



Imię i nazwisko autora rozprawy: Filip Ratkowski
Dyscyplina naukowa: automatyka, elektronika i elektrotechnika

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: **Badanie wpływu parametrów gruntu na obciążalność prądową długotrwałą kabli elektroenergetycznych**

Tytuł rozprawy w języku angielskim: **Study of the influence of soil parameters on the long-term current-carrying capacity of power cables**

Promotor
<i>podpis</i>
dr hab. inż. Stanisław Czapp, prof. PG



The author of the doctoral dissertation: Filip Ratkowski
Scientific discipline: automation, electronic and electrical engineering

DOCTORAL DISSERTATION

Title of doctoral dissertation: **Study of the influence of soil parameters on the long-term current-carrying capacity of power cables**

Title of doctoral dissertation (in Polish): **Badanie wpływu parametrów gruntu na obciążalność prądową długotrwałą kabli elektroenergetycznych**

Supervisor
<i>signature</i>
dr hab. inż. Stanisław Czapp, prof. PG

Gdańsk, year 2022





OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: Filip Ratkowski

Ja, niżej podpisany, oświadczam, iż jestem świadomy, że zgodnie z przepisem art. 27 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2021 poz. 1062), uczelnia może korzystać z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej:

Badanie wpływu parametrów gruntu na obciążalność prądową długotrwałą kabli elektroenergetycznych do prowadzenia badań naukowych lub w celach dydaktycznych.¹

Świadomy odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2021.478 t.j.), a także odpowiedzialności cywilno-prawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem, dr hab. inż. Stanisławem Czappem, prof. PG

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami, zgodnie z przepisem art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia 24.08.2022

.....
podpis doktoranta

Ja, niżej podpisany, wyrażam zgodę na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej.

Gdańsk, dnia 24.08.2022

.....
podpis doktoranta

¹ Art. 27. 1. Instytucje oświatowe oraz podmioty, o których mowa w art. 7 ust. 1 pkt 1, 2 i 4–8 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, mogą na potrzeby zilustrowania treści przekazywanych w celach dydaktycznych lub w celu prowadzenia działalności naukowej korzystać z rozpowszechnionych utworów w oryginale i w tłumaczeniu oraz zwielokrotnić w tym celu rozpowszechnione drobne utwory lub fragmenty większych utworów.

2. W przypadku publicznego udostępniania utworów w taki sposób, aby każdy mógł mieć do nich dostęp w miejscu i czasie przez siebie wybranym korzystanie, o którym mowa w ust. 1, jest dozwolone wyłącznie dla ograniczonego kręgu osób uczących się, nauczających lub prowadzących badania naukowe, zidentyfikowanych przez podmioty wymienione w ust. 1.



STATEMENT

The author of the doctoral dissertation: Filip Ratkowski

I, the undersigned, declare that I am aware that in accordance with the provisions of Art. 27 (1) and (2) of the Act of 4th February 1994 on Copyright and Related Rights (Journal of Laws of 2021, item 1062), the university may use my doctoral dissertation entitled:

Study of the influence of soil parameters on the long-term current-carrying capacity of power cables for scientific or didactic purposes.¹

Gdańsk, 24.08.2022

.....
signature of the PhD student

Aware of criminal liability for violations of the Act of 4th February 1994 on Copyright and Related Rights and disciplinary actions set out in the Law on Higher Education and Science (Journal of Laws 2021, item 478), as well as civil liability, I declare, that the submitted doctoral dissertation is my own work.

I declare, that the submitted doctoral dissertation is my own work performed under and in cooperation with the supervision of dr hab. inż. Stanisław Czapp, prof. PG

This submitted doctoral dissertation has never before been the basis of an official procedure associated with the awarding of a PhD degree.

All the information contained in the above thesis which is derived from written and electronic sources is documented in a list of relevant literature in accordance with Art. 34 of the Copyright and Related Rights Act.

I confirm that this doctoral dissertation is identical to the attached electronic version.

Gdańsk, 24.08.2022

.....
signature of the PhD student

I, the undersigned, agree to include an electronic version of the above doctoral dissertation in the open, institutional, digital repository of Gdańsk University of Technology.

Gdańsk, 24.08.2022

.....
signature of the PhD student

¹ Art 27. 1. Educational institutions and entities referred to in art. 7 sec. 1 points 1, 2 and 4–8 of the Act of 20 July 2018 – Law on Higher Education and Science, may use the disseminated works in the original and in translation for the purposes of illustrating the content provided for didactic purposes or in order to conduct research activities, and to reproduce for this purpose disseminated minor works or fragments of larger works.

2. If the works are made available to the public in such a way that everyone can have access to them at the place and time selected by them, as referred to in para. 1, is allowed only for a limited group of people learning, teaching or conducting research, identified by the entities listed in paragraph 1.



Podziękowania autora rozprawy:

Chciałbym skorzystać z okazji, aby podziękować mojemu promotorowi, prof. Stanisławowi Czappowi oraz opiekunowi naukowemu i przełożonemu w firmie Eltel Network Energetyka SA, dr Krzysztofowi Szuchnikowi, za wkład w pracę naukową na wielu etapach, wspólne artykuły oraz nadzór nad rozprawą. Dzięki Ich zaangażowaniu i cierpliwości udało się osiągnąć więcej niż zamierzałem na początku, podejmując ten temat badawczy.

Dziękuję pracownikom Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, w szczególności Pani Agnieszce Kliem, Pani Halinie Kwiatkowskiej-Kasperowicz, Pani Katarzynie Grzybkowskiej, Panu Andrzejowi Augusiakowi oraz Michałowi Gorzkowskiemu, za ogromną pomoc jaką otrzymałem przy realizacji doktoratu wdrożeniowego. Dzięki ich profesjonalizmowi, bezinteresownej życzliwości i pomocy administracyjnej miałem możliwość w pełni skupić się na pracy.

Bardzo dziękuję mojemu niezwykle utalentowanemu koledze z pracy, Michałowi Kołtunowi za nieskończone dyskusje na temat linii kablowych oraz wszystkim pracownikom Eltel Networks Energetyka SA, w szczególności Zarządowi, który zgodził się na podjęcie przeze mnie doktoratu wdrożeniowego. Dziękuję prof. Waldemarowi Kamratowi za mentoring oraz zwykłą koleżeńską pomoc. Dziękuję mojej żonie, Agnieszce, która była moją opoką w najbardziej stresujących momentach. Jej pomoc w redakcji wszystkich rozdziałów pozwoliła uporządkować i przekuć moje myśli w coś czytelnego.

Na koniec chciałbym podziękować wszystkim niewymienionym, a których spotkałem podczas doktoratu i od początku pracy w Eltel Networks Energetyka SA. Każda rozmowa, projekt czy konferencja miała swój wkład w ukształtowanie mnie, co przełożyło się na ostateczną formę rozprawy.

SPIS TREŚCI

OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	4
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	6
1. WSTĘP	8
1.1. MOTYWACJA DO PODJĘCIA TEMATYKI	8
1.2. CEL ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	9
1.3. TEZA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	9
1.4. STRUKTURA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	9
2. AKTUALNY STAN WIEDZY I JEGO OCENA	11
3. OMÓWIENIE PODSTAW TEORETYCZNYCH	21
3.1. MECHANIZMY WYMIANY CIEPŁA	21
3.2. RÓWNANIE BILANSU ENERGII I ZASADA ZACHOWANIA ENERGII	22
3.3. WPŁYW REZYSTYWNOŚCI CIEPLNEJ ZIEMI NA TEMPERATURĘ KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH	25
4. WPŁYW NIEJEDNORODNOŚCI ZIEMI NA JEJ REZYSTYWNOŚĆ CIEPLNĄ	29
4.1. WPROWADZENIE.....	29
4.2. PRZESUSZANIE GRUNTU	30
4.3. STRUKTURA LINII KABLOWEJ	32
4.4. WYPEŁNIENIE KONTROLOWANE	34
5. OBLICZANIE REZYSTANCJI CIEPLNEJ T_4	37
5.1. REZYSTANCJA CIEPLNA WOKÓŁ KABLA UŁOŻONEGO W PRZEPUŚCIE RUROWYM	37
5.2. WPŁYW ŚREDNICY KABLOWYCH PRZEPUSTÓW RUROWYCH NA OBCIĄŻALNOŚĆ PRĄDOWĄ DŁUGOTRWAŁĄ KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA.....	41
5.3. REZYSTYWNOŚĆ CIEPLNA PIASKU I ŚCIEŁKI LEŚNEJ W FUNKCJI WILGOTNOŚCI.....	46
5.4. WNIOSKI	51
6. POMIARY REZYSTYWNOŚCI CIEPLNEJ BETONITU W FUNKCJI TEMPERATURY I WILGOTNOŚCI	52
6.1. WPROWADZENIE.....	52
6.2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU	52
6.3. PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA.....	55
6.4. WNIOSKI	60
7. OPTYMALIZACJA WYPEŁNIENIA KONTROLOWANEGO W LINIACH KABLOWYCH	61
7.1. WPROWADZENIE.....	61
7.2. GEOMETRIA WYPEŁNIENIA KONTROLOWANEGO I ZESTAWIENIE KOSZTÓW INSTALACJI KABLA WN	62
7.3. ALGORYTM OPTYMALIZUJĄCY LINIĘ KABLOWĄ WN	64
7.4. WYNIKI OBLICZEŃ Z WYKORZYSTANIEM ALGORYTMU OPTYMALIZACYJNEGO	67



7.5. WNIOSKI	76
8. BADANIA ZMIAN TEMPERATURY I WILGOTNOŚCI FIZYCZNEGO MODELU LINII KABLOWEJ	77
8.1. WPROWADZENIE.....	77
8.2. OPIS BADAŃ	77
8.2. WYNIKI POMIARÓW	92
8.3. OMÓWIENIE METODY POMIARU WILGOTNOŚCI	92
8.4. OMÓWIENIE WYNIKÓW I WNIOSKI.....	94
9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	105
BIBLIOGRAFIA.....	107
SPIS TABEL.....	111
SPIS RYSUNKÓW	112
SPIS ZAŁĄCZNIKÓW	116

OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy doktorskiej: Filip Ratkowski

Tytuł rozprawy doktorskiej w języku polskim: Badanie wpływu parametrów gruntu na obciążalność prądową długotrwałą kabli elektroenergetycznych

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Study of the influence of soil parameters on the long-term current-carrying capacity of power cables

Język rozprawy doktorskiej: polski

Promotor rozprawy doktorskiej: Stanisław Czapp

Data obrony:

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku polskim: obciążalność prądowa długotrwałą, kable elektroenergetyczne, rezystywność cieplna ziemi

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku angielskim: current-carrying capacity, power cables, soil thermal resistivity

Streszczenie rozprawy w języku polskim:

Jednym z najważniejszych czynników wpływających na obciążalność prądową długotrwałą linii kablowych, poza przekrojem żyły roboczej, są parametry gruntu, w którym kable zostały ułożone. W celu poprawy odprowadzania ciepła z kabli, ziemię rodzimą zastępuje się najczęściej betonitem, czyli mieszaniną piaskowo-cementową, która ma mniejszą rezystywność cieplną w warunkach mniejszej wilgotności masowej od większości gruntów.

W niniejszej rozprawie doktorskiej przedstawiono analizy numeryczne oraz badania eksperymentalne mające na celu sprawdzenie możliwości zwiększenia obciążalności prądowej długotrwałej linii kablowych. Omówiono zjawisko migracji wilgoci w pobliżu kabli, parametry wypełnień kontrolowanych, w tym betonitu oraz aspekty związane z wymianą ciepła w rurowych przepustach kablowych. Część analityczna rozprawy skupiona jest na wykazaniu stosowności niekonwencjonalnych technik zwiększenia obciążalności linii kablowych, do których należą: zwiększenie średnicy przepustów rurowych wykorzystywanych przy układaniu kabli technologią bezwykopową oraz ponadnormatywny przekrój wypełnienia kontrolowanego (betonitu). Dla tej ostatniej przedstawiono przykładową analizę kosztową. W części eksperymentalnej przedstawiono charakterystykę rezystywności cieplnej betonitu

w zależności od temperatury i wilgotności, wykazując poprawę odprowadzania ciepła z linii kablowych przy określonych poziomach wilgotności. Przedstawiono również wyniki trwającego 234 dni eksperymentu, polegającego na zbadaniu rozkładu przestrzennego wilgotności i temperatury wokół eksperymentalnego modelu linii kablowej. Porównano wyniki ułożenia linii kablowej w betonicie oraz przy wykorzystaniu nowej propozycji wypełnienia kontrolowanego, które miało na celu utrzymanie stałej wilgotności tego wypełnienia wokół linii kablowej. Zaproponowane w rozprawie metody zwiększenia obciążalności prądowej długotrwałej linii kablowej mogą być wykorzystane w praktyce.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim:

One of the most important factors influencing the current-carrying capacity of underground power cables, apart from the cross-section of the conductor, are the parameters of the soil in which they are laid. In order to improve heat dissipation from cables, native soil is usually replaced with betonite, i.e., a sand-cement mixture with a lower thermal resistivity in the case of lower bulk moisture than most soils.

This doctoral thesis presents numerical analyzes and experimental studies aimed at increasing the long-term current-carrying capacity of cable lines. The theoretical foundations and mathematical model of the subject matter are presented. The phenomenon of moisture migration, types of backfills and the standard arrangement of the cable line are discussed. The analytical part of the thesis focuses on demonstrating the applicability of unconventional techniques to increase the current-carrying capacity of cable lines, which include increasing the diameter of pipe when the cable line passes under obstacles such as road, river, etc., and the oversized cross-section of the backfill. For the latter, an investment cost in the proposed solution is presented. The experimental part presents the characteristics of betonite thermal resistivity depending on temperature and moisture, showing an improvement in heat dissipation from cable lines at low moisture and no changes in heat conduction in the case of zero moisture. A 234-day experiment, examining the moisture and temperature around the experimental cable line model, is described. Moisture and temperature around the standard setup and in the proposed solution, which aimed to maintain constant moisture in the thermal backfill (betonite), are compared. The methods of increasing the current-carrying capacity of power cables presented in this thesis can be utilized in practice.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

- a – odległość punktów, pomiędzy którymi następuje przewodzenie ciepła, m,
- c_v – objętościowa pojemność cieplna materiału, J/(K·m³),
- h – wysokość wypełnienia kontrolowanego, mm,
- k – przewodność cieplna gruntu, W/(K·m),
- r – promień zewnętrzny kabla elektroenergetycznego, mm,
- r_b – promień zastępczy wypełnienia kontrolowanego, mm,
- w – szerokość wypełnienia kontrolowanego, mm,
- x, y – wymiary ścianek wypełnienia kontrolowanego ($y > x$), mm,
- A – pole powierzchni wymiany ciepła, m²,
- A_s – pole powierzchni emitującej promieniowanie, m²,
- D_e – średnica zewnętrzna kabla, mm,
- I_{dd} – obciążalność prądowa długotrwała, A,
- L – głębokość ułożenia kabla elektroenergetycznego, mm,
- L_G – głębokość ułożenia geometrycznego środka wypełnienia kontrolowanego, mm,
- N – liczba kabli elektroenergetycznych pod obciążeniem przy ich ułożeniu w wypełnieniu kontrolowanym, -,
- P – funkcja kosztu, PLN,
- Q_{conv} – strumień energii cieplnej wywołanej konwekcją, W,
- Q_{rad} – strumień energii cieplnej wywołanej radiacją, W,
- Q_{cond} – strumień energii cieplnej wywołanej przewodzeniem, W,
- R – rezystancja żyły roboczej przy przepływie prądu przemiennego, Ω/m,
- T_4 – rezystancja cieplna medium otaczającego kabel elektroenergetyczny (grunt/wypełnienie kontrolowane), (K·m)/W,
- T_4' – rezystancja cieplna powietrza znajdującego się w rurze przepustowej, (K·m)/W,
- T_4'' – rezystancja cieplna rury przepustowej, (K·m)/W,
- T_4''' – rezystancja cieplna medium wokół rury przepustowej, (K·m)/W,
- α – kąt skarpy rowu kablowego, °,
- ϑ – temperatura, K,
- κ – współczynnik przejmowania ciepła, W/(m²K),
- λ – współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m·K),
- ρ_e – rezystywność cieplna gruntu, (K·m)/W,
- ρ_c – rezystywność cieplna wypełnienia kontrolowanego, (K·m)/W,
- σ – współczynnik emisyjności, -,

OSD	–	Operator Sieci Dystrybucyjnej
OSP	–	Operator Sieci Przesyłowej
nn	–	niskie napięcie
SN	–	średnie napięcie
WN	–	wysokie napięcie
NN	–	najwyższe napięcie
CB	–	Cross Bonding (pol. uziemienie przez krzyżowanie ekranów)
FEM	–	Finite Element Method (pol. metoda elementów skończonych)
FTB	–	Fluidized Thermal Backfill (pol. wypełnienie kontrolowane)
IEEE	–	Institute of Electrical and Electronics Engineers (pol. Instytut Inżynierów Elektryków i Elektroników)
IEC	–	International Electrotechnical Commission (pol. Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna)
PVC	–	Polyvinyl chloride (pol. polichlorek winylu)
RM	–	Round Multiwire (Conductor) (pol. okrągła, wielodrutowa żyła robocza)
RMC	–	Round Multiwire Compacted (Conductor) (pol. okrągła, wielodrutowa, zagęszczana żyła robocza)
RMS	–	Round Multiwire Segmented (Conductor) (pol. okrągła, wielodrutowa, segmentowa żyła robocza)
SPB	–	Single Point Bonding (pol. uziemienie jednostronne)
XLPE	–	Cross-linked polyethylene (pol. polietylen sieciowany)

1. WSTĘP

1.1. MOTYWACJA DO PODJĘCIA TEMATYKI

W związku ze zwiększającą się konsumpcją energii elektrycznej oraz rozwojem odnawialnych źródeł energii w krajowych systemach dystrybucyjnych i przesyłowych niezbędne jest zapewnienie bezpieczeństwa sieci elektroenergetycznej, co przekłada się na budowę nowych linii napowietrznych i kablowych, połączeń transgranicznych oraz modernizację tych istniejących. Linie kablowe jako ogół, są niewielką częścią sieci przesyłowych i dystrybucyjnych. Zwykle występują w miastach lub w innych miejscach, w których budowa linii napowietrznej jest raczej wykluczona, tj.: zasilanie lotnisk, przecinanie rzek lub przez wzgląd na względy estetyczne związane z danym terenem. W szczególności linie kablowe buduje się jako linie abonenckie łączące farmy wiatrowe i fotowoltaiczne z systemem elektroenergetycznym, stąd również motywacja, aby opracować optymalne rozwiązanie dedykowane do obiektu przyłączanego.

Linie kablowe podzielić można na układane na całej ich długości wyłącznie na małej głębokości, które są zazwyczaj krótkie oraz te z co najmniej jednym przepustem rurowym, powodującym odcinkowe zwiększenie głębokości ułożenia linii kablowej. Zmiana sposobu ułożenia kabli (np. ułożenie w przepustach) jest ważna z punktu widzenia ich obciążalności prądowej długotrwałej. Obciążalność tą determinuje występujący lokalnie najbardziej niekorzystny odcinek z punktu widzenia odprowadzania ciepła z linii kablowej. Dla przypadku jednolitego, płytkiego ułożenia linii kablowej, poprawa obciążalności prądowej będzie wymagała wykorzystania innych technik zwiększania transportu ciepła, niż dla linii z występującymi przepustami rurowymi.

