłonowej. Jako upłynniony materiał, zawierający cząstki o strukturze ziarnistej, działa bardzo destrukcyjnie na pompy dozujące i w praktyce jest stosowany przez firmy zajmujące się budową podziemnych kanałów kablowych w bardzo ograniczonym zakresie. W przypadku wielu inwestycji, przestrzeń pomiędzy kablem a rurą osłonową pozostaje niewypełniona, za wyjątkiem krótkich odcinków na końcówkach rur osłonowych, gdzie wyprowadzone są kable. Osłony kablowe wypełnione powietrzem w ograniczonym zakresie zapewniają odprowadzanie energii wydzielanej w kablu.

Ośrodek otaczający odprowadza energię cieplną z kabla na drodze przewodnictwa cieplnego (prawo Fouriera). Dla określonego odcinka osłony wraz z kablem, ilość odprowadzonej energii jest wprost proporcjonalna do współczynnika przewodzenia ciepła w ośrodku otaczającym źródło ciepła (kabel) oraz różnicy temperatur pomiędzy ośrodkami.

Współczynnik przewodzenia ciepła λ jest zdefiniowany jako ilość ciepła przewodzona przez ciało o powierzchni 1 m², grubości ścianki 1 m, gdy różnica temperatur pomiędzy przeciwległymi ściankami wynosi 1 K, w ciągu 1 s.

Przykładowe wartości przewodności cieplnej:

- powietrze, $\lambda = 0,025$ [W/(m·K)],
- woda, $\lambda = 0,6$ [W/(m·K)],
- miedź, $\lambda = 380$ [W/(m·K)],
- krzem, $\lambda = 148$ [W/(m·K)],
- gleba, $\lambda = 1,5$ [W/(m·K)],
- bentonit, $\lambda \geq 1,0$ [W/(m·K)].

Cel i zakres badań

W ramach realizowanego projektu podjęto się przeprowadzenia badań efektywności odprowadzania ciepła z kabla w rurze osłonowej, wypełnionej ośrodkiem o konsystencji żelowej, o przewodności cieplnej lepszej niż gleba, powietrze albo woda (a także bentonit kablowy). Materiał ten nie zawiera cząstek destrukcyjnych dla układów mechanicznych i jest dopuszczony do zastosowań związanych z przewodzeniem ciepła. Substancja o takich właściwościach daje się skutecznie aplikować do rur osłonowych za pomocą dostępnych pomp. Przy jej stosowaniu uzyskuje się znacznie lepsze odprowadzanie ciepła z kabla, niż przy wykorzystaniu dotychczas stosowanych wypełniaczy, oraz stabilizację warunków jego eksploatacji. Pozwala to na zwiększenie wolumenu energii elektrycznej możliwej do przesyłania w linii kablowej.

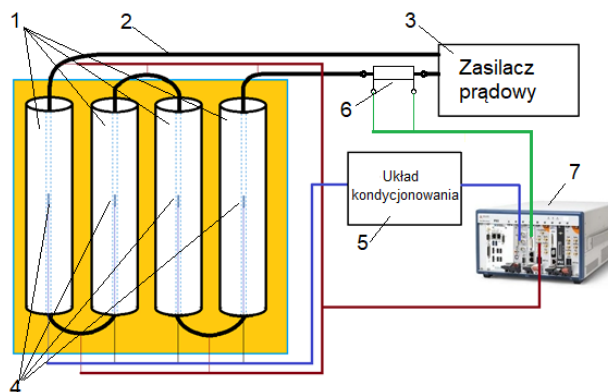
Badania będą miały charakter porównawczy i obejmą rejestrację rozkładu temperatur w odcinkach rur osłonowych, przez które przeciągnięto kabel przenoszący energię elektryczną, wypełnionych ośrodkami o różnych właściwościach termicznych. Uzyskane wyniki będą poddane analizom i udostępnione do ewentualnego wykorzystania przez OSD.

Do realizacji w roku 2020 przyjęto część projektu, obejmującą opracowanie metodologii prowadzenia badań oraz przygotowanie stanowiska badawczego. W roku 2021 prowadzone będą badania, powtarzane cyklicznie w okresach miesięcznych, obejmujące rejestrację czasowych zmian właściwości termicznych zastosowanych substancji wypełniających rurę osłonową.

Stanowisko badawcze

W ramach projektu zrealizowane zostało stanowisko z kablem prowadzonym przez odcinki rur osłonowych, wypełnionych różnymi ośrodkami. Na podstawie wyników pomiaru rozkładu temperatur w wybranych punktach poszczególnych odcinków przeprowadzona zostanie analiza skuteczności odprowadzania ciepła z kabla.