Aby wyjść naprzeciw praktycznym problemom związanym z wyznaczeniem obciążalności prądowej długotrwałej, w pracy skupiono się na dwóch aspektach:

- analizie wpływu środowiska wokół linii kablowej na jej obciążalność,
- niekonwencjonalnych technikach zwiększenia obciążalności linii kablowych.

Badania zrealizowane w ramach pracy doktorskiej określają wpływ różnych czynników oraz sposobów ułożenia linii kablowych na odprowadzanie ciepła, generowanego głównie w wyniku strat Joule'a-Lenza. Zaprezentowane wyniki mogą przyczynić się do projektowania

linii kablowych o większej obciążalności, niższej awaryjności oraz z mniejszymi nakładami finansowymi. Przeprowadzone badania mają szerokie zastosowanie na całym świecie ze względu na ogólną standaryzację metod projektowania i budowy.

1.2. CEL ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pierwszym celem jest zbadanie rezystywności cieplnej ziemi rodzimej i wypełnień kontrolowanych w zależności od ich temperatury i wilgotności oraz wpływu tych wartości na obciążalność prądową kabli elektroenergetycznych. Drugim celem jest analiza wpływu sposobu ułożenia linii kablowych na obciążalność prądową długotrwałą. Trzecim celem jest optymalizacja przekroju żył roboczych kabli w liniach kablowych wysokiego napięcia, z uwzględnieniem wypełnienia kontrolowanego. Ostatnim celem jest zbadanie wilgotności i temperatury wokół modelu linii kablowej i propozycja nowego rozwiązania mającego na celu polepszenie warunków odprowadzania ciepła.

1.3. TEZA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Parametry cieplne środowiska otaczającego kable elektroenergetyczne ułożone w ziemi wpływają na ich obciążalność prądową długotrwałą. Zwiększenie przepustowości linii kablowych można więc uzyskać nie tylko zwiększając przekrój żył roboczych kabli, ale również dzięki polepszeniu warunków oddawania ciepła z kabli do otoczenia. W przypadku linii kablowych wysokiego napięcia może to być korzystne z ekonomicznego punktu widzenia.

1.4. STRUKTURA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

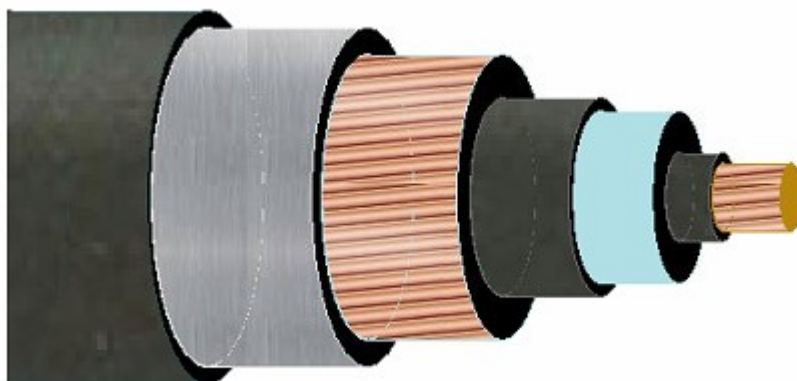
Rozprawa doktorska zawiera 9 rozdziałów oraz ponadto: streszczenie, wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów, spis treści, bibliografię, spis rysunków, spis tabel oraz załączniki.

We wstępie (rozdział pierwszy) przedstawiono tło stosowalności rozprawy, cel oraz tezę rozprawy. Rozdział drugi zawiera przegląd literatury wraz z krytyczną jej oceną. W rozdziale trzecim omówiono podstawy teoretyczne, na których oparto badania. Rozdział czwarty zawiera omówienie wypełnienia kontrolowanego i zjawisk w nim zachodzących. Rozdział piąty zawiera omówienie sposobu obliczania rezystywności cieplnej elementów linii kablowych w różnych konfiguracjach ułożenia. Rozdział szósty zawiera omówienie pomiarów rezystywności cieplnej betonitu. W rozdziale siódmym przedstawiono wyniki analizy mającej na celu optymalizację kosztową instalacji linii kablowej. Rozdział ósmy zawiera wyniki

pomiarów temperatury i wilgotności wokół nowej propozycji układu linii kablowej. Rozdział dziewiąty zawiera podsumowanie oraz wnioski.

2. AKTUALNY STAN WIEDZY I JEGO OCENA

Obciążalność prądowa długotrwała kabli elektroenergetycznych to maksymalna wartość prądu, którą może przesyłać system kablowy w dowolnym czasie bez przekraczania najwyższej dopuszczalnej temperatury kabla, dzięki czemu nie dochodzi do jego uszkodzeń cieplnych. Obciążalność prądowa to jeden z najistotniejszych parametrów linii kablowej z punktu widzenia operatora sieci przesyłowej i dystrybucyjnej. Wraz ze wzrostem wartości przewodzonego prądu, zwiększa się temperatura kabla, a ciepło oddawane jest na zewnątrz przy udziale różnych mechanizmów transportu ciepła. Obciążalność jest z tego powodu ograniczona do najbardziej wrażliwego termicznie elementu, którym najczęściej jest izolacja kabla. W zależności od użytego materiału, jej maksymalna dopuszczalna długotrwała temperatura wynosi 90 °C dla polietylenu sieciowanego (rys. 1) (ang. *cross-linked polyethylene*, XLPE), stosowanego w kablach od średnich do najwyższych napięć (SN-NN) lub 70 °C dla polichlorku winylu (PVC, stosowanego w kablach niskich napięć, nn). Dopuszczalne jest krótkotrwałe przekroczenie tych wartości temperatury: 105 °C przy przeciążeniach trwających nie dłużej niż 100 h w ciągu roku i 500 h w ciągu całego okresu eksploatacji kabla, oraz 250 °C przy zwarcjach, trwających krócej niż 5 s [1,2]. W przypadku przeciążenia linii kablowej, przyczyniającego się do przekroczenia wartości granicznych temperatury elementów konstrukcji kabla, ogranicza się jego trwałość.



Rysunek 1. Kabel (F)2XS(FL)2Y 1x1000RMC/95 mm 110 kV, izolacja XLPE [3]

Problematyka szacowania obciążalności linii kablowych sięga wczesnych lat 20. XIX w. [4,5], a jako pierwszą postać, która w znacznym stopniu przyczyniła się do zapoczątkowania badań w tej dziedzinie, należy wymienić Edwarda Kennelly'ego. W 1893 roku przedstawił on problematykę wpływu temperatury na linie kablowe, czego efektem była publikacja książki „On the Carrying Capacity of Electric Cables Submerged, Buried or Suspended in Air” [6]. Jak można ocenić z perspektywy czasu, następstwem zwiększenia świadomości środowiska elektroenergetyków na ten temat była duża liczba, znaczących z punktu naukowego, prac teoretycznych, doświadczalnych oraz wytycznych projektowych. Najistotniejsze prace [7-9] pojawiły się niedługo po roku 1910. Do wkładu w stan wiedzy przyczyniali się głównie Brytyjcy i amerykańscy naukowcy, przy czym Brytyjczycy jako pierwsi, pod przewodnictwem komitetu British Electrical and Allied Industries Research Association (ERA), zebrali dotychczasowe osiągnięcia oraz aktualne dane eksperymentalne i opublikowali tablice obciążalności kabli używanych w tamtym czasie. Struktura tego stowarzyszenia/komitetu, metodyka działania w podgrupach oraz prezentacja danych stanowiła wyznacznik dla obecnych metod działania grup roboczych IEC (ang. *International Electrotechnical Commission*). Przez ograniczenia w komunikacji pomiędzy Europą i Ameryką, powstawało w tamtym czasie wiele dzieł dublujących się lub niekompletnych. Takim przypadkiem był opublikowany w 1930 roku przez komitet NEC (ang. *National Electrical Code*) model Rosha, który, pomimo błędów merytorycznych i braków istotnych zagadnień, wyznaczył standard obliczeń wykonywanych przez inżynierów w Ameryce Północnej na niemal 30 kolejnych lat. Na przestrzeni tych lat, dzięki wprowadzeniu metod matematycznych, naukowcom udało się uwzględnić różne czynniki wpływające na obciążalność kabli, dodając do standardu obliczeń obciążalności wpływ m.in. efektu naskórkowości i zbliżenia [10] oraz rozkładu ciepła i pola elektromagnetycznego w kablach wielożyłowych [11].

Obecnie prawdopodobnie najczęściej cytowanym artykułem przez naukowców z danej dziedziny jest przełomowa praca Nehera i McGratha [12], którą zgodnie uznaje się za otwierającą „nową erę” obliczeń obciążalności kabli elektroenergetycznych. W opublikowanym w 1957 roku artykule przeglądowym udało się im zebrać większość najważniejszych dotychczasowych prac dotyczących obciążalności linii kablowych oraz przedstawili ulepszoną metodę na obliczanie współczynnika geometrycznego, istotnego przy wyznaczaniu wpływu rezystancji cieplnej wypełnienia kontrolowanego linii kablowej.

Przewagą tej pracy nad innymi było przedstawienie czytelnikowi w jasny sposób metodyki obliczania obciążalności oraz – przede wszystkim – szerokie uznanie środowiska naukowego dla zaproponowanej metody [5]. Do dziś wykonuje się kalkulacje wg metody Nehera-McGratha, ponieważ na jej podstawie ostatecznie powstał obowiązujący obecnie standard IEC 60287 [13], wydany po raz pierwszy w 1969 roku. Wraz z rozwojem komputeryzacji, środowisko elektroenergetyków zaczęło interesować się metodami numerycznymi i w 1986 r. Anders wraz z El-Kady’em stworzyli pierwszy program komputerowy do obliczeń obciążalności w stanie ustalonym, o nazwie FIECAG [14]. Projekt szybko został uznany jako istotny z praktycznego punktu widzenia i był dalej aktualizowany o kolejne funkcje, m.in. stany przejściowe [15] (do dzisiejszej wersji programu CYMCAP), a autorzy dzięki doniosłości swojego osiągnięcia oraz kolejnych prac są obecnie jednymi z istotniejszych osób w historii dziedziny. W 1997 Anders opublikował książkę „Rating of Electric Power Cables: Ampacity Computations for Transmission, Distribution, and Industrial Applications” [16], która z rozszerzeniem [17] stanowi filar wiedzy o obciążalności linii kablowych.

Obecnie praktycznie wszystkie obliczenia wykonywane są komputerowo, za pomocą programów typu FEM (metody elementów skończonych, ang. *Finite Element Method*) lub takich jak CYMCAP [3], Cableizer [18] i ELEK [19], zwłaszcza jeśli obliczane są układy o złożonych kształtach geometrycznych, z uwzględnieniem innych źródeł ciepła bądź stanów przejściowych [20].

W niniejszej rozprawie dokonano analizy wpływu warunków otoczenia na obciążalność linii kablowych. Najwięcej uwagi poświęcono obciążalności linii kablowych wysokiego napięcia. To, co czyni linie kablowe ciekawym obiektem badań, to porównanie kosztów budowy pomiędzy nimi a liniami napowietrznymi – koszty budowy tych pierwszych są około 3,5 razy większe. Z tego powodu linie kablowe WN buduje się tylko w miejscach, gdzie linie napowietrzne nie mogą powstać z powodów technicznych (np. rzeki, autostrady), z powodów zabudowy pod lub wokół linii (miasta, farmy wiatrowe, lotniska), gdy linie napowietrzne nie są akceptowane społecznie lub spodziewane są szczególnie trudne warunki otoczenia, np. atmosferyczne. W wyniku tego w Polsce istnieje tylko 558 km linii kablowych WN w stosunku do 33423 km linii napowietrznych, stanowiąc 1,6% całości długości linii przesyłowych i dystrybucyjnych WN [21]. Dla porównania, udział linii kablowych SN w stosunku do całej długości linii dystrybucyjnych SN w 2020 r. wyniósł 28,4%, a docelowo

do 2040 roku ma zostać zwiększony do średniego poziomu w Unii Europejskiej, który wynosi obecnie 50%.

Z powodu wspomnianej wyżej różnicy kosztu projektu i budowy linii kablowej WN w stosunku do analogicznej linii napowietrznej, kable układa się na krótkich odcinkach – najdłuższa linia kablowa WN w Polsce ma jedynie około 38 km [22]. Optymalizacja obciążalności krótkich odcinków jest łatwiejsza, ze względu na ograniczoną liczbę punktów na trasie linii, w których warunki wpływające na obciążalność są najgorsze – odcinki o najmniejszej obciążalności determinują dobór kabla.

Czynnikami wpływającymi na obciążalność, poza konstrukcją kabla, są [13,23]:

- a. Rezystywność cieplna otoczenia: ziemi rodzimej i wypełnienia kontrolowanego [24];
- b. Głębokość ułożenia kabli;
- c. Odległość pomiędzy fazami oraz układ ułożenia (płaski, trójkątny);
- d. Sposób łączenia żył powrotnych [25];
- e. Średnica przepustów kablowych, jeśli kable są w nich układane oraz ich wypełnienie [26];
- f. Natężenie promieniowania słonecznego i prędkość wiatru, jeśli kable są układane w powietrzu [27];
- g. Temperatura gruntu i powietrza;
- h. Wpływ zewnętrznych źródeł ciepła.

Z powyższych, czynnikiem mającym największy wpływ na obciążalność jest rezystywność cieplna otoczenia linii kablowej (a) [28]. Warunki f, g, h są poza możliwością zmian. Pozostałe zwykle wynikają z uzgodnień z inwestorem linii kablowej (c-e) lub ze standardów oraz rozwiązań technicznych w projekcie (b). Na odcinkach linii kablowej, gdzie jeden lub więcej czynników przyczynia się obniżenia obciążalności prądowej względem pozostałej części linii kablowej można stosować następujące rozwiązania:

- i. Instalacja wypełnienia kontrolowanego o obniżonej rezystywności cieplnej w bezpośrednim otoczeniu linii kablowej lub zwiększenie jego pola przekroju;

- ii. Instalacja systemów chłodzących – wymuszonego obiegu wody [29] lub prętów albo blach metalowych, których zadaniem jest ułatwienie oddawania ciepła w kierunku powierzchni ziemi;
- iii. Zwiększenie wilgotności ziemi;
- iv. Separacja termiczna źródeł ciepła.

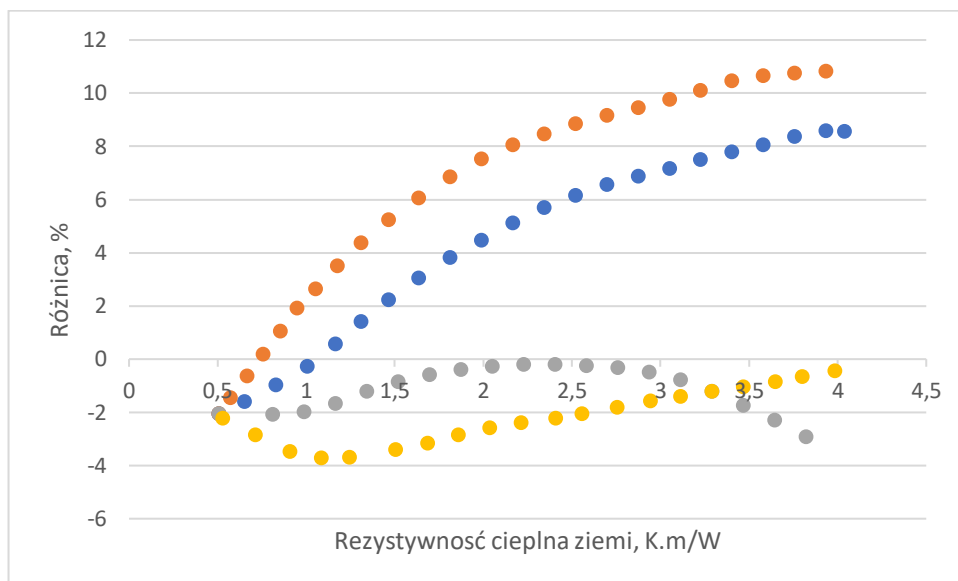
Rezystywność cieplna otoczenia kabli jest obiektem zainteresowania elektroenergetyków od lat 50. XX w. [17]. Właśnie wtedy Komitet Izolowanych Przewodników IEEE (ICC – ang. *Insulated Conductor Committee*) rozpoczął projekt związany z poznaniem właściwości przewodnictwa cieplnego ziemi oraz technologii jego pomiaru. Zainteresowanie IEEE tym tematem oraz powstanie dedykowanego komitetu było wywołane pierwszymi wynikami pomiarów rezystywności cieplnej różnych cieczy oraz materiałów na przestrzeni lat 1930-1940. Pierwszy raport środowiska elektroenergetycznego (grupy związanej z IEEE) o pomiarach rezystywności cieplnej w branży został opublikowany w 1966 roku [30]. W następnych latach w Ameryce Północnej nastąpił wzrost liczby budowanych linii kablowych, a dzięki większej dostępności do mierników rezystywności cieplnej (pierwsze wersje mierników do użytku komercyjnego wprowadzono w połowie lat 70. XX w.) zaczęto publikować wyniki pomiarów, które, ze względu na dużą rozbieżność osiągniętych rezultatów, doprowadziły do konieczności opracowania standardu metodyki pomiarów rezystywności cieplnej. Zbiorną wersję wszystkich pomniejszych prób standaryzacji wydano jako standard P442 w 1981 roku [31]. W międzyczasie, w 1957 r. Neher i McGrath opublikowali wcześniej wspomniany artykuł [12], w którym przedstawili metodę obliczania rezystywności otaczającego medium, biorąc pod uwagę bezpośrednio otoczenie wypełnienia kontrolowanego. Dzięki wielu pracom (m.in. [12,32,33]) ustalono, że niewielka zmiana geometrii wypełnienia kontrolowanego (ang. *backfill*) wpływa na zauważalną zmianę w obciążalności linii kablowej. W 1979 r. Saleeby et al. [34], a w 1982 r. El-Kady [35] przedstawili metodę optymalizacyjną wypełnienia kontrolowanego. Ponieważ wypełnienie kontrolowane wymaga ustalenia kilku jego parametrów technicznych, takich jak szerokość, wysokość, rezystywność cieplna itd., Saleeby przedstawił wyniki wpływu każdego z parametrów wypełnienia kontrolowanego na obciążalność linii kablowej, a 2 lata później El-Kady przedstawił algorytm optymalizujący parametry wypełnienia kontrolowanego do pożądanej obciążalności. Było to istotne osiągnięcie w tamtym czasie, ze względu na

potrzebę uwzględnienia znacznego, w ujęciu całości kosztów instalacji linii kablowej, kosztu betonitu wykorzystywanego jako wypełnienie kontrolowane, który został opracowany dla branży elektrycznej zaledwie rok wcześniej.