Na rysunku 3 pokazano podstawowe elementy opracowanego stanowiska badawczego.



Rys. 3. Główne elementy stanowiska badawczego

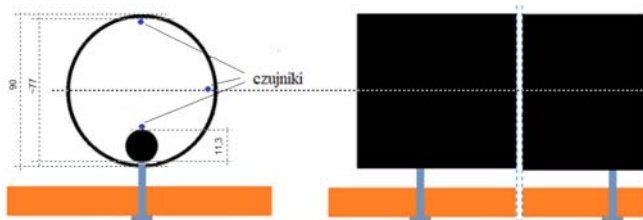
Źródłem energii elektrycznej jest zespół zasilaczy prądowych typu S-LS-42 (Stamos) (3) o łącznej wydajności 120 A. Temperatura jest mierzona przy wykorzystaniu miniaturowych hermetycznych czujników termistorowych (4). Dodatkowo, mierzone będą spadki napięcia na odcinkach kabla, w punktach pomiędzy kolejnymi rurami osłonowymi oraz wartość prądu płynącego w kablu. Rejestracja mierzonych wielkości odbywać się będzie z wykorzystaniem platformy pomiarowej w systemie PXI (7).

W badaniach wykorzystany zostanie kabel miedziany YKY 1x25 RMC 0,6/1kV (Telefonika) o przekroju 25 mm² (2). Dopuszczalny prąd w kablu wynosi 77,5 A (wyznaczony dla przyjętej rezystywności miedzi $\rho_{Cu} = 1,7 \times 10^{-8} \Omega m$, przy maksymalnej gęstości prądu dla miedzi $3,1 \times 10^6 A/m^2$).

Kabel jest prowadzony przez zestaw rur osłonowych typu RHDPEp 90x6,3 (1) o średnicy zewnętrznej 90 mm i grubości ścianki 6,3 mm.

Wartość prądu stałego płynącego przez kabel regulowana jest w zasilaczu (3) i mierzona w systemie PXI (7) z udziałem bocznika (6).

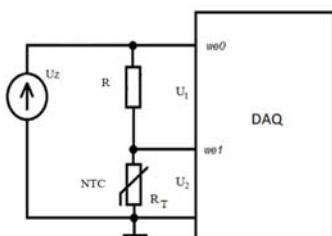
Rury zamocowano stabilnie na drewnianym blacie (rys. 4) przy pomocy obejm gumowo-metalowych. Na rysunku 4 pokazano również rozmieszczenie czujników temperatury w rurach osłonowych.



Rys. 4. Zamocowanie rury osłonowej i rozmieszczenie czujników NTC10 w rurze

Rozpraszanie ciepła w układzie „kabel - ośrodek w rurze osłonowej - ścianka rury - otoczenie zewnętrzne” powoduje powstanie gradientu temperatur w tym układzie. Pomiary temperatur w wytypowanych punktach układu realizowane będą za pomocą termistorów (4) (rys.3, rys.4) typu NTC10k o współczynniku $B=3950 K$. Czujniki NTC, chociaż nieliniowe, mają wielokrotnie większą czułość pomiarową od powszechnie stosowanych czujników platynowych, stąd zdecydowano się na ich wykorzystanie w projekcie.

Rezystancja każdego z czujników jest przetwarzana na napięcie w układzie kondycjonowania (5) (rys.3). Przetwarzanie odbywa się w standardowym układzie dzielnika napięcia, pokazanym na rysunku 5 dla pojedynczego kanału pomiaru temperatury



Rys. 5. Pojedynczy kanał pomiaru temperatury w układzie kondycjonowania

Napięcia wyjściowe z układu kondycjonowania (5) podawane są do układu (7). Dodatkowo, na stanowisku mierzone będą spadki napięć w punktach kabla, rozmieszczonych w odcinkach kabla na zewnątrz rur

osłonowych (linie pomiarowe w kolorze brąz na rys.3), a także temperatura powietrza w sąsiedztwie stanowiska.

Wszystkie sygnały pomiarowe doprowadzane są do wejść kart DAQ w platformie pomiarowej PXI (7), gdzie prowadzona jest rejestracja ich cyfrowych reprezentacji.

Podstawowe elementy platformy pomiarowej PXI wykorzystywanej w badaniach do akwizycji i rejestracji danych pomiarowych:

- NI PXIe-1082Q (National Instruments Chassis),
- NI PXIe-8135 (Embedded Controller),
- NI PXIe-6366 (DAQ - 8 differential channels, 16-bit, 2 MS/s) – 3 karty,
- NI SCB-68A (68-pin Connector Block).