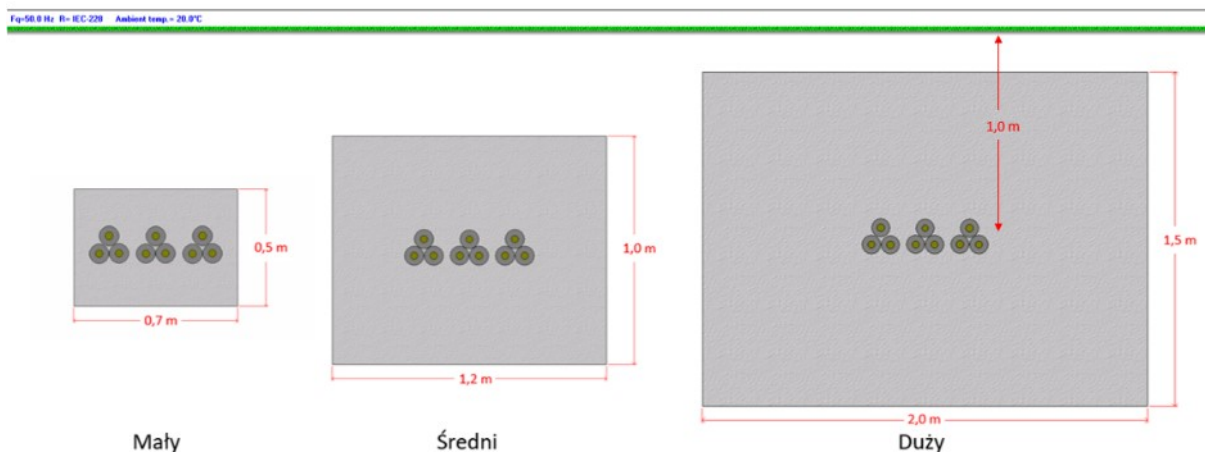
Betonit ma parametry inne niż ziemia rodzima i może mieć różny skład w zależności od producenta lub wytycznych w dokumentacji projektowej. Oryginalnie betonit (lub FTB – Fluidized Thermal Backfill) jest mieszaniną przesianego piasku, cementu, popiołu lotnego i innych kruszyw. Obecnie betonitem nazywana jest mieszanina zawierająca co najmniej piasek i cement, mająca rezystywność cieplną w stanie wysuszenia co najwyżej $1,2 \text{ (K}\cdot\text{m)/W}$ [36-38]. Rezystywność cieplna szczególnie zależy od zawartości wody, stąd specjalne mieszanki mają zwiększoną odporność przeciw wysuszaniu, zwiększając ich zdolności odprowadzania ciepła z eksploatowanej linii kablowej. Informacje o betonicie i innych rodzajach wypełnień kontrolowanych zawarto w rozdziale 5.

Metody obliczeniowe obciążalności kabli elektroenergetycznych, w środowisku elektroenergetyków, są stosunkowo dobrze poznane, ze względu na powszechność obowiązującego standardu IEC 60287 (bazującego na modelu Nehera-McGratha), którego zaletą jest łatwość praktycznego zastosowania. Wyniki obciążalności układów obliczanych metodą IEC 60287 wypadają bardzo dobrze w porównaniach z wynikami eksperymentalnymi oraz FEM, wykazując tylko niewielkie rozbieżności dla prostych układów kablowych [39-42], różnice rzędu 10% dla zaawansowanych układów [40,42] i duże rozbieżności dla wyjątkowo skomplikowanych przypadków [39]. Te różnice dobrze obrazują wyniki z artykułu De Leon'a i Andersa [40] (rys. 2), którzy przeprowadzili porównanie obciążalności prądowej względem rezystywności cieplnej ziemi trzytorowej linii kablowej, ułożonej na głębokości 1 m w wypełnieniach o różnych wymiarach: od małego (0,5 x 0,7 m) do dużego (1,5 x 2 m) o rezystywności cieplnej $0,8 \text{ (K}\cdot\text{m)/W}$ oraz ułożonej bezpośrednio w ziemi. Obciążalność została przez nich obliczona za pomocą programu CYMCAP oraz typu FEM. Wyniki (rys. 2) wykazały, że najbardziej zbliżone wartości obciążalności prądowej pomiędzy obiema metodami obliczeń uzyskuje się dla przypadków ułożenia kabli bezpośrednio w ziemi oraz w wypełnieniu kontrolowanym o dużych rozmiarach (wyniki wg standardu IEC 60287 dają wartości mniejsze od FEM o max. 4%), zaś najgorsze dla ułożenia w wypełnieniu kontrolowanym małym (wyniki wg standardu IEC 60287 dają wartości większe od FEM o max.

11% - im większa różnica rezystywności cieplnej pomiędzy wypełnieniem kontrolowanym a ziemią rodzimą, tym większa różnica w wynikach).



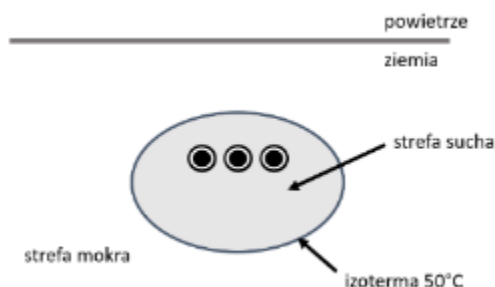
Rysunek 2. Różnica obciążalności wynikająca z różnych metod obliczania zmiennej T_4 (zmienną tę opisano w rozdziale 3.3) dla układów o różnych wymiarach wypełnienia kontrolowanego. Przebiegi krzywych: czerwonej (wypełnienie kontrolowane o małym przekroju, rys. 3), niebieskiej (średni przekrój), żółtej (duży przekrój) i szarej (kable bezpośrednio ułożone w ziemi) wskazują różnicę w wyliczonej obciążalności metodą IEC względem obliczeń metodą FEM. Odtworzenie obliczeń z [40]



Rysunek 3. Ułożenie linii kablowych w wypełnieniach kontrolowanych o różnym przekroju - rysunek poglądowy. Na podstawie [40]

Jednym ze znanych badaczy w tematyce stosowania wypełnienia kontrolowanego jest Paweł Ocioń z Politechniki Krakowskiej, który skupia się głównie na wymianie ciepła. Od kilku lat wraz ze swoim zespołem publikuje wyniki badań, które dotyczą optymalizacji obciążalności linii kablowych względem nakładów inwestycyjnych oraz prezentuje wyniki badań laboratoryjnych uzyskanych na stanowisku do pomiarów rozkładu temperatury wokół kabli elektroenergetycznych, które porównuje z wynikami FEM (przy czym wyniki FEM nie odbiegają od wyników pomiarów laboratoryjnych). Optymalizacja badanych układów linii kablowych oraz nakładów inwestycyjnych oparta jest o autorski algorytm [43-46]. Idea takich porównań nie jest nowa (m. in. [47,48]), jednak podejście Ociońa jest inne niż u pozostałych – potrzeba badań jest generowana przez przemysł, ponadto przedstawiając szerokie zastosowanie wyników swoich badań. Dodatkowo bada on istniejące mieszanki wypełnień kontrolowanych na rynku [49,50] oraz przedstawia własne propozycje ulepszenia mieszanek betonitu [44], każdorazowo wykazując oszczędności wynikające ze stosowania mieszanek o konkretnych właściwościach, w szczególności rezystywności cieplnej.

Eksperymentalne badania i analizy numeryczne nad migracją wilgoci wokół linii kablowych prowadzi Ossama Gouda z Uniwersytetu Kairskiego. Na istotność tego tematu może wskazywać awaria dwóch linii kablowych 132 kV w Londynie w 1962, spowodowana wysuszeniem gleby [51]. W wyniku migracji wilgoci, rezystywność cieplna medium wokół linii kablowej może wzrosnąć nawet trzykrotnie [17,24], dlatego uwzględnienie tego mechanizmu jest bardzo istotne przy obliczeniach obciążalności linii kablowej, która ma docelowo pracować przy pełnym obciążeniu. Badania Goudy wykazały, że migracja wilgoci rozpoczyna się w temperaturze, która jest zależna od rodzaju ziemi i procentowego udziału materiału o małej frakcji [47,52]. Od tych właściwości zależy również czas formowania strefy wysuszonej, który jest dłuższy dla mieszanki o dużej zawartości materiału o małej frakcji. Wszystkie badane przez niego mieszanki wykazały maksimum prędkości formowania strefy suchej przy temperaturze bliskiej 60 °C, w przeciwieństwie do wskazań normy IEC 60287, która podaje wartość 50 °C (rys. 4). Takie same wyniki wskazuje dla kabli 230 kV de Leon et al. [53]. Nie bez znaczenia są prace [54,55] pokazujące porównania wyników obciążalności prądowej, obliczonych wg standardu IEC [13], do wyników otrzymanych z programów typu FEM przy zależnej rezystywności cieplnej medium od temperatury wokół linii kablowej.



Rysunek 4. Graficzna reprezentacja modelu migracji wilgoci wokół linii kablowej. Kontur 50 °C wskazuje granicę pomiędzy ośrodkami: suchym i mokrym. Wewnątrz strefy suchej temperatura przekracza 50 °C, która jest uznana jako graniczną dla powstania strefy suchej

Za największe kompendium wiedzy na temat migracji wilgoci można uznać raport grupy roboczej B1.41 CIGRE z 2017 r. [56], który zawiera najważniejsze informacje na temat zjawiska oraz opisuje wnioski na podstawie *case-study* otrzymane od respondentów z wielu krajów. Mechanizm migracji wilgoci zostanie szerzej omówiony w rozdziale 5, natomiast w tym rozdziale należy podkreślić brak w środowisku naukowym zgodności co do poprawności obowiązującego modelu tej migracji. Niektóre grupy już od 1985 r. wskazują, że model dwustrefowy (rys. 4) migracji wilgoci jest zbyt uproszczony, a mechanizmy transportu wilgoci w glebie nie są wywoływane na skutek różnicy temperatury, tylko za sprawą gradientu temperatur, a tym samym przez gęstość strumienia ciepła. Oczywiście jest to słuszne spostrzeżenie, jako że model dwustrefowy nie zakłada obszarów częściowo wyschniętych, a jak wiadomo takie obszary w rzeczywistości muszą się pojawiać. Jednak powyższe jest tylko niewielkim problemem w porównaniu do założenia jednorodności ziemi w modelu IEC 60287.

Podsumowując, badania wskazują, że wypełnienie kontrolowane wpływa pozytywnie na obciążalność prądową [13-18,20,23,24,26-57]. To, na co niniejsza rozprawa ma wskazywać, to fakt, że niewystarczająco w elektroenergetyce wykorzystuje się korzyści z potencjalnych informacji na temat ziemi rodzimej (które są szeroko omówione m.in. w [59]) i wypełnienia kontrolowanego, w których mają być układane linie kablowe. Ponadto inżynierowie korzystający z wytycznych obecnych standardów [13] nie otrzymują z nich informacji na temat metody przeprowadzania badań rezystywności cieplnej ziemi lub choćby, wartości rezystywności cieplnej wybranych, najczęściej występujących ziem rodzimych i typów wypełnień kontrolowanych. W obowiązującej normie SEP-E 004 [36] podana jest informacja, ile powinna wynosić rezystywność cieplna betonitu (mniej niż 1,2 (K·m)/W), jednak nie

wskazuje się na dokładną wartość, którą można by było przyjąć, co domniema konieczność badania lub, co najmniej, otrzymania certyfikatu produktu od producenta. Brak ustandaryzowanych wytycznych wartości rezystywności cieplnych materiałów wykorzystywanych w budowie linii kablowych, którymi mógłby się posługiwać projektant jest zaskakująca w porównaniu z tym, że procedura przygotowania betonitu jest bardzo dokładna - wskazuje na proporcje mieszanki piaskowo-cementowej i jej ubicie, czyli rzeczy, na które projektant nie ma wpływu.

Poza tym, istnieje wiele innych problemów i braków w standardzie IEC 60287, które są w przyszłości do poruszenia. Brakuje badań podstawowych w tematyce obliczeń obciążalności prądowej długotrwałej, m.in.: powstawania gradientu wilgotności wokół linii kablowych, wypracowania modelu matematycznego uwzględniającego kierunki przepływu ciepła z linii kablowej w innych kierunkach niż tylko ku powierzchni ziemi, oraz uwzględniającego powierzchnie ziemi jako złożoną granicę, która jest zależna od typu nawierzchni i warunków atmosferycznych. Dodatkowo, założenie jednorodności ziemi jest poważną przeszkodą przy poprawnej determinacji obciążalności prądowej linii kablowej, także dla analiz numerycznych. Ze względu na brak modelu uwzględniającego gradient wilgoci w ziemi, jej niejednorodność oraz brak dedykowanej temu metodologii pomiarowej, obecne metody obliczeniowe obciążalności prądowej kabli uzasadniają dalsze badania w tej tematyce.

3. OMÓWIENIE PODSTAW TEORETYCZNYCH

3.1. MECHANIZMY WYMIANY CIEPŁA

W wymianie ciepła uczestniczą trzy mechanizmy: przewodzenie, konwekcja i radiacja [16,17,60,61]. Mechanizmy konwekcji i radiacji zachodzą z powierzchni kabla do środowiska zewnętrznego, którym jest powietrze. Transport ciepła od kabli ułożonych w powietrzu jest bardziej złożony niż w przypadku kabli ułożonych w ziemi lub wodzie.

Przewodzenie

Przewodzenie to mechanizm przenoszenia ciepła, który występuje pomiędzy warstwami konstrukcji kabla i dominuje w przypadku oddawania ciepła z kabli ułożonych w ziemi lub wodzie [60]. Polega ono na transporcie ciepła z jednego punktu do drugiego przez kolizje międzycząsteczkowe. Przy występującym gradiencie temperatury, cząsteczki z większą temperaturą, tj. większą energią wewnętrzną, przekazują ją w postaci energii kinetycznej cząsteczkom o mniejszej temperaturze. W ten sposób następuje stały transport energii dążący do równowagi temperatury w układzie zamkniętym. Przewodzenie opisane jest uproszczonym wzorem Fourier'a:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{\lambda}{a} A (\theta_{w1} - \theta_{w2}), \quad (1)$$

gdzie:

A – pole powierzchni wymiany ciepła, m^2 ,

λ – współczynnik przewodzenia ciepła, $W/(m \cdot K)$,

θ_{w1}, θ_{w2} – temperatura punktów, pomiędzy którymi rozpatruje się przewodzenie, K ,

a – odległość między punktami, m .

Konwekcja

Konwekcja to mechanizm transportu ciepła pomiędzy powierzchnią kabla i środowiskiem zewnętrznym, który można podzielić na konwekcję naturalną i wymuszoną. Konwekcja naturalna występuje, kiedy przenoszenie ciepła jest wywołane przez siły wyporu (mieszanie) płynów lub gazów o gradiencie gęstości wywołanym różnicą temperatur,

natomiast konwekcja wymuszona jest skutkiem oddziaływania sił zewnętrznych, takich jak wentylator lub wiatr. Konwekcja opisana jest równaniem Newtona:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = \kappa A(\theta_w - \theta_\infty), \quad (2)$$

gdzie:

κ – współczynnik przejmowania ciepła, W/(m²K),

A – pole powierzchni wymiany ciepła, m²,

θ_w – temperatura powierzchni, K,

θ_∞ – temperatura płynu, K.

Radiacja (promieniowanie ciepłe)

Radiacja to mechanizm, który nie wymaga medium – ciepło jest przenoszone przez emisję energii z powierzchni ciała. Strumień energii promieniowania ciepłego jest ściśle zależny od powierzchni ciała (rozmiaru, współczynnika emisyjności) oraz temperatury, co przedstawia zależność:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \sigma \sigma_{\text{SB}} A_s (\theta_s^4 - \theta_{\text{ot}}^4), \quad (3)$$

gdzie:

σ – współczynnik emisyjności, -,

σ_{SB} – stała Stefana-Boltzmana równa 5,667*10⁻⁸, W/(m²K⁴),

A_s – pole powierzchni emitującej promieniowanie, m²,

$\theta_s, \theta_{\text{ot}}$ – temperatury ośrodków, pomiędzy którymi rozpatruje się promieniowanie ciepłe, K.

3.2. RÓWNANIE BILANSU ENERGII I ZASADA ZACHOWANIA ENERGII

Zasada zachowania energii jest podstawą do wyznaczenia transferu ciepła z kabla elektroenergetycznego. Przedstawia się ją w postaci równania:

$$\dot{Q}_{\text{in}} + \dot{Q}_{\text{gen}} = \Delta \dot{Q}_{\text{stor}} + \dot{Q}_{\text{out}}, \quad (4)$$

gdzie:

\dot{Q}_{in} – strumień ciepła dostarczonego do kabla przez promieniowanie słoneczne lub inne źródła promieniowania, takie jak sąsiednie kable w powietrzu lub w ziemi, W,

\dot{Q}_{gen} – strumień ciepła wydzielonego w przewodniku na skutek strat dielektrycznych, ferromagnetycznych i w postaci ciepła Joule’a-Lenza, W,

$\Delta\dot{Q}_{stor}$ – zmiana strumienia ciepła zmagazynowanego wewnątrz kabla, W,

\dot{Q}_{out} – strumień ciepła oddanego do otoczenia kabla w wyniku działania mechanizmów wymiany ciepła, W.

Wyrażenia \dot{Q}_{in} i \dot{Q}_{out} , zależące od zjawisk na powierzchni kabla, są proporcjonalne do pola powierzchni, zaś wyrażenia \dot{Q}_{gen} i $\Delta\dot{Q}_{stor}$ są proporcjonalne do objętości. W stanie ustalonym nie ma zmiany w magazynowaniu energii ($\Delta\dot{Q}_{stor} = 0$).

W przypadku kabla ułożonego w ziemi, zjawisko przewodzenia występuje we wszystkich warstwach kabla oraz od kabla do gruntu. Ponieważ długość kabla jest znacznie większa niż jego średnica, wpływ odcinków kabla położonych dalej niż rozpatrywany odcinek dx jest pomijalny, sprowadzając równanie przewodnictwa cieplnego do dwóch wymiarów. Dla najprostszego modelu zakłada się, że kabel znajduje się w nieskończonym medium o jednolitej temperaturze początkowej. W tym przypadku równanie przewodzenia ciepła jest zapisywane z uwzględnieniem warunków przejściowych, które wyrażają zmianę temperatury w czasie:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \dot{q}_{gen} = c_v \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (5)$$

gdzie:

θ – różnica temperatur pomiędzy powierzchnią kabla a medium, w którym on się znajduje, K,

$\frac{\partial \theta}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial y}$ – gradient temperatury w kierunku x i y ,

ρ – rezystywność cieplna, (K·m)/W,

\dot{q}_{gen} – strumień wygenerowanego ciepła na jednostkę objętości, W/m³,

c_v – objętościowa pojemność cieplna materiału, J/(K m³).

Dla układu cylindrycznego równanie (5) przyjmuje postać:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \right) + \dot{q}_{\text{gen}} = c_v \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (6)$$

gdzie r oznacza promień mierzony od geometrycznego środka kabla.

Powyższe równania (5) i (6) są niejednorodnymi równaniami różniczkowymi cząstkowymi, dla których rozwiązanie istnieje tylko w przypadku określenia geometrii i warunków brzegowych. W rzeczywistości złożona geometria kabli elektroenergetycznych oraz ich otoczenia uniemożliwia znalezienie rozwiązania szczególnego, ze względu na m.in. niejednorodność ziemi oraz trudność w obliczaniu dystrybucji temperatury ziemi dookoła kabla.