Oprogramowanie, opracowane w środowisku NI LabVIEW, nadzoruje proces akwizycji oraz rejestracji danych, a także zapewnia wstępną analizę wyników pomiarowych.

Na rysunku 6 zamieszczono widok zrealizowanego stanowiska.



Rys. 6. Widok stanowiska badawczego

Dla wstępnej oceny właściwości termicznych substancji wypełniających rury osłonowe, przewidzianych do wykorzystania na stanowisku badawczym, przeprowadzono kilka serii pomiarów z wykorzystaniem przyrządu ISOMET 2114 Thermal Properties Analyzer. Badania przewodności cieplnej próbek i jej zmian przeprowadzono w ciągu ok. doby od momentu przygotowania roztworów wodnych wykorzystywanych substancji wypełniających. Dla poszczególnych substancji, wstępnie opracowane wyniki pomiarowe przedstawiono na rysunku 7.

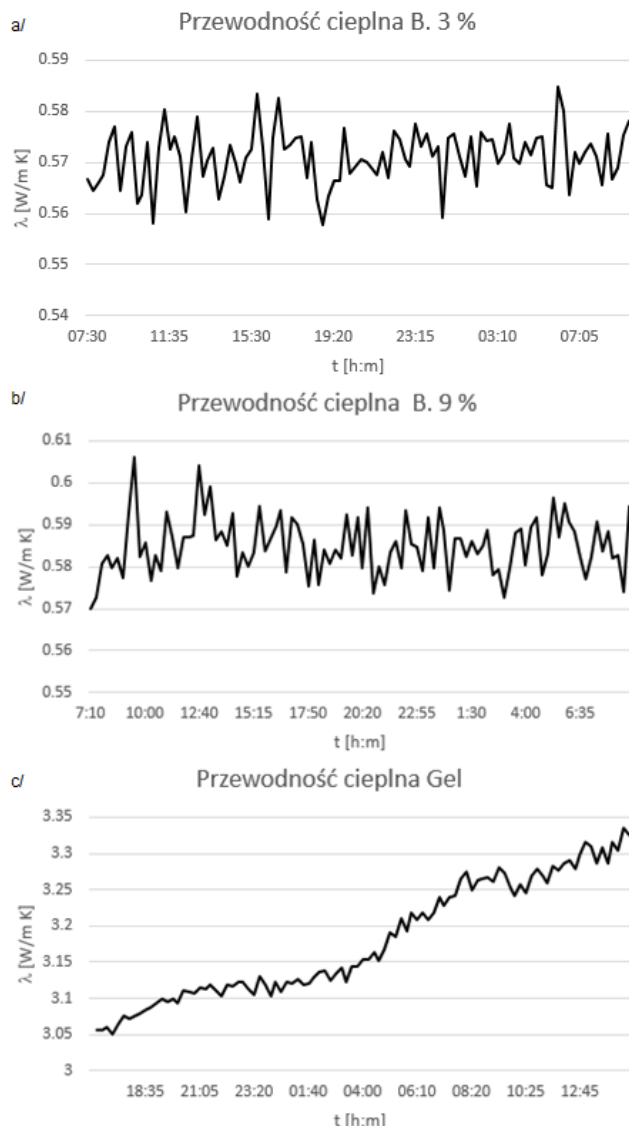
Przeprowadzono wstępne sprawdzenie dwudziestu termistorów dla wytypowania czujników o najbardziej zbliżonych charakterystykach. Końcowe wzorcowanie przeprowadzone zostanie w układach aplikacyjnych czujników w systemie pomiarowym na stanowisku. Na rysunku 8 pokazano rozrzut wartości rezystancji czujników wokół wartości średniej ich rezystancji ($R_{sr}=11,077 k\Omega$) w temperaturze 23 °C.

Wnioski

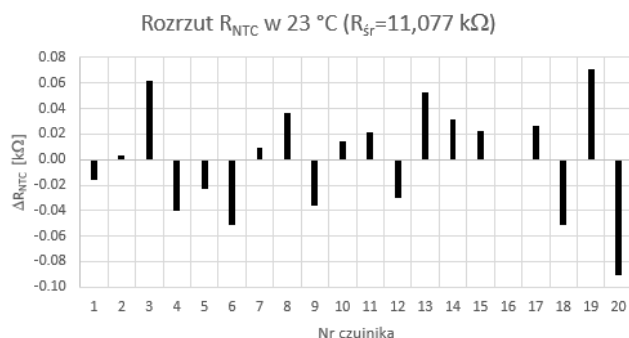
W artykule omówiono założenia i sposób realizacji stanowiska badawczego do oceny efektywności odprowadzania ciepła z kabla energetycznego w rurze osłonowej z różnymi ośrodkami wypełniającymi. Przedstawiono sposób wykonania modelu kanału kablowego oraz konfigurację stanowiska pomiarowego.