Równanie na prawo Joule'a w postaci:

$$\dot{q}_{\text{gen}} = I_{\text{rob}}^2 R_{\text{rob}} + I_{\text{powr}}^2 R_{\text{powr}} = I^2 R, \quad (7)$$

pozwała wyznaczyć straty ciepła, które powstają w wyniku przepływu prądu w żyłce roboczej i powrotnej kabla¹. W idealnym układzie łączenia żył powrotnych SPB (ang. Single Point Bonding) i CB (ang. Cross Bonding), tj. przy takich samych długościach odcinków faz, równanie upraszcza się do obciążenia żyły roboczej. Przy znanej temperaturze przewodu oraz obciążeniu, korzystając z powyższej relacji oraz przy założeniu, że ziemia jest jednorodna oraz ciepło jest generowane tylko w postaci strat Joule'a-Lenza, można uzyskać rozwiązanie poniższego równania (8):

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \dot{q}_{\text{gen}} = c_v \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (8)$$

w postaci:

$$\theta(t) = -\frac{\dot{q}_{\text{gen}} \cdot \rho}{4\pi} \int_t^\infty \frac{1}{u} e^{-\frac{\rho c_v r^2}{4u}} du = \frac{\dot{q}_{\text{gen}} \cdot \rho}{4\pi} \left[-\text{Ei} \left(-\frac{\rho c_v r^2}{4} \right) \right], \quad (9)$$

gdzie $-\text{Ei}(-x)$ jest funkcją całkowo-wykładniczą, daną funkcją:

$$-\text{Ei}(-x) = \int_x^\infty \frac{e^{-v}}{v} dv.$$

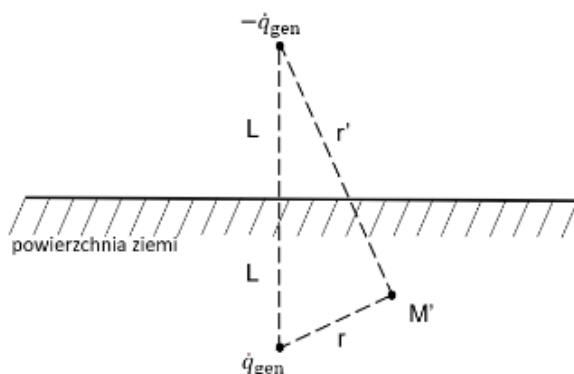
¹ Indeksy I odpowiednio: rob. i powr.

Jak wspomniano wcześniej, dla przypadku kabli ułożonych w ziemi nie można znaleźć szczególnego rozwiązania równania (6). Jest to spowodowane przeszkodami do wprowadzenia uproszczeń, o których wspomniano w poprzednim rozdziale, z których można wymienić przede wszystkim:

- a. nieskończona geometria ziemi;
- b. wpływ otoczenia na właściwości gleby;
- c. niejednorodny grunt;
- d. skończona długość kabla;
- e. brak symetrii cylindrycznej.

3.3. WPŁYW REZYSTYWNOŚCI CIEPLNEJ ZIEMI NA TEMPERATURĘ KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH

Rozwiązanie równania (8) oraz (9) istnieje pod warunkiem uproszczenia problemu do ułożenia kabli w jednorodnej ziemi o nieskończonych wymiarach albo na bardzo dużej głębokości przy obliczeniach dla krótkiego przedziału czasowego. W rzeczywistości kable układa się najczęściej na względnie niewielkiej głębokości, a pole skalarne temperatury ziemi zależy od bliskości do powierzchni. Podejście stosowane przez standard IEC 60287 [13] używa tzw. hipotezy Kennelly'ego, która polega na założeniu izotermicznej powierzchni ziemi. Dzięki temu można do obliczeń wykorzystać powszechnie znaną metodę obrazów (rys. 5). Wzrost temperatury w dowolnie mierzonym w ziemi punkcie M' w dowolnym czasie jest sumą wpływów pochodzących z kabla \dot{q}_{gen} oraz fikcyjnego obrazu kabla (jako źródła ciepła)



Rysunek 5. Przedstawienie metody obrazów z hipotezą Kennelly'ego

położonego symetrycznie względem powierzchni ziemi, emitującego ciepło $-\dot{q}_{\text{gen}}$. W przypadku wielu kabli, źródeł ciepła lub kabli wielożyłowych stosuje się zasadę superpozycji.

Ciepło rozchodzi się za pomocą mechanizmu przewodzenia ciepła, jednak, jeśli kable są ułożone dodatkowo w rurach, powinno się uwzględnić pozostałe mechanizmy jego transportu. Równanie przewodzenia ciepła \dot{q}_{gen} pochodzącego od fikcyjnego obrazu można zapisać rozwiązując równanie (9):

$$\theta(t) = \dot{q}_{\text{gen}} \frac{\rho}{4\pi} \left[-\text{Ei} \left(-\frac{\rho c_V r^2}{4t} \right) + \text{Ei} \left(-\frac{\rho c_V r'^2}{4t} \right) \right]. \quad (10)$$

Umiejscawiając punkt M' na powierzchni kabla oraz zakładając:

$$\theta(t) = \dot{q}_{\text{gen}} \frac{\rho}{4\pi} \left[-\text{Ei} \left(-\rho c_V \frac{D_e^2}{16t} \right) + \text{Ei} \left(-\rho c_V \frac{L^2}{t} \right) \right] \quad (11)$$

gdzie:

D_e - średnica zewnętrzna kabla, mm,

L - głębokość ułożenia kabla, mm.

Dla warunków stacjonarnych, $t \rightarrow \infty$ oraz $x \rightarrow 0$, wtedy:

$$\theta(\infty) = \dot{q}_{\text{gen}} \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{4L}{D_e}. \quad (12)$$

Równanie (12) zakłada, że przepływ ciepła wychodzi ze środka geometrycznego kabla, tj. linia przepływu ciepła kończy się w niewielkiej odległości dx od centrum geometrycznego kabla [62]. By uwzględnić mimośród tego przemieszczenia należy zastosować poprawkę, która w ostateczności daje wzór na tzw. *dłuższą formułę Kennelly'ego*:

$$\theta(\infty) = \dot{q}_{\text{gen}} \frac{\rho}{2\pi} \ln \left(\frac{2L}{D_e} + \sqrt{\frac{2L}{D_e} + 1} \right), \quad (13)$$

co prowadzi do równania na rezystancję cieplną medium wokół pojedynczego kabla ułożonego w ziemi:

$$T_4 = \frac{\rho}{2\pi} \ln \left(\frac{2L}{D_e} + \sqrt{\frac{2L}{D_e} + 1} \right). \quad (14)$$

3.1. WZÓR NA OBCIĄŻALNOŚĆ PRĄDOWĄ DŁUGOTRWAŁĄ KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH

Obciążalność prądowa długotrwała I_{dd} kabli elektroenergetycznych ułożonych w gruncie przedstawia się zależnością [13]:

$$I_{dd} = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d[0,5 \cdot T_1 + n_c \cdot (T_2 + T_3 + T_4)]}{R \cdot T_1 + n_c \cdot R \cdot (1 + \lambda_1) \cdot T_2 + n_c \cdot R \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_4)}}, \quad (15)$$

gdzie:

$\Delta\theta$ – dopuszczalny wzrost temperatury przewodu ponad temperaturę otoczenia, K,

W_d – straty dielektryczne w przeliczeniu na fazę, W/m,

T_1 – rezystancja cieplna pomiędzy żyłą roboczą a żyłą powrotną, (K·m)/W,

T_2 – rezystancja cieplna pomiędzy żyłą powrotną a pancerzem, (K·m)/W,

T_3 – rezystancja cieplna powłoki zewnętrznej kabla, (K·m)/W,

T_4 – rezystancja cieplna otaczającego medium, (K·m)/W,

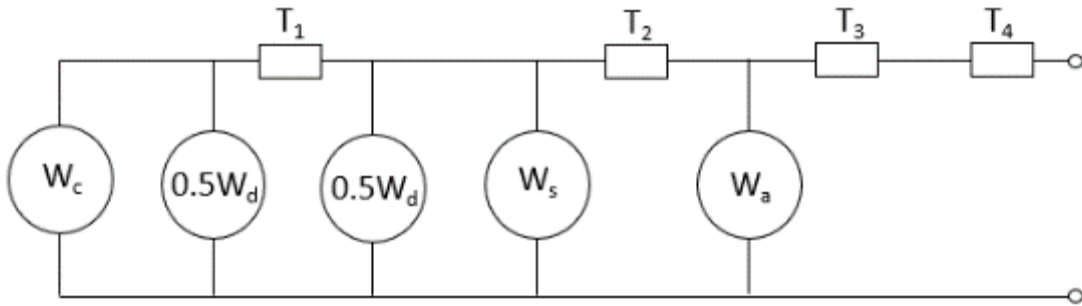
n_c – liczba żył roboczych w kablu, -,

R – rezystancja żyły roboczej przy przepływie prądu przemiennego dla temperatury dopuszczalnej długotrwałe, Ω/m ,

λ_1 – współczynnik określający straty mocy w żyły powrotnej w stosunku do strat całkowitych w żyły roboczej, -,

λ_2 – współczynnik określający straty mocy w pancerzu w stosunku do strat całkowitych w żyły roboczej, -.

Wzór (15) otrzymuje się rozwiązując układ przewodzenia ciepła przedstawiony na rysunku 6.



Rysunek 6. Schemat drabinkowy dla układu kabli elektroenergetycznych. Wyjaśnienie symboli w tekście

Poszukiwanymi wartościami w układzie są I_{da} lub $\Delta\theta$. Rozwiązuje się go dla poszukiwanej wartości obciążalności przy zadanej maksymalnej temperaturze albo dla poszukiwanej maksymalnej temperatury przy zadanym obciążeniu długotrwałym. Całkowite ciepło Joule'a-Lenza wygenerowane przez kabel jest wyrażone za pomocą równania:

$$W_t = W_c + W_s + W_a = W_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2), \quad (16)$$

gdzie W_c , W_s i W_a reprezentują odpowiednio: straty w żyłce roboczej, powłoce i pancerzu kabla. Równanie upraszcza się dzięki wprowadzonym współczynnikom proporcjonalności λ_1 oraz λ_2 .

Dzięki analogii pomiędzy układami elektrycznymi i cieplnymi, na podstawie układu z rys. 6 można wyprowadzić równanie na różnicę temperatury kabla i otoczenia $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \left(W_c + \frac{1}{2}W_d\right)T_1 + [W_c(1 + \lambda_1) + W_d]nT_2 + [W_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d]n(T_3 + T_4). \quad (17)$$

Podstawiając $W_c = I^2R$, po przekształceniach otrzymuje się wzór (15) na obciążalność prądową długotrwałą.

4. WPŁYW NIEJEDNORODNOŚCI ZIEMI NA JEJ REZYSTYWNOSĆ CIEPLNĄ

4.1. WPROWADZENIE

Do poprawnego szacunku obciążalności prądowej długotrwałej linii kablowych istotną kwestią jest poprawne przyjęcie rzeczywistych właściwości cieplnych ziemi, co sprowadza się do wyznaczenia rezystywności cieplnej materiału wokół rozpatrywanego odcinka kabla. Głównymi czynnikami wpływającymi na rezystywność cieplną ziemi jest temperatura ziemi, porowatość, transport wody oraz sam materiał, czyli typ ziemi, wilgotność oraz skład, tj. zawartość materiału o różnej frakcji i składzie mineralnym z przestrzeniami między ziarnami o różnym rozmiarze. W efekcie, rezystywność cieplną ziemi, będącą wypadkową wymienionych właściwości fizycznych badanego materiału, można określić jako wielkość fizyczną reprezentującą opór, jaki stawia dana materia przy przenoszeniu ciepła na danym odcinku.

W praktyce, w szczególności w budownictwie elektroenergetycznym, rzadko kiedy przeprowadzane są szczegółowe badania na potrzeby projektu, które dawałyby pełny pogląd o każdej z wymienionych właściwości medium wokół kabla. Najczęściej dla uproszczenia ustala się wartość rezystywności cieplnej ziemi rodzimej i wypełnienia kontrolowanego wg IEC 60287-3-1 oraz standardu technicznego Operatora Systemu Dystrybucyjnego (OSD) lub Operatora Sieci Przesyłowej (OSP) [63-67] oraz (jeżeli jest taka możliwość) wartość rezystywności cieplnej wypełnienia kontrolowanego (najczęściej betonitu) przy całkowitym jego wysuszeniu, gwarantowaną przez dostawcę materiału.

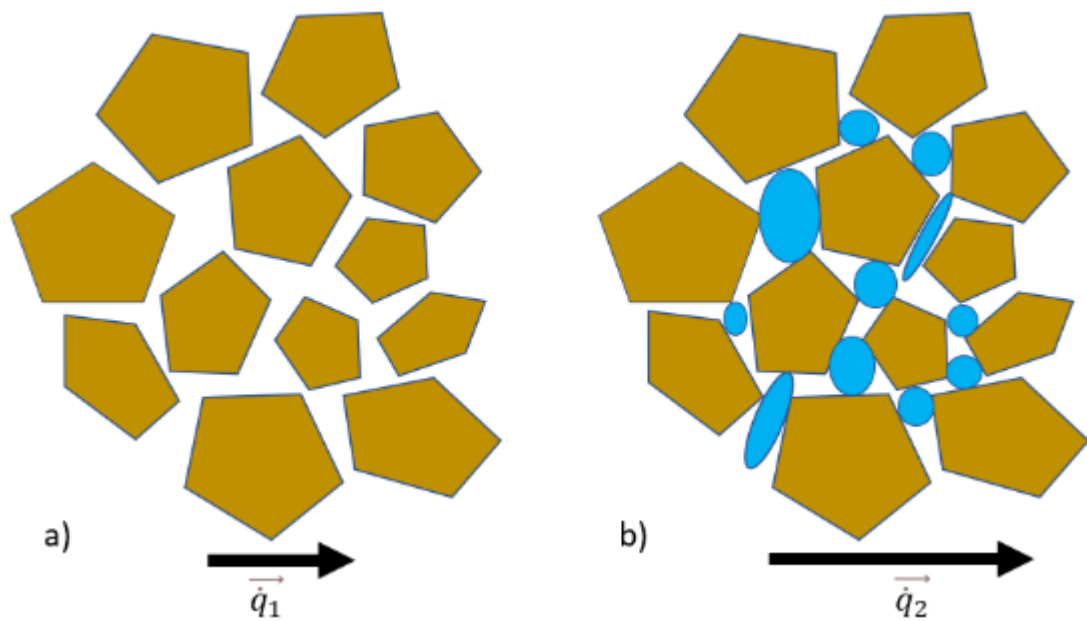
Tabela 1. Rezystywność cieplna ziemi przyjmowana do obliczeń w zależności od warunków atmosferycznych oraz dla warunków polskich [67]

Rezystywność cieplna (K·m)/W	Wilgotność ziemi	Warunki pogodowe
0,7	Bardzo mokra	Nieustające opady
1,0	Mokra	Regularne opady
2,0	Sucha	Rzadkie opady
3,0	Bardzo sucha	Sporadyczne lub żadne opady
1,0	Wartość rezystywności ziemi rodzimej przyjmowana do obliczeń dla warunków w Polsce z dod. A.16	

Informacje przedstawione w dodatku A normy IEC 60287-3-1 [67] wskazują, że wartość rezystywności cieplnej ziemi wokół w pełni obciążonej linii kablowej powinna wynosić od 0,5 do 1,2 (K·m)/W w zależności od kraju, dla którego się ją przyjmuje. Ze względu na niejednorodność ziemi, dla większości krajów standard IEC 60287-3-1 sprowadza rezystywność cieplną wszystkich gleb oraz skał do jednej wartości – 1,0 (K·m)/W dla Polski, 1,2 (K·m)/W dla Egiptu itd. Nieliczne kraje mają dodatkowo wyszczególnione wartości dla pór roku (np. Szwajcaria i Portugalia) oraz jeden kraj przedstawia różne wartości rezystywności cieplnej dla poszczególnych regionów geograficznych kraju (Meksyk). Wartość 1,0 (K·m)/W dla Polski (Tabela 1) jest wartością przekładającą się w praktyce na założenie utrzymującej się stałej wilgoci w ziemi. Najczęściej spotykanymi wartościami w polskich projektach są 1,0 i 1,2 (K·m)/W. Niższych wartości nie przewiduje się [36], ale mogą pojawiać się w niektórych sytuacjach (np. przepust pod rzeką – oprócz stałej obecności wilgoci zachodzi dodatkowy efekt przejmowania ciepła przez płynącą wodę).

4.2. PRZESUSZANIE GRUNTU

Na rezystywność cieplną ziemi znaczący wpływ mają gęstość ziemi (upakowanie) oraz zawartość wody. W ziemi, która składa się ze skały o różnej frakcji, formują się przestrzenie między ziarnami, które może wypełniać woda. Na transport ciepła w materiale sypkim ma wpływ liczba punktów styku pomiędzy ziarnami, które znacząco poprawiają przewodność ciepła. Z tego względu im większa gęstość materiału, tym więcej punktów styku oraz mniej negatywnie wpływających na transport ciepła pustych przestrzeni pomiędzy ziarnami (rys. 7a). Przy obecności wody w pustych przestrzeniach, poprawia się przewodnictwo cieplne ($\dot{q}_1 < \dot{q}_2$, rys. 7).



Rysunek 7. Model ziemi: a) pomiędzy ziarnami występują puste przestrzenie, b) w pustych przestrzeniach pomiędzy ziarnami znajduje się woda

Zjawisko przesuszania gruntu następuje w wyniku oddawania ciepła z linii kablowych do otaczającego medium, co powoduje migrację wilgoci z przestrzeni między ziarnami w kierunku obszarów o niższej temperaturze. Wraz ze zmniejszaniem gęstości materiału oraz zwiększeniem jego frakcji, co przekłada się na tworzenie większych przestrzeni między ziarnami, migracja wilgoci może następować w niższych temperaturach (ok. 30 °C) niż przy dobrze zagęszczonym materiale o drobnej frakcji (~50 °C) [13, 38, 68]. Migracja wilgoci jest zjawiskiem niepożądanym w eksploatacji linii kablowych – zwiększa ona rezystywność cieplną medium wokół kabla, przyczyniając się do ryzyka powstania miejscowego przekroczenia krytycznej temperatury wytrzymałości izolacji kabla, co z kolei może tworzyć ryzyko mikrouszkodzeń i w ostateczności prowadzić do awarii linii kablowej. Istotny jest także przebieg obciążenia linii kablowej w ciągu dnia (np. wyprowadzenie mocy z farm fotowoltaicznych), ze względu na to, że woda migruje z większą prędkością od linii kablowej, niż z tą, z którą do niej powraca [56]. W przypadku źle zaprojektowanej linii kablowej migracja wilgoci może stale zachodzić w tylko jednym kierunku i doprowadzić do trwałego wysuszenia medium wokół kabla. Środkiem zaradczym jest m.in. wymiana ziemi rodzimej wokół linii kablowej i zastosowanie wypełnienia kontrolowanego.

4.3. STRUKTURA LINII KABLOWEJ

Linia kablowa o napięciu 110 kV, powinna być ułożona na głębokości 1 - 1,2 m [36, 38, 69]. Wykop otwarty powinien być głębszy o 10 - 25 cm od planowanej głębokości ułożenia kabli, by na dnie usypać wypełnienie kontrolowane. Usypane podłoże o grubości 10 - 25 cm powinno się ubić, a kable ułożyć w pożądanej konfiguracji, płaskiej lub trójkątnej (rys. 8). Następne warstwy wypełnienia kontrolowanego powinno się usypywać wokół i nad ułożonymi kablami do odległości 10 - 25 cm od kabla najbardziej wysuniętego (rys. 9). Ubijanie otuliny powinno zachodzić ze szczególną ostrożnością, by nie uszkodzić mechanicznie powłoki kabla.



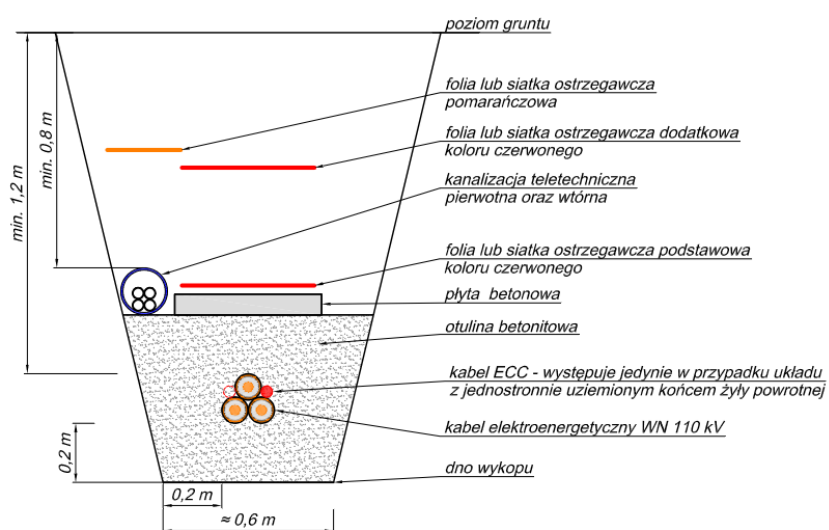
Rysunek 8. Proces układania linii kablowej w wykopie. Na otulinę, będącą mieszaniną piasku i cementu układane są kable w układzie płaskim. Kabel po lewej jest przeciągany na rolkach, które mają za zadanie spowodować uniknięcie ciągnięcia kabla po podłożu. Rysunek pochodzi z firmy Eltel

Networks Energetyka SA



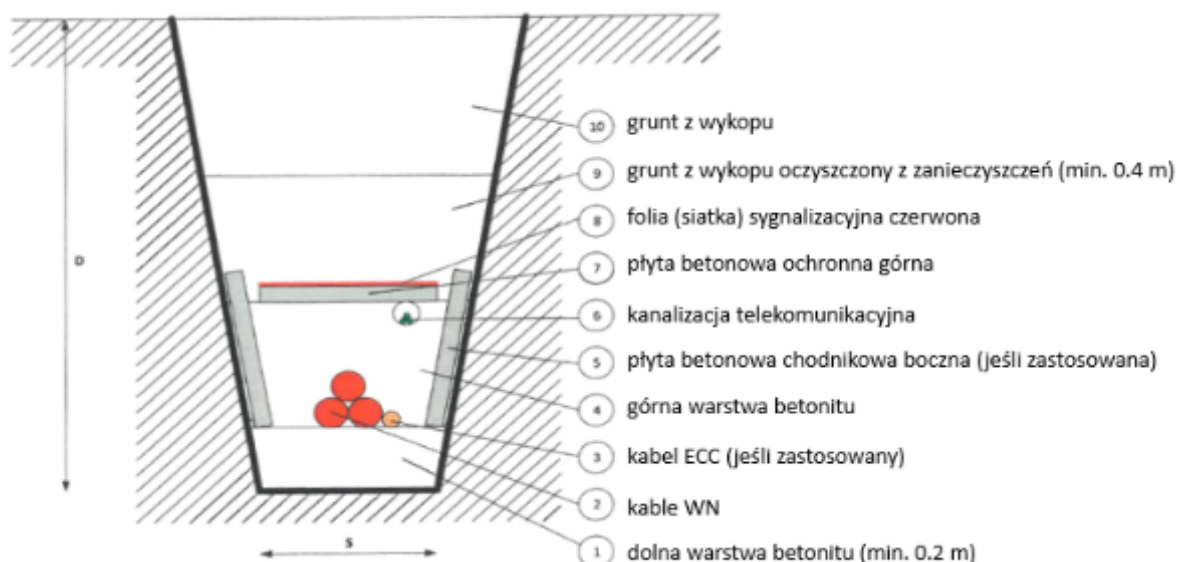
Rysunek 9. Proces układania linii kablowej. Kable zasypuje się wypełnieniem kontrolowanym, tu – mieszaniną piasku i cementu. Pomiędzy kablami z prawej strony widać ułożony kabel ECC o mniejszym przekroju (ang. *Earth Continuity Conductor*). Rysunek pochodzi z firmy Eltel Networks

Energetyka SA



Rysunek 10. Struktura ułożenia kabli WN w układzie trójkątnym, Energa [65]. Na rysunku widać pojedynczą płytę chodnikową ułożoną na betonie

Na wypełnieniu kontrolowanym powinno ułożyć się płytę chodnikową lub płytę z tworzywa sztucznego, standardowo o wymiarach 50x50x5 cm, a nad nią perforowaną taśmę ostrzegawczą o kolorze wskazującym na napięcie linii (rys. 10). Wokół wypełnienia kontrolowanego również można układać płyty chodnikowe (co pokazano na rys. 11). Celem płyt i taśmy jest zmniejszenie ryzyka uszkodzeń mechanicznych.



Rysunek 11. Struktura ułożenia kabli WN w układzie trójkątnym, PGE [64]. Na rysunku widać płyty chodnikowe boczne, w odróżnieniu do rys. 10. Różni się też miejsce ułożenia kabla ECC i przesianie ziemi rodzimej nad betonitem

4.4. WYPEŁNIENIE KONTROLOWANE

Zastosowanie wypełnienia kontrolowanego powoduje zmniejszenie zjawiska migracji wilgoci oraz zapewnia zagęszczony materiał wokół kabla o znanej (małej) frakcji, ograniczając ryzyko uszkodzenia powłoki o ostry kamień. Stosowanymi wypełnieniami kontrolowanymi są: oczyszczona ziemia rodzima, piasek lub betonit [38].

Ziemia rodzima, oczyszczona

Ziemia rodzima zawiera materiały skalne o dużej frakcji (>100 mm), jak i bardzo drobnej (<0,075 mm). Przesianie materiału jest kosztowne i czasochłonne, proces obarczony jest również ryzykiem niedokładnego oczyszczenia. Dodatkowo jest to materiał, który na całej długości trasy linii kablowej może mieć różną wartość rezystywności cieplnej, na którą trudno wpłynąć wykonawcy. W tabeli 2 zestawiono właściwości fizyczne wybranych typów ziemi.

Najczęściej występującymi typami są tłusta glina, którą reprezentują np. gleba brunatna i gleba płowa, występujące w Polsce na 52% jej powierzchni [70] oraz glina chuda, którą reprezentuje np. bielica, występująca na ok. 25% powierzchni Polski. Właściwości fizyczne tych gleb różnią się w zależności od położenia geograficznego i warunków zewnętrznych (atmosferycznych, środowiskowych itp.), powodując rozrzut pomiędzy wartościami od 0,75 do 3,0 (K·m)/W.

Tabela 2. Właściwości fizyczne wybranych typów ziemi oraz wypełnienia kontrolowanego [56]

Typ ziemi lub wypełnienia kontrolowanego	Wilgotność nasyconej gleby, %	Gęstość w stanie suchym, kg/m ³	Porowatość, %	Rezystywność cieplna, (K·m)/W	
				Ziemia mokra	Ziemia sucha
Drobny żwir	3-5	2150	25-50	0,5	2,5
Mieszanka 0-8 mm	7-15	2050	25-50	0,5	2,0
Piasek 0-2 mm	12-18	1900	20-35	0,5	1,7
Piasek plażowy	12-18	1700	20-35	0,55	3,5
Muł	15-25	1750	35-50	0,7	2,5
Glina (chuda)	20-30	1700	30-50	0,75	2,5
Glina (tłusta)	30-40	1600	35-60	0,9	3,0

Przesiana ziemia rodzima może być stosowana jako wypełnienie kontrolowane, jednak nie jest chętnie wykorzystywana w ten sposób, ze względu na dużą rezystywność cieplną powstającą w wyniku m.in. trudności z zagęszczeniem jej wokół linii kablowej.

Piasek

Piasek jest materiałem często stosowanym przy budowie linii kablowych nn i SN. Jest relatywnie tani, łatwy w transporcie i aplikacji, a jego sypkość daje uproszczony dostęp do linii w razie konieczności oględzin.

Na jego niekorzyść wpływa niska gęstość w stanie suchym (1750 – 1900 kg/m³) i niski współczynnik upakowania, przekładający się na duże przestrzenie między ziarnami. Stosowanie piasku daje lepsze warunki dla obciążalności linii kablowej niż stosowanie ziemi rodzimej, biorąc pod uwagę niższą rezystywność cieplną w stanie suchym (zmniejszenie rezystywności cieplnej z 3,0 do 2,0 (K·m)/W), jednak stosowalnością wypiera go betonit.

Betonit

Betonit to mieszanka piaskowo-cementowa. Najczęściej stosowaną proporcją jest 14:1 wagowo piasku do cementu. Piasek użyty do wytworzenia powinien być możliwie najmniejszej dostępnej frakcji. Najlepsze rezultaty osiąga się używając piasku rzecznoego, klasa cementu zaś jest w praktyce dowolna. Mieszanina z dodatkiem wody powinna być po ułożeniu ubita do gęstości nie mniejszej niż 1600 kg/m^3 . Ilość dodanej wody jest istotna – dodanie za małej ilości spowoduje, że cement nie zwiąże się z piaskiem i nie wytworzą się połączenia mające na celu utrzymać wilgoć i poprawić przewodnictwo cieplne. Jeżeli zostanie dodane za dużo wody, cement wypłucze się, powodując jeszcze większe szczeliny między ziarnami niż przy zastosowaniu samego piasku jako wypełnienia kontrolowanego.

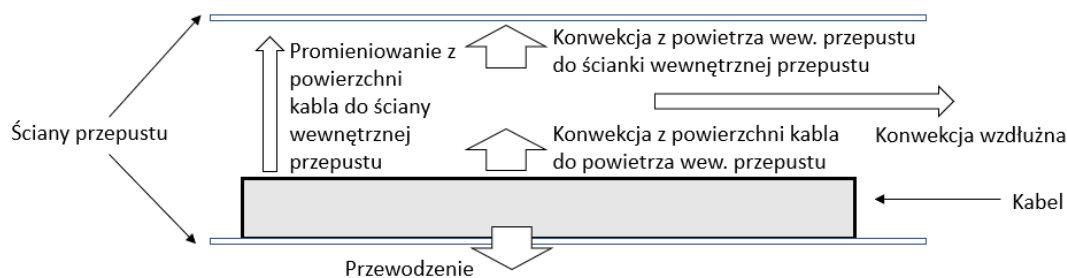
Betonit jest materiałem, który, w przeciwieństwie do innych mieszanin, zachowuje znaną rezystywność cieplną. Przyjmuje się, że poprawnie zagęszczony betonit powinien mieć rezystywność między $0,6 \text{ (K}\cdot\text{m)/W}$ w warunkach bardzo mokrych, a $1,0 \text{ (K}\cdot\text{m)/W}$ w warunkach wysuszenia (norma [36] wymusza stosowanie betonitu o rezystywności nie większej niż $1,5 \text{ (K}\cdot\text{m)/W}$).

5. OBLICZANIE REZYSTANCJI CIEPLNEJ T_4

5.1. REZYSTANCJA CIEPLNA WOKÓŁ KABLA UŁOŻONEGO W PRZEPUŚCIE RUROWYM

Rozmieszczenie kabli w przepuście wypełnionym powietrzem pokazano na rys. 12. Wymiana ciepła w przepuście rurowym zachodzi zgodnie z następującymi procesami:

- 1) konwekcją od powierzchni kabla do powietrza wewnątrz przepustu,
- 2) konwekcją od powietrza wewnątrz przepustu do ścianki przepustu,
- 3) konwekcją wzdłużną spowodowaną wymuszonym lub naturalnym przepływem powietrza wzdłuż przewodu,
- 4) promieniowaniem z powierzchni kabla do ścianki przepustu,
- 5) przewodzeniem przez ścianę przepustu.



Rysunek 12. Poglądowy schemat wymiany ciepła w przepuście kablowym

Rezystancja cieplna kabla ułożonego w rurze składa się z trzech elementów:

- a) rezystancji cieplnej powietrza znajdującego się w rurze przepustowej, T_4' , (K·m)/W,
- b) rezystancji cieplnej rury przepustowej, T_4'' , (K·m)/W,
- c) rezystancji cieplnej medium wokół rury przepustowej, T_4''' , (K·m)/W.

Rezystancja T_4 we wzorze na I_{dd} (15) jest sumą wpływów a-c, tj.:

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4''' . \quad (18)$$

Pierwszy ze składników zawarty we wzorze (18), tzn. rezystancję cieplną T_4' wypełnienia przepustu (pola pomiędzy powierzchnią kabla a ścianą wewnętrzną przepustu) można obliczyć w następujący sposób:

$$T_4' = \frac{U}{1 + 0,1 \cdot (V + Y \cdot \theta_m) \cdot D_e}, \quad (19)$$

gdzie:

D_e – średnica zewnętrzna kabla, mm,

θ_m – średnia temperatura medium wypełniającego przestrzeń pomiędzy powierzchnią kabla a ścianką wewnętrzną przepustu, °C,

U, V, Y – stałe zależne od warunków instalacji, -.

Wartości U, V i Y dla wybranych przepustów przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości stałych U, V i Y użytych w wyrażeniu (19), na podstawie [71]

Warunki ułożenia kabla	U	V	Y
W metalowej rurze	5,2	1,4	0,011
[...]	[...]	[...]	[...]
W plastikowych przepustach rurowych	1,87	0,312	0,003
W przepustach ceramicznych	1,87	0,28	0,003
W przepustach rurowych wypełnionych wodą	0,1	0,03	0,001

Rezystancję cieplną T_4'' rury przepustowej ze wzoru (18), można obliczyć ze wzoru:

$$T_4'' = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \frac{D_o}{D_d}, \quad (20)$$

gdzie:

D_o – średnica zewnętrzna rury przepustowej, mm,

D_d – średnica wewnętrzna rury przepustowej, mm,

ρ_T – rezystywność cieplna materiału rury przepustowej, (K·m)/W.

Dla metalowych rur zakłada się $T_4'' = 0$.

Ostatnie wyrażenie we wzorze na T_4 (18), tj. T_4''' , jako jedyne zależne jest od geometrii wypełnienia kontrolowanego i rezystywności cieplnej medium wokół kabla. Jeżeli kabel ułożony jest w wypełnieniu kontrolowanym o rezystywności cieplnej różnej od rezystywności cieplnej ziemi rodzimej, to wpływ tego wypełnienia należy obliczyć stosując skorygowaną

rezystancję T_4^{corr} w stosunku do rezystancji ciepłej T_4 (14) podaną przez Nehera i McGratha [12]:

$$T_4^{corr} = \frac{N}{2\pi} \cdot (\rho_e - \rho_c) \cdot \ln \left(\frac{L_G}{r_b} + \sqrt{\left(\frac{L_G}{r_b}\right)^2 - 1} \right) \approx \frac{N}{2\pi} \cdot (\rho_e - \rho_c) \cdot G_b \quad (21)$$

Wyrażenie:

$$G_b = \ln \left(\frac{L_G}{r_b} + \sqrt{\left(\frac{L_G}{r_b}\right)^2 - 1} \right) \approx \ln \left(\frac{2L_G}{r_b} \right) \quad (22)$$

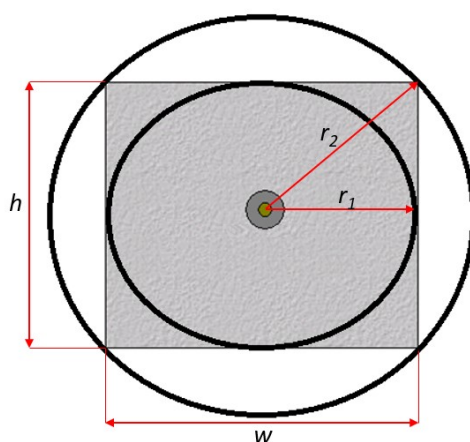
nazywane jest współczynnikiem geometrycznym, gdzie:

N – liczba kabli pod obciążeniem ułożonych w wypełnieniu kontrolowanym, - ,

L_G – głębokość ułożenia geometrycznego środka wypełnienia kontrolowanego, mm,

r_b – promień zastępczy wypełnienia kontrolowanego, mm.

Promień zastępczy r_b otrzymuje się dzięki założeniu, że ciepło przebywa najkrótszą drogę w kierunku powierzchni ziemi. Dla takiego podejścia, wkładu wypełnienia kontrolowanego w zmianę rezystywności cieplnej na odcinku w kierunku ziemi należy poszukiwać radialnie. Wobec tego prostokątną geometrię układu należy przedstawić jako koło o izotermicznej powierzchni o promieniu r_b , który ma taką samą zdolność rozpraszania ciepła. Prostokątne wymiary wypełnienia kontrolowanego h i w ($x=\min(h,w)$; $y=\max(h,w)$) zastępuje się



Rysunek 13. Graficzna reprezentacja przekształceń omawianych w tekście

izotermicznym pierścieniem, którego duży obwód o promieniu r_2 opisany jest na wierzchołkach tego wypełnienia, a mały obwód o promieniu r_1 wpisany jest wewnątrz (rys. 13):

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{x}{2}, \\ r_2 &= 0.5\sqrt{x^2 + y^2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Promień r_b znajduje się pomiędzy r_1 i r_2 w stosunku do proporcji pola powierzchni pierścienia zajętego przez prostokątne wypełnienie kontrolowane do powierzchni niezajętej:

$$\ln \frac{r_b}{r_1} = \frac{xy - \pi r_1^2}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (24)$$

lub

$$\ln \frac{r_2}{r_b} = \frac{\pi r_2^2 - xy}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right), \quad (25)$$

skąd

$$r_b = \exp \left[\frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2} \right]. \quad (26)$$

Wyrażenie jest słuszne dla wartości $y/x < 3$. Dla innych wartości za pomoc może posłużyć tabela wartości opracowana przez El-Kady'ego i Horrocks'a [16], przedstawiona w załączniku 1.

Rezystancja cieplna wypełnienia kontrolowanego równa jest zatem sumie (14) oraz (21):

$$T_4^* = T_4 + T_4^{corr} = \frac{\rho_c}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{2L}{D_e} + \sqrt{\left(\frac{2L}{D_e} \right)^2 - 1} \right) + \frac{N}{2\pi} \cdot (\rho_e - \rho_c) \cdot \ln \left(\frac{2L_G}{r_b} \right). \quad (27)$$

Dla głębokości ułożenia kabla L , znacznie większej wartością od D_e można zapisać wzór w następującej postaci:

$$T_4^* = \frac{\rho_c}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{4L}{D_e} \right) + \frac{N}{2\pi} \cdot (\rho_e - \rho_c) \cdot \ln \left(\frac{2L_G}{r_b} \right). \quad (28)$$

5.2. WPŁYW ŚREDNICY KABLOWYCH PRZEPUSTÓW RUROWYCH NA OBCIĄŻALNOŚĆ PRĄDOWĄ DŁUGOTRWAŁĄ KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Rezystancja cieplna T_4'' zależy głównie od właściwości przewodzenia ciepła materiału, z którego została wytworzona rura przepustowa oraz stosunku średnicy zewnętrznej do wewnętrznej rury. W praktyce przy wyborze rury posługuje się wyznacznikiem SDR (ang. *Standard Dimension Ratio*), który odpowiada za stosunek średnicy zewnętrznej rury do grubości jej ścianki. W przypadku układania kabli w technologii bezwykopowej najczęściej używa się rur o stosunku 11:1 (SDR11). Średnica wewnętrzna rury powinna także być co najmniej 1,5 razy większa od średnicy zewnętrznej kabla [36], np. dla kabla 110 kV z aluminiową żyłą roboczą 1400 mm² o średnicy zewnętrznej równej 99,1 mm, powinna zostać dobrana rura o średnicy 200 mm SDR11 (średnica wewnętrzna 163,6/99,1 \geq 1,5).