Przyczynkiem do podjęcia badań w ramach realizowanego projektu były informacje pochodzące z instytucji zajmujących się budową podziemnych linii kablowych o trudnościach towarzyszących wypełnianiu przestrzeni w rurach osłonowych, wynikających z silnie ciernych właściwości materiału zalecanego do tych zastosowań – bentonitu kablowego.

Wprowadzenie, w miejsce bentonitu kablowego, substancji wypełniającej rurę osłonową o pożądanych właściwościach termicznych i mechanicznych może przyczynić się do zwiększenia efektywności wykorzystania podziemnych kanałów kablowych w dystrybucji energii elektrycznej.



Rys. 7. Zmiany przewodności cieplnej badanych substancji: a/ bentonit w koncentracji 3 %, b/ bentonit w koncentracji 9 %, c/ substancja żelowa



Rys. 8. Rozrzut rezystancji czujników NTC10 wykorzystywanych na stanowisku

W artykule przedstawiono zagadnienia odnoszące się do pierwszej części realizowanego projektu, obejmującej opracowanie metodologii prowadzenia badań oraz przygotowanie stanowiska badawczego. W roku 2021 prowadzone będą cykliczne badania, obejmujące rejestrację czasowych zmian właściwości termicznych substancji wypełniających rurę osłonową.

Zgromadzone dane pomiarowe będą wykorzystane w mających zasadnicze znaczenie analizach porównawczych, obejmujących interpretację zmian właściwości termicznych substancji wypełniających rury, będących wynikiem upływu czasu.

Po serii badań w warunkach laboratoryjnych, planowane jest umieszczenie opracowanego modelu w warunkach odpowiadających typowym warunkom eksploatacji kabla podziemnego, w gruncie, oraz kontynuacja pomiarów i weryfikacja wcześniej uzyskanych wyników.

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.

Autor: dr. inż. Romuald Maśnicki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: r.masnicki@we.umg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] BEZEL, Linie kablowe, <https://bezel.com.pl/2018/08/01/linie-kablowe/> (dostęp: 10.11.2020)
- [2] Podziemne linie kablowe oraz dławczego po burzach pół Polski nie ma prądu - <https://joemonster.org/art/39758> (dostęp: 8.11.2020).
- [3] Kowalczyk Z., Analiza techniczno-ekonomiczna realizacji przyłączy elektroenergetycznych w wybranych obiektach aglomeracji wiejskiej, *Przegląd Elektrotechniczny*, r. 95 (2019), nr 12, 152-155.
- [4] Papliński P., Śmietanka H., Wańkowicz J., Oddziaływanie pola elektromagnetycznego w pobliżu słupów kablowych na środowisko ogólnie dostępne, *Przegląd Elektrotechniczny*, r. 94 (2018), nr 10, 13-17.
- [5] Źródło: <https://www.pinterest.co.uk/pin/266697609153291257/> (dostęp: 10.11.2020).
- [6] Linie elektroenergetyczne zejdą pod ziemię, <https://inzynieria.com/energetyka/artikuly/> (dostęp: 10.11.2020).
- [7] 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.
- [8] Spyra F., Wpływ czynników zewnętrznych na obciążalność kabli, *ZPBE Energopomiar-Elektryka Gliwice*, <https://www.elektryka.com.pl/pl/publikacje> (dostęp: 1.10.2020).
- [9] Zmiana do normy N SEP-E-004:2014/A1:2019-05 Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe Projektowanie i budowa, *SEP COSIW*, 5 (2019).
- [10] Standardy techniczne w ENERGA-OPEARATOR SA, <https://energa-operator.pl/dokumenty-i-formularze/instrukcje-i-standardy/standardy-techniczne> (dostęp: 8.11.2020).
- [11] Standard techniczny nr 30/2018 dla warunków budowy elektroenergetycznych linii kablowych WN wraz z kablami i osprzętem na terenie Tauron Dystrybucja S.A., *Tauron Dystrybucja*, wr.1 (2018).
- [12] Earthing Compound - Bentonite and Marconite, <https://www.cablejoints.co.uk/sub-product-details/cable-hangers/bentonite-marconite-earthing-compounds> (dostęp: 10.11.2020).
- [13] Ocloń P. et al., The performance analysis of a new thermal backfill material for underground power cable system, *Applied Thermal Engineering (Elsevier)*, 108 (2016), 233-250.