Poniżej zaprezentowano wpływ średnicy przepustów rurowych na obciążalność prądową oraz zmiana wpływu poszczególnych mechanizmów transportu ciepła na oddawanie ciepła z linii kablowej ułożonej w rurach [72].

Do niniejszego studium przypadku zasymulowano zmianę średnicy zewnętrznej rury, w której ułożona jest linia kablowa z rys. 14 i wartościami z tab. 4.



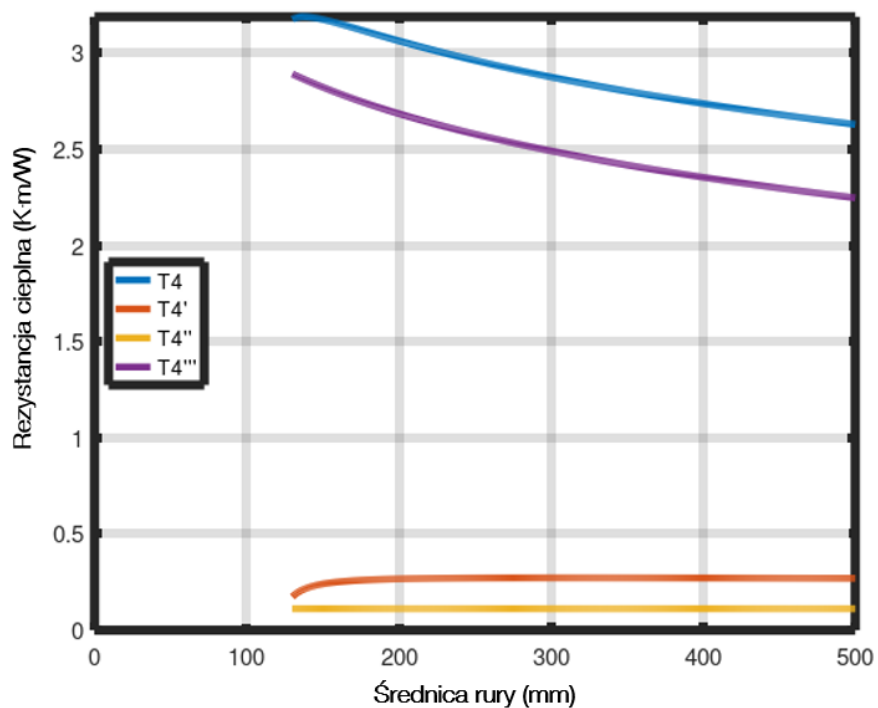
Rysunek 14. Układ analizowanego systemu kabli elektroenergetycznych; kable w przepustach rurowych: ułożenie trójkątne, rezystywność cieplna gruntu rodzimego 1,0 (K·m)/W, temperatura otoczenia (gruntu rodzimego) 10 °C

Tabela 4. Parametry kabla elektroenergetycznego oraz pozostałe parametry ułożenia linii kablowej

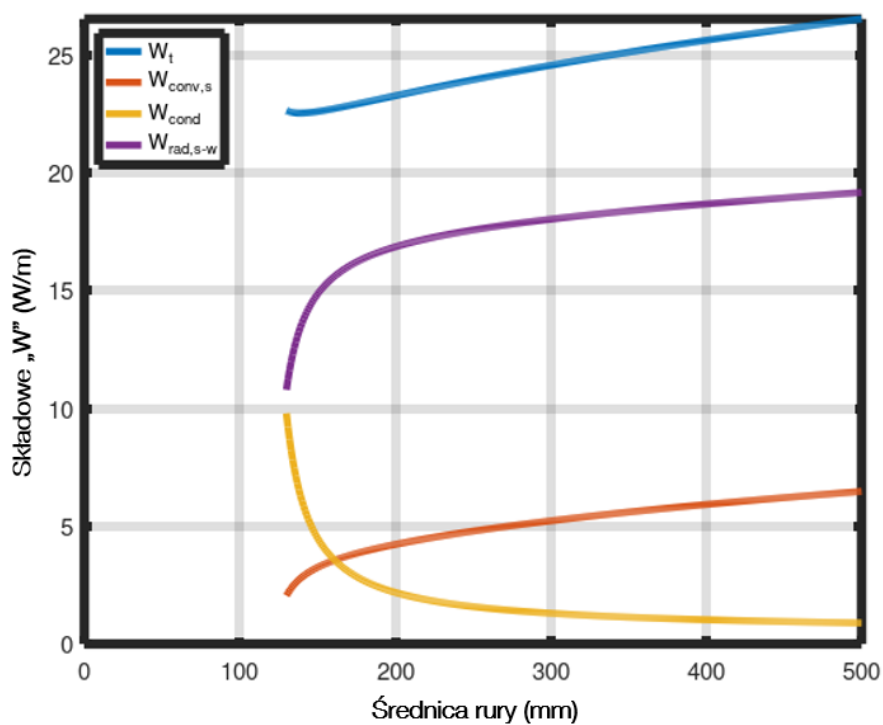
Kabel	110 kV, jednożyłowy, aluminiowa żyła robocza o przekroju 1400 mm ²
Zewnętrzna średnica kabla	99,1 mm
Głębokość przecisku	22 m
Typ łączenia żył powrotnych	cross-bonding
Temperatura ziemi rodzimej	10 °C
Rezystywność cieplna ziemi rodzimej	1,0 (Km)/W
Wypełnienie rur przepustowych	powietrze

Bazując na rys. 12, całkowite straty ciepłe powstające w linii kablowej są rozpraszane za pomocą trzech mechanizmów wymiany ciepła: konwekcji, przewodzenia i radiacji, które zostały przedstawione równaniami (1)–(3). Wyniki przeprowadzonej analizy dla przykładowej linii kablowej z tab. 4 zostały przedstawione na rysunkach 15–17 oraz wykazały następujące zależności:

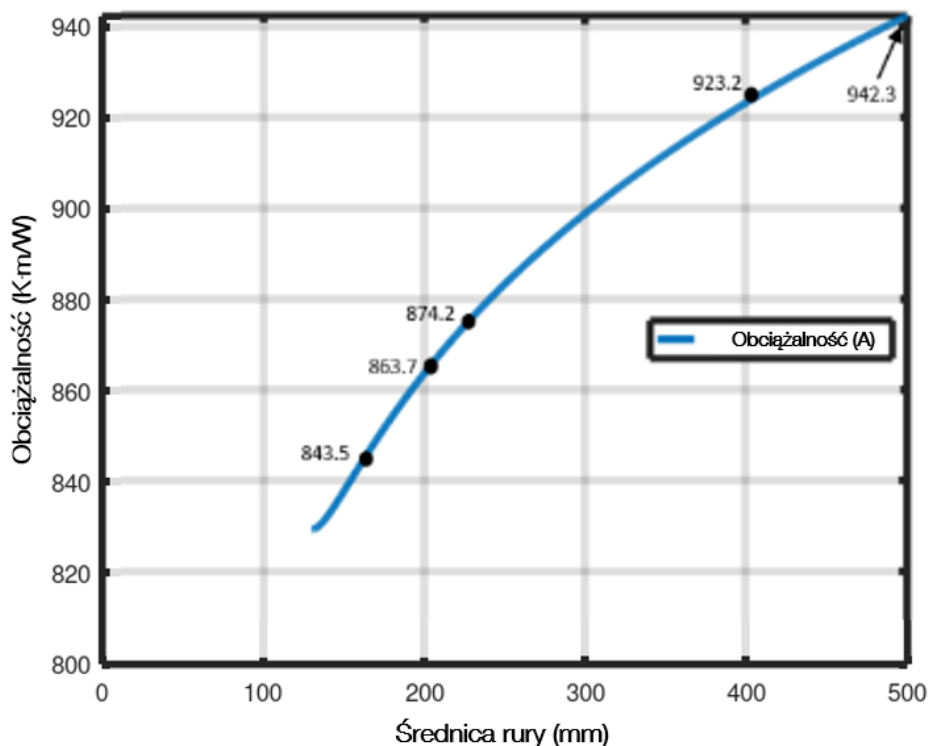
1. Rezystancja cieplna T_4' medium (powietrza) wewnątrz przepustu jest stała (rys. 15) niezależnie od średnicy rury przepustowej. Wynika to ze wzoru na T_4' (19);
2. Rezystancja cieplna T_4'' przez ścianę rury (rys. 15) jest stała ze względu na stałą wartość stosunku średnicy zewnętrznej do wewnętrznej rury;
3. Zewnętrzna rezystancja cieplna T_4''' (rys. 15) maleje wraz ze wzrostem średnicy rury;
4. Udział odprowadzania ciepła przez konwekcję $W_{conv,s}$ wzrasta wraz ze wzrostem średnicy rury (rys. 16), ze względu na zwiększony przepływ powietrza w rurze/kanale;
5. W przypadku przepustów rurowych o stosunkowo małej średnicy istotną rolę w odprowadzaniu ciepła z linii kablowych odgrywa przewodzenie (W_{cond} na rys. 16);
6. W przypadku większych średnic rur (160 mm lub więcej), ciepło rozpraszane jest głównie przez promieniowanie ciepłe ($W_{rad,s}$ na rys. 16) dając około 70% udział ($W_{rad,s} / W_t$) w całkowitym rozpraszaniu ciepła.



Rysunek 15. Rezystancja cieplna w przepływie rurowym w funkcji średnicy zewnętrznej rury



Rysunek 16. Składowe transportu ciepła $W_{conv,s}$, W_{cond} , $W_{rad,s-w}$ - w oraz całkowite straty mocy W_t generowane w przepływie rurowym na jednostkę długości w funkcji średnicy zewnętrznej rury



Rysunek 17. Obciążalność linii kablowej z tab. [6] w funkcji średnicy zewnętrznej rury

Jak wynika z rysunku 17, im większa średnica rur, tym większa obciążalność kabli elektroenergetycznych ułożonych wewnątrz.

Obciążalność przykładowego kabla 1400 mm², \varnothing 99,1 mm, ułożonego wewnątrz standardowo dobranej rury o średnicy zew. 200 mm wynosi 863,7 A. Zwiększenie średnicy rury przepustowej do 400 mm powoduje zwiększenie obciążalności linii kablowej do 923,2 A, tj. wzrost o 7%.

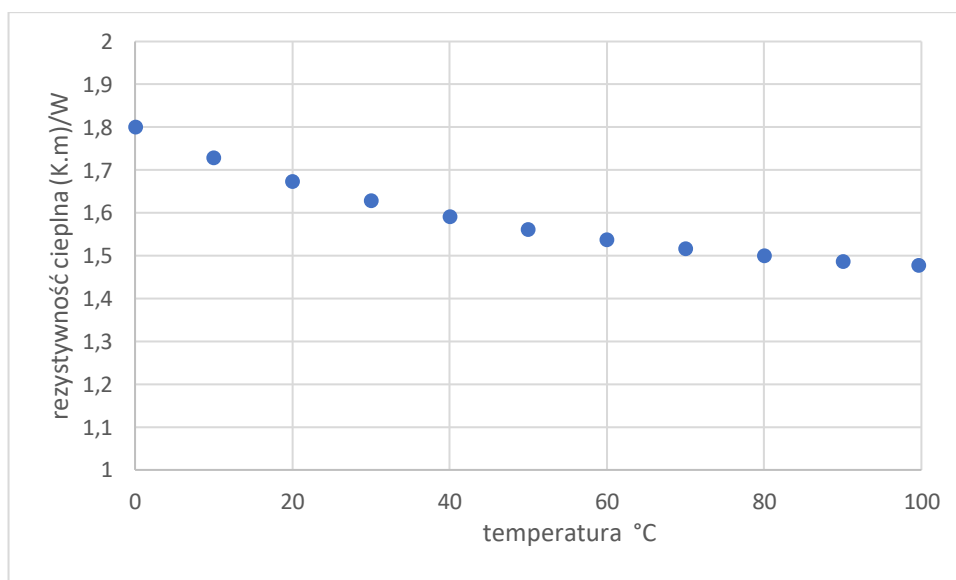
Wyniki z rysunków 15-17 uzyskano na podstawie wzorów podanych w [71] i porównano z dedykowanym oprogramowaniem do obliczeń obciążalności CYMCAP, bazującym na współczynnikach U , V i Y . Różnica w wynikach nie przekracza 1 A. W tabeli 5 zaprezentowano wyniki obciążalności kabli ułożonych w rurach o różnych przekrojach i różnych wypełnieniach. Można zaobserwować, że taką samą obciążalność jak linia kablowa w rurze o średnicy 160 mm wypełnionej bentonitem², ma linia kablowa ułożona w rurze niewypełnionej (wypełnionej powietrzem) o średnicy 225 mm.

² Bentonit – mieszanina skały ilastej i wody o właściwościach tiksotropowych, stosowana do wypełniania przepustów rurowych przy układaniu w nich kabli elektroenergetycznych.

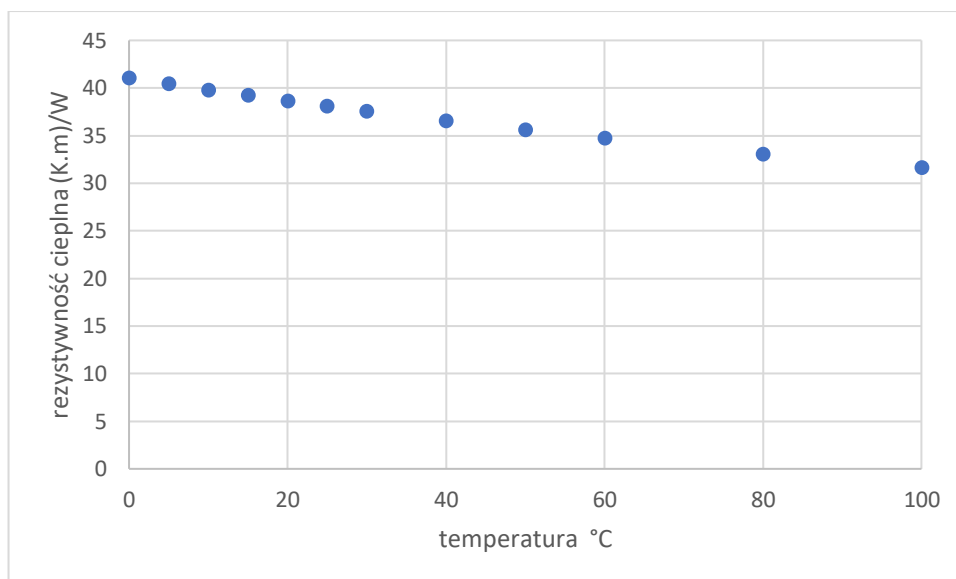
Tabela 5. Wyniki obliczeń obciążalności linii kablowej ułożonej w przepustach rurowych o średnicy 160 - 500 mm wypełnionych powietrzem, wodą lub bentonitem

Średnica zewnętrzna rury przepustowej	Rura wypełniona powietrzem	Rura wypełniona wodą	Rura wypełniona bentonitem 0,6 (K·m)/W
160 mm	843 A	871 A	874 A
200 mm	863 A	895 A	895 A
225 mm	874 A	907 A	905 A
400 mm	923 A	961 A	949 A
500 mm	942 A	982 A	966 A

Rezystywność cieplna wody i powietrza do obliczeń w tab. 5 zostały zaczerpnięte z [73], (rys. 18 i 19).



Rysunek 18. Rezystywność cieplna wody (przy ciśnieniu atmosferycznym) w funkcji temperatury, [73]

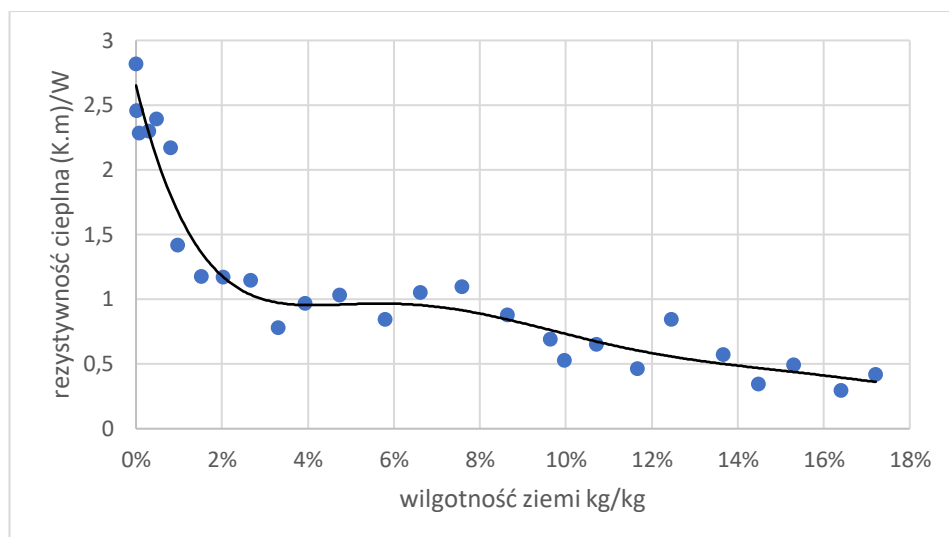


Rysunek 19. Rezystywność cieplna powietrza (przy ciśnieniu atmosferycznym) w funkcji temperatury, [73]

5.3. REZYSTYWNOŚĆ CIEPLNA PIASKU I ŚCIOŁKI LEŚNEJ W FUNKCJI WILGOTNOŚCI

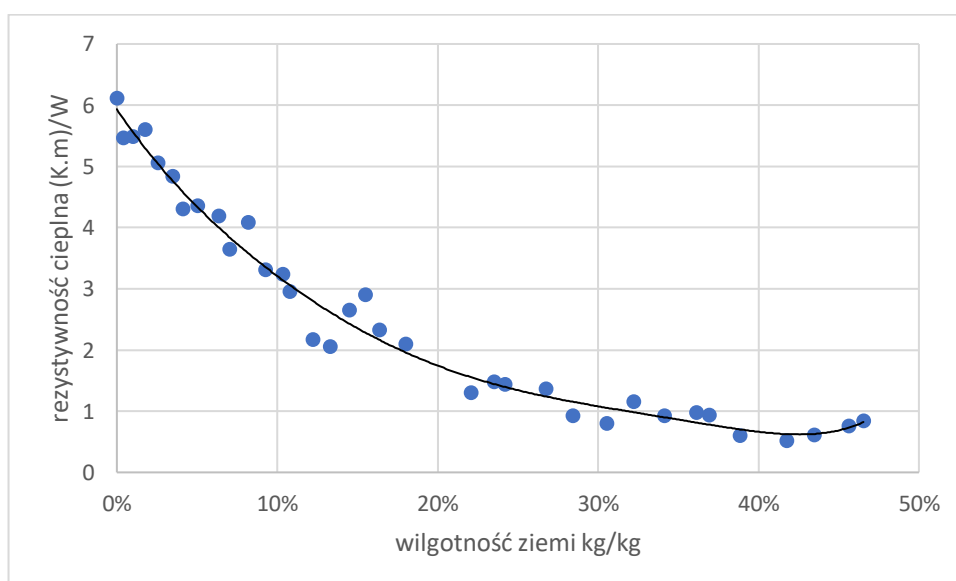
Na potrzeby ustalenia lokalnych warunków rezystywności cieplnej ziemi, przeprowadzono własne badania próbki piasku o frakcji 0-2 mm ze żwirowni w Żabim Rogu (gm. Morąg) (rys. 20) oraz gleby leśnej z niedaleko położonego lasu (rys. 21).

Za punkt wyjściowy pomiarów obrano stosunek masowy wody do ziemi, w którym mieszanina ziemi i wody jest stanem stałym. Dla piasku o frakcji 0-2 mm i ziemi leśnej wynosiło to odpowiednio 17,2% i 46,5% stosunku masowego wody do ziemi. Jak można zaobserwować na rys. 20, w zakresie wilgotności 4% - 17,2%, rezystywność cieplna piasku nie przekracza 1,0 (K·m)/W, co jest typową wartością dla ziemi w Polsce (wg. [67]). Poniżej tego przedziału ziemia jest wyraźnie „sucha” (wilgotność 1% - 4%), aż do stanu, który może się kojarzyć z kurzem (wyraźnie unoszące się drobiny o najmniejszej frakcji przy przesypywaniu próbki z pojemnika do pojemnika, wilgotność 0% - 1%). W przedziale wilgotności 1% - 4%, ziemia ma rezystywność w zakresie 1,0 - 1,5 (K·m)/W. Tak niską wilgotność można zaobserwować w bezpośrednim otoczeniu linii kablowej, wynikającą z migracji wilgoci dla dużego obciążenia linii. W ostatnim przedziale wilgotności, 0% - 1%, wartość rezystywności wynosi $>2,2$ (K·m)/W i do obliczeń projektowych jest przyjmowana wyjątkowo – np. wg normy IEC 60297-3-1 [67], w Niemczech zaleca się przyjmować wartość 2,5 (K·m)/W dla ziemi wysuszonej blisko kabli.



Rysunek 20. Rezystywność cieplna piasku o frakcji 0-2 mm w funkcji wilgotności masowej (wyniki pomiarów własnych)

Ziemia leśna jest typową ziemią torfową, gliniastą („chudą”), z dużym udziałem materiałów organicznych. W odróżnieniu do próbki piasku 0-2 mm, ziemia leśna ma wysoką chłonność wody. Subiektywna ocena zmiany stanu z „suchego” do „wilgotnego” zachodzi przy wilgotności 8% masowej dla ziemi leśnej. Ta sama zmiana stanu dla piasku zachodzi przy 4% wilgotności masowej. Przebieg rezystywności cieplnej ziemi leśnej w funkcji temperatury jest również łagodniejszy niż dla piasku – jest niemal liniowy, który można podzielić na dwa

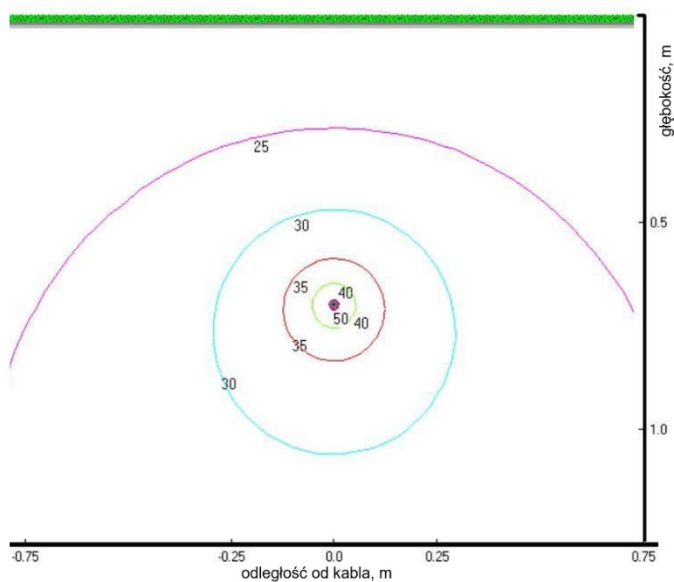


Rysunek 21. Rezystywność cieplna gleby leśnej w funkcji wilgotności masowej (wyniki pomiarów własnych)

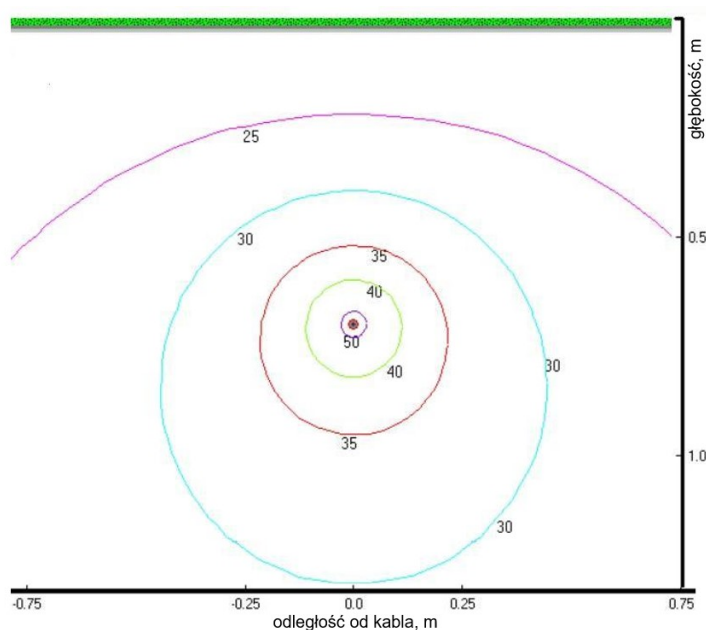
przedziały: w zakresie wilgotności 0% - 20% oraz 20% - 45% (rys. 21). Rezystywność cieplna w przedziale wilgotności 45% - 20% łagodnie rośnie od 0,5 do 1,75 (K·m)/W. W przedziale wilgotności 20% - 0% rezystywność cieplna wyraźnie rośnie od 1,75 (K·m)/W do 6 (K·m)/W wraz z malejącą wilgotnością próbki.

Dla zobrazowania wpływu przebadanej rezystywności cieplnej gruntu rodzimego na obciążalność linii kablowej, zaproponowano prosty układ pojedynczego kabla YKY 1x240 mm² ułożonego na głębokości 0,7 m w standardowych warunkach. Rozpatrzono trzy przypadki rezystywności cieplnej ziemi rodzimej: 0,5, 1,0 i 2,5 (K·m)/W (rys. 22 a-c).

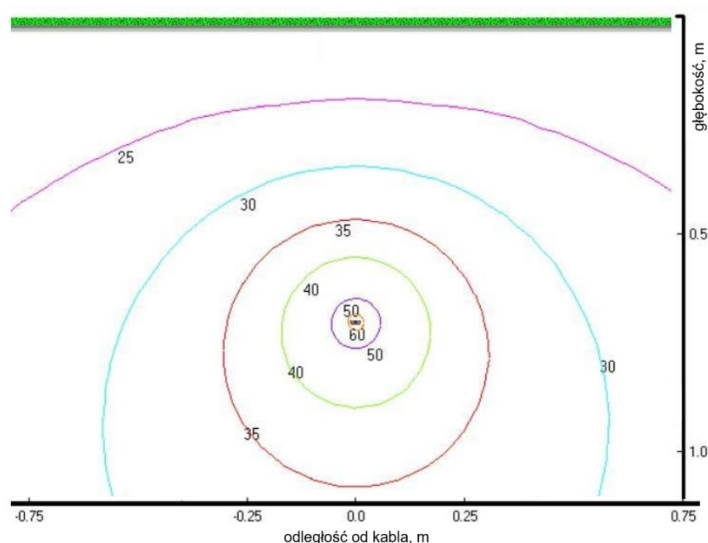
a)



b)



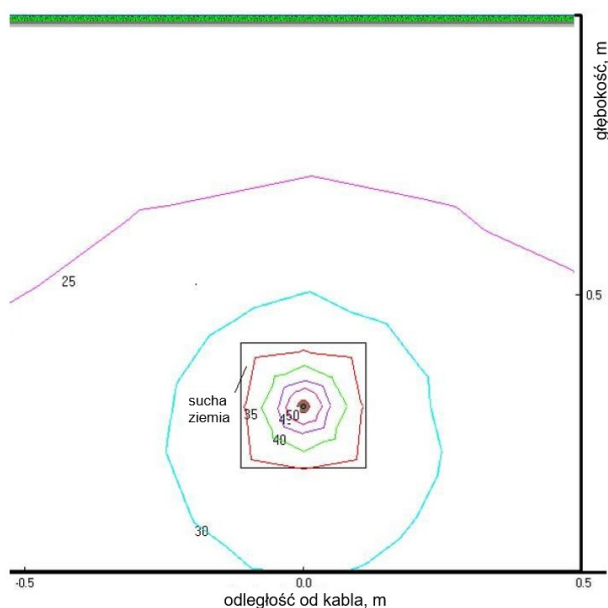
c)



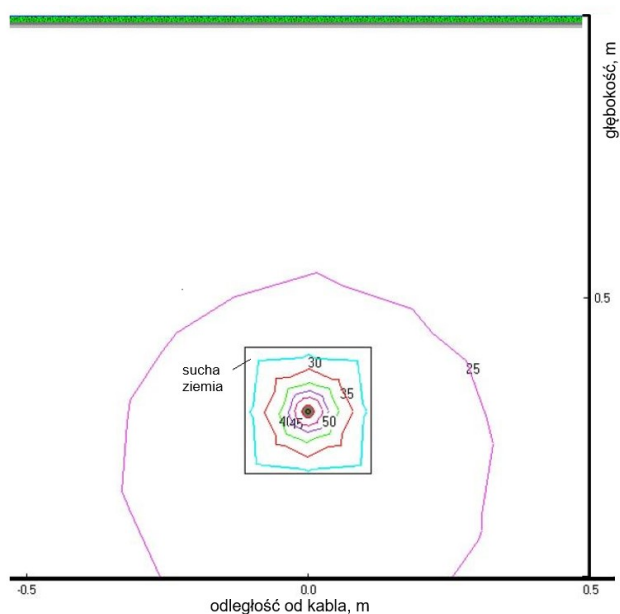
Rysunek 22. Rozkład temperatury wokół kabla YKY 1x240 mm² (głębokość ułożenia 0,7 m, temperatura ziemi 20 °C, temperatura maksymalna kabla 70 °C) dla rezystywności ziemi a) $\rho_e = 2,5$ (K·m)/W, $I_{dd} = 507$ A, b) $\rho_e = 1,0$ (K·m)/W, $I_{dd} = 732$ A, c) $\rho_e = 0,5$ (K·m)/W, $I_{dd} = 916$ A

Dla tego samego układu przeanalizowano wpływ migracji wilgoci na obciążalność prądową długotrwałą linii kablowej (rys. 23 a-b). Jako strefę o zwiększonej rezystywności cieplnej, wynikającej z migracji wilgoci, ustalono przekrój kwadratowy wokół kabla o długości boku 10 cm. Rezystywność ziemi rodzimej dla rozpatrywanych przypadków wynosi: 1,0 (K·m)/W dla przypadku z rys. 23a oraz 0,5 (K·m)/W dla przypadku z rys. 23b. Rezystywność ziemi w strefie migracji wilgoci (tuż przy kablu) została ustalona na poziomie 2,5 (K·m)/W.

a)



b)



Rysunek 23. Rozkład temperatury wokół kabla YKY 1x240 mm² (głębokość ułożenia 0,7 m, temperatura gleby 20 °C, temperatura maksymalna kabla 70 °C), biorąc pod uwagę wysuszenie ziemi wokół linii kablowej (rezystywność cieplna strefy 2,5 (K·m)/W). Wyniki dla rezystywności ziemi rodzimej a) $\rho_e = 1,0$ (K·m)/W, $I_{dd} = 614$ A, b) $\rho_e = 0,5$ (K·m)/W, $I_{dd} = 660$ A

Wyniki obciążalności zaprezentowano w tabeli 6.

Tabela 6. Wyniki obciążalności prądowej długotrwałej układu z rysunków 22 i 23

Rezystywność cieplna ziemi rodzimej (K·m)/W	Obciążalność prądowa długotrwała A
2,5	507
1,0	732 614*
0,5	916 660*

* założono wysuszenie gruntu spowodowane obciążeniem kabla – rezystywność cieplna suchego gruntu w strefie 10x10 cm wokół kabla wynosi 2,5 (K·m)/W

Z badań wynika, że im niższa rezystywność cieplna gruntu, tym intensywniejsze oddawanie ciepła na odcinku kabel – powierzchnia ziemi, a w konsekwencji wyższa obciążalność prądowa.

Dla poprawnego wyznaczenia obciążalności prądowej długotrwałej należy wziąć pod uwagę dwa czynniki: właściwości fizyczne ziemi rodzimej i/lub wypełnienia kontrolowanego w różnych warunkach temperatury i wilgotności oraz migrację wody (wysychanie gruntu) w wyniku nagrzewania się kabla wraz ze wzrostem jego obciążenia. Jak przedstawiono w tab. 6 i na rys. 23, jeżeli w wyniku wzrostu temperatury gruntu (na skutek odprowadzania ciepła z kabla) uwzględni się w obliczeniach migrację wody, obciążalność prądowa długotrwała kabla znacznie maleje.

5.4. WNIOSKI

Z zebranego w toku badań materiału i dokonanych analiz wynika, że modyfikacja warunków ułożenia linii kablowej i różne warunki środowiskowe wpływają na współczynniki T_4' , T_4'' i T_4''' , co bezpośrednio wpływa na obciążalność linii kablowej. Przedstawiono niestandardową metodę zwiększenia obciążalności prądowej w przepustach rurowych, poprzez zwiększenie średnicy rury wraz z wyliczeniem udziału różnych mechanizmów transportu ciepła w wymianie. W ostatniej części rozdziału pokazano wyniki obliczeń obciążalności prądowej długotrwałej dla kabla ułożonego bezpośrednio w ziemi, ze wskazaniem, jak na obciążalność wpływa migracja wilgoci. W rozdziale 6 szerzej omówiony zostanie wpływ betonitu, czyli specjalnego wypełnienia kontrolowanego, na obciążalność prądową długotrwałą.

6. POMIARY REZYSTYWNOŚCI CIEPLNEJ BETONITU W FUNKCJI TEMPERATURY I WILGOTNOŚCI

6.1. WPROWADZENIE

Literatura [74, 75] podaje orientacyjną minimalną wilgotność gruntów niespoistych wynoszącą 3%, a spoistych 5%, jednak są to wartości bardzo niskie, niemal niespotykane w praktyce, występujące tylko w wyjątkowo niekorzystnych warunkach (ekspozycja na słońce, zbocza z odpływem wód opadowych, niski poziom wód gruntowych). W przypadku wysokiego poziomu wód gruntowych na obszarze planowanej linii kablowej wymienione wartości są najniższe, jakie powinno się zakładać. Ze względu na brak wytycznych w tym aspekcie (np. norm międzynarodowych), jako wilgotność krytyczną (najniższą) wybiera się subiektywną wartość między 1% a 5%, która jest wskazywana jako najczęściej przyjmowana przez respondentów CIGRE [69].

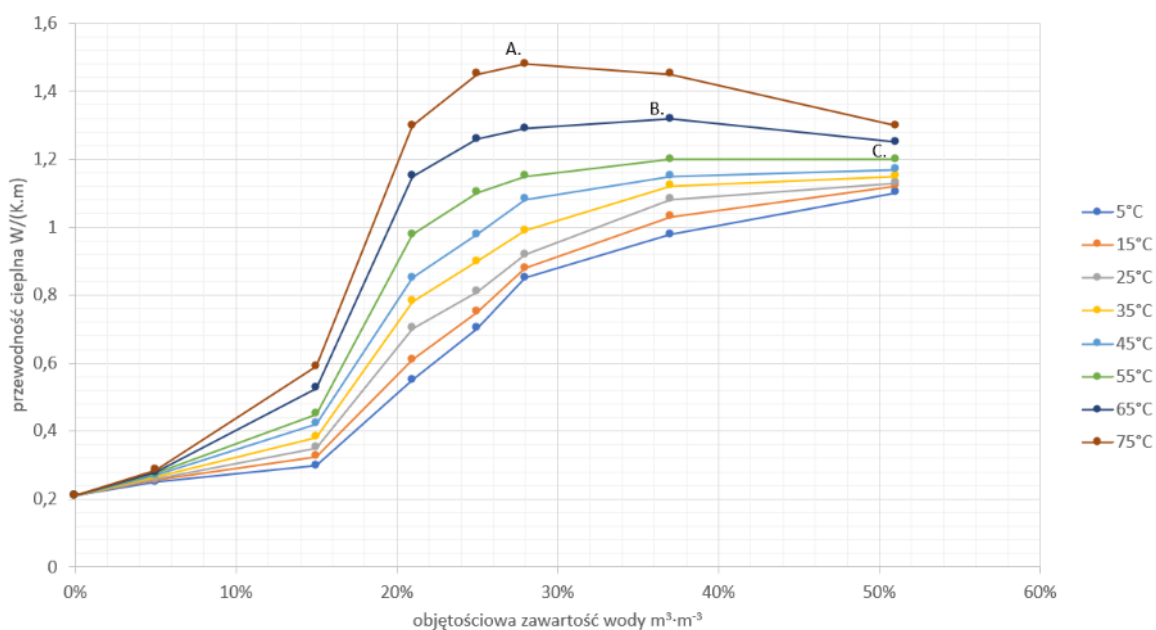
Jeszcze większy problem wynika z trudności ustalenia wartości krytycznej wilgotności dla betonitu – materiału wykorzystywanego specjalnie do utrzymywania wilgoci. W warunkach podwyższonej temperatury pracy linii kablowej niezwykle trudno jest zbadać, jaka jest wilgotność krytyczna. Istnieje wiele prac (przede wszystkim istotna jest praca O. Goudy [76]) o temperaturowym punkcie formacji strefy migracji wilgoci i prędkości jej formowania, jednak brakuje badań na temat wilgotności wypełnienia kontrolowanego w długim okresie, przy ekspozycji na bezpośrednie źródło ciepła, jakim jest linia kablowa.

6.2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Praca [77] opisuje wyniki doświadczenia polegającego na zbadaniu przebiegu przewodności cieplnej w funkcji temperatury i wilgotności dla dwóch typów ziemi wulkanicznej na terenie Japonii. Zbadane przez autorów próbki ziemi „Red Yellow” przy zerowej zawartości wilgoci, w zakresie temperatur 5 - 75 °C mają zbliżoną do siebie przewodność³ cieplną $\approx 0,2 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ (odtworzenie wyników na rys. 24). Dla wilgotności 5% przewodność cieplna próbek znajduje się w zakresie 0,25 - 0,30 $\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$, gdzie najniższą wartość przewodności cieplnej osiąga próbka o najwyższej temperaturze (75 °C). W przedziale

³ Dla przejrzystości ukazania zjawiska, konieczne jest pokazanie zmian przewodności cieplnej, zamiast, jak dotychczas, rezystywności cieplnej. Przewodność cieplna k związana jest z rezystywnością cieplną zależnością $k=1/\rho_e$.

wilgotności 10% - 40% przebiegi przewodności cieplnej dla różnych temperatur znacznie oddalają się od siebie wartościami. Przy wilgotności 28% próbka o temperaturze 5 °C ma przewodność cieplną 0,85 W/(K·m), a próbka o temp. 75 °C aż 1,5 W/(K·m). Zwiększenie wilgotności ziemi do stanu przejścia ze stanu stałego do ciekłego (z wilgotnej ziemi do mieszaniny wody i ziemi, przy ok. 52% wilgotności masowej), powoduje zmianę medium przewodzenia ciepła - z ziemi na wodę, a wyniki przewodności cieplnej próbek w różnych temperaturach zawierają się w zakresie (1,1 - 1,3) W/(K·m), by dalej dążyć do przewodności cieplnej wody (Rys. 18).



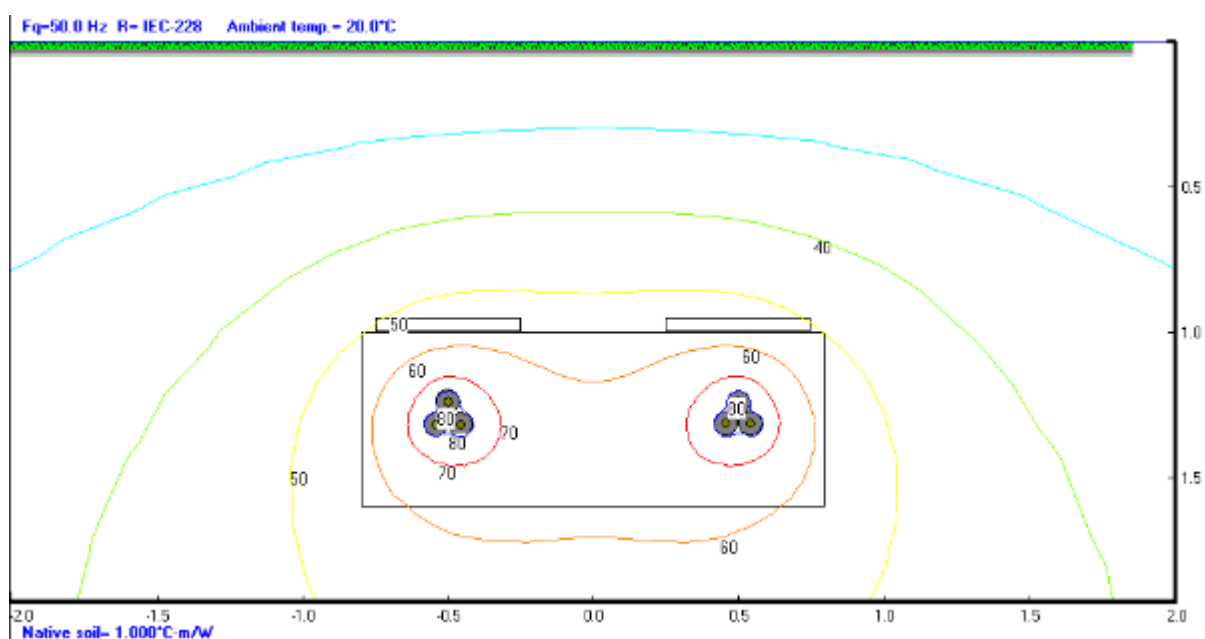
Rysunek 24. Przewodność cieplna ziemi „Red Yellow” w funkcji wilgotności dla różnych temperatur próbki (5 - 75 °C). Punkty A., B. i C. wskazują ekstrema funkcji, opis w tekście. Odtworzenie wyników badania z [77]

Z powyższych wyników można wysnuć kilka interesujących wniosków:

- Temperatura ziemi przy zerowej wilgotności nie ma wpływu na przewodność/rezystywność cieplną;
- Zwiększenie temperatury ziemi przy minimalnej, stałej zawartości wody zmniejsza jej rezystywność cieplną;

- Wilgotność jest nadrzędna dla temperatury – zmiana rezystywności cieplnej nie zajdzie bez obecności wody;
- Dla różnych temperatur będzie istniało różne maksimum przebiegu funkcji rezystywności cieplnej od wilgotności – im wyższa temperatura, tym rezystywność cieplna będzie niższa dla mniejszej zawartości wody.

Ostatni z wymienionych wyżej czynników jest najistotniejszy, ponieważ wynika z niego wprost, że wspomniany wcześniej punkt wilgotności krytycznej przesuwa się w kierunku ziemi suchej wraz ze wzrostem temperatury. Zaprezentowano to na rysunku 24. Punkty A., B. i C. wskazują ekstrema przebiegu funkcji dla różnych temperatur. Maksimum przewodności cieplnej wraz ze wzrostem temperatury przesuwa się w kierunku mniejszej wilgotności (punkt A. względem punktów B. i C.).



Rysunek 25. Pole temperatury wokół obciążonej dwutorowej linii kablowej XRUHKXS
1x1000/170 110 kV

Gdyby przenieść wspomnianą zależność przebadanej przez autorów [77] ziemi na betonit, oznaczałoby to, że jego wartości rezystywności cieplnej przyjmowane przez projektantów przy standardowej temperaturze 20 °C (0,6 - 1,0 (K·m)/W) byłyby wystarczająco przezorne, biorąc pod uwagę polepszenie właściwości przewodzenia ciepła przy minimalnej zawartości wilgoci wraz ze wzrostem temperatury (do 70 °C dla izolacji PE, do 90 °C XLPE). O użyteczności takich wyników może świadczyć symulacja numeryczna pola temperatury

wokół linii kablowej ukazana na rys. 25. Z rysunku tego wynika, że bezpośrednio otoczenie obciążonej linii kablowej (betonit) osiąga temperaturę ponad 60 - 80 °C. Uzasadnione jest więc zakładanie takiej temperatury tuż przy kablu i ocena wpływu tej temperatury na rezystywność cieplną betonitu.

6.3. PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

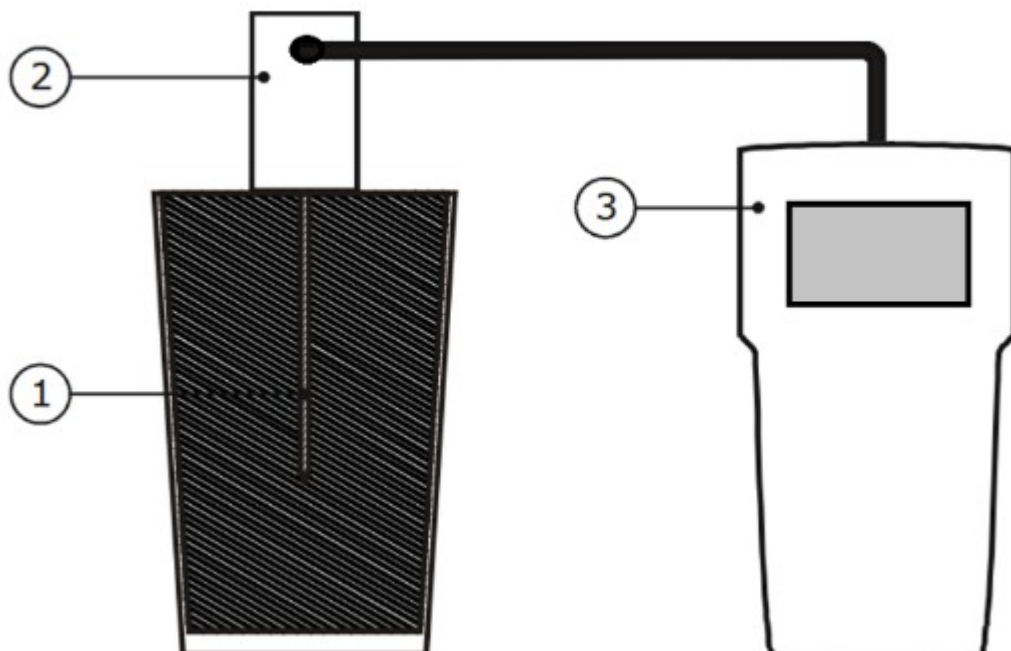
W celu ustalenia przebiegu rezystywności cieplnej betonitu w funkcji temperatury dla wybranych wartości wilgotności, przeprowadzono eksperyment. Stanowisko eksperymentalne składało się z cieplarki, miernika rezystywności cieplnej z sondą i próbki betonitu. Ustawienie stanowiska zaprezentowano na rysunkach 26-28.



Rysunek 26. Stanowisko badawcze. Miernik rezystywności cieplnej Hukseflux CRU02 połączony z sondą TP07. Wewnątrz cieplarki znajduje się próbka betonitu



Rysunek 27. Stanowisko badawcze. Do ciepłarki od prawej strony przez izolowaną termicznie śluzę wchodzi przewód sondy



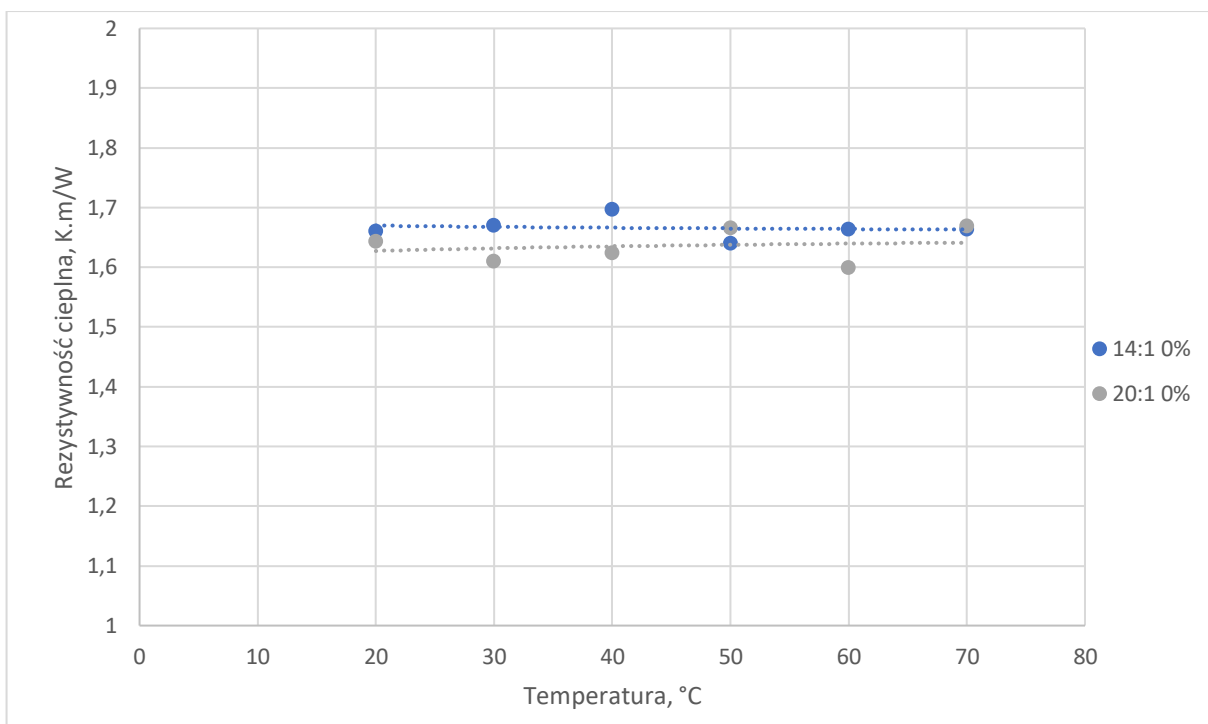
Rysunek 28. Uproszczony schemat metody pomiaru próbki. Na rysunku wyszczególniono elementy: 1 – igła termiczna, 2 – miernik, 3 – wyświetlacz. Na podstawie [78]

Przebieg eksperymentu był następujący. Próbką znajdującą się w formie (plastikowej zlewce), zakrytej foliowym wieczkiem, którego celem było zatrzymanie wody wewnątrz próbki, w przeddzień pomiarów była uzupełniana wodą w celu zachowania stałej wilgotności. Następnie zwiększano temperaturę wewnątrz cieplarki do pożądanej i na noc zostawiano w niej próbkę w obecności otwartego pojemnika z wodą, który miał dodatkowo zapobiec osuszaniu się próbki przez wyrównanie wilgotności powietrza wewnątrz urządzenia. Konieczność przygotowania się do pomiarów dnia poprzedniego była spowodowana tym, że zwiększenie temperatury o dowolną wartość i ustabilizowanie jej w całej próbce zajmowało około 5 godz. Dnia następnego próbka była ważona i uzupełniana brakującą ilością wody, po czym przeprowadzano serię pomiarów dla zadanej temperatury. By zwiększyć dokładność, seria zawierała kilkanaście pomiarów, każdy w odstępstwie min. 30 min, by zachować stabilność temperaturową próbki.

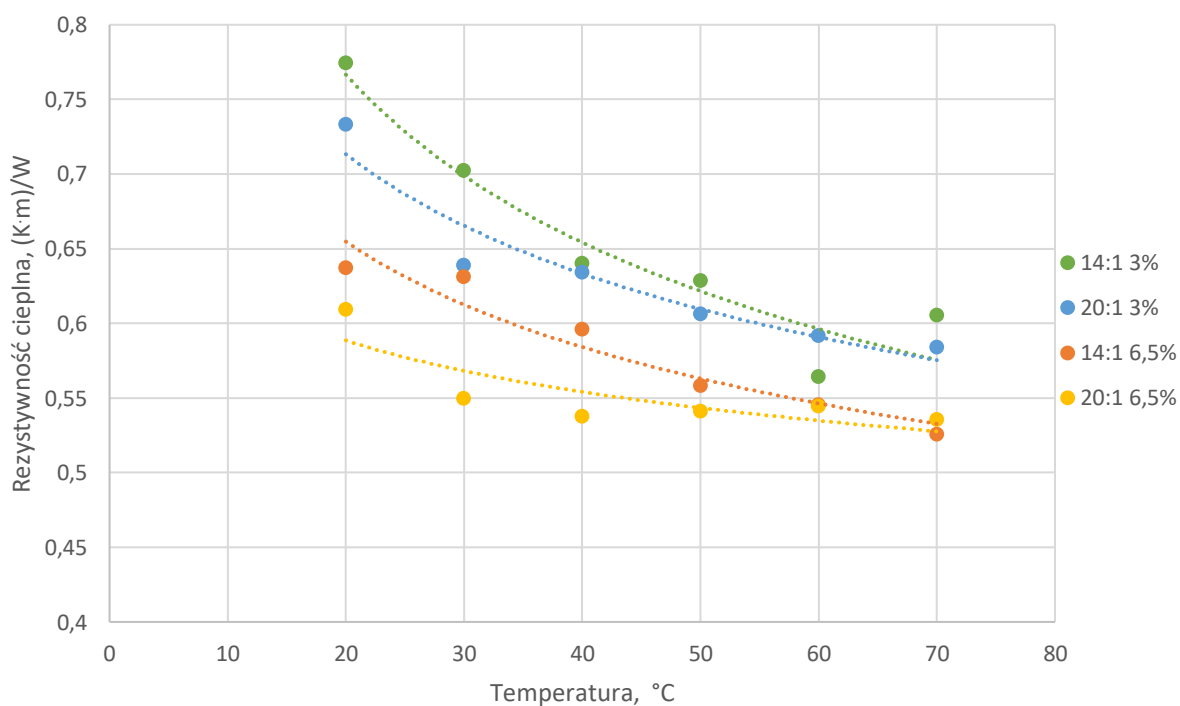
Najistotniejszym elementem układu pomiarowego (rys. 28) jest igła termiczna oznaczona na rysunku jako ①. Zawiera ona w sobie grzałki oraz czujniki temperatury ułożone wzdłużnie. Znając moc cieplną przesłaną do próbki (miernik, ②), mierzony jest rozptyw ciepła, obliczana jest rezystywność cieplna, a wyniki wyświetlane są na wyświetlaczu, ③.

W taki sposób zbadano dwie próbki betonitu o stosunku piasku do cementu 14:1 i 20:1, o zadanej wilgotności masowej 6,5%, 3% i 0% (wilgotności atmosferycznej) w temperaturze 20 - 70 °C (70 °C – max. temperatura wytrzymałości przewodu sondy).

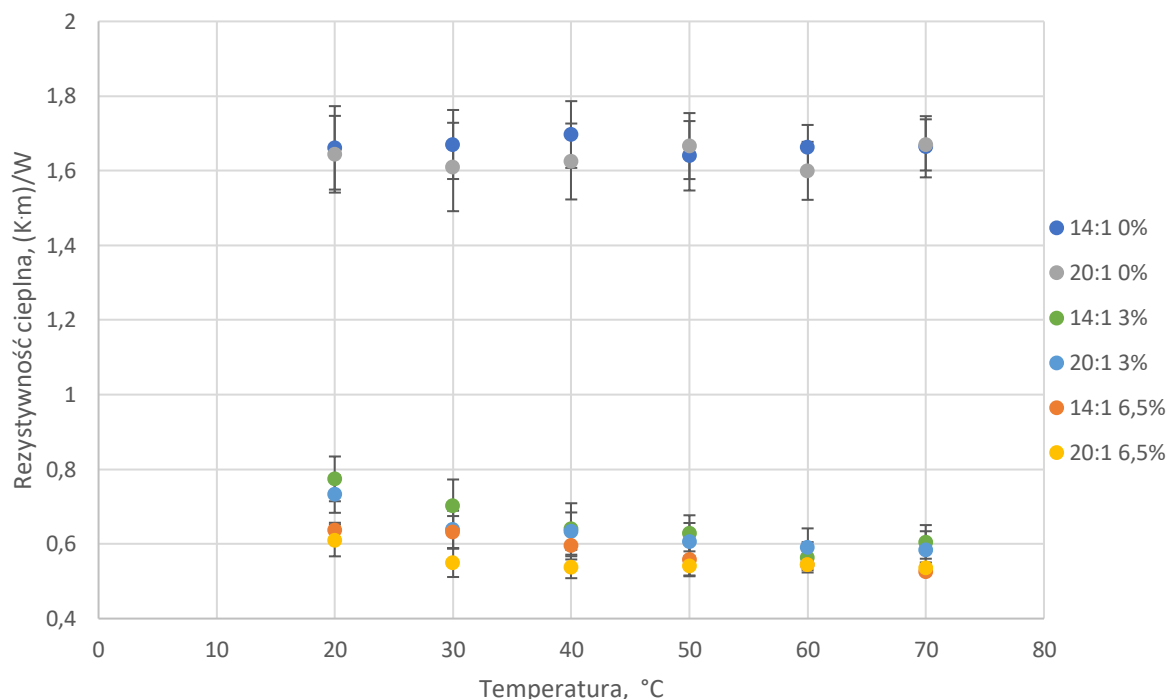
Wyniki zaprezentowano na rysunkach 29-31.



Rysunek 29. Wyniki pomiarów rezystywności cieplnej próbek o stosunku piasku do cementu 14:1 i 20:1, o wilgotności 0% (atmosferycznej) w temperaturach 20 - 70 °C



Rysunek 30. Wyniki pomiarów rezystywności cieplnej próbek o stosunku piasku do cementu 14:1 i 20:1, o wilgotności 3% i 6,5% w temperaturach 20 - 70 °C



Rysunek 31. Zbiorcze wyniki pomiarów rezystywności cieplnej próbek o stosunku piasku do cementu 14:1 i 20:1, o wilgotności 6,5%, 3% i 0% (atmosferycznej) w temperaturach 20 - 70 °C z naniesionymi słupkami niepewności pomiarowej

Wyniki zaprezentowane na rys. 29 wskazują, że przy zerowej wilgotności przebieg rezystywności w funkcji temperatury jest stały i wynosi 1,625 (K·m)/W dla próbki 1:20 i 1,675 (K·m)/W dla próbki 14:1. Wynika z tego, że przy absencji wody nieznacznie lepszą przewodność cieplną ma betonit z mniejszym udziałem cementu. Pomiedzy próbkami istnieje mała różnica w rezystywności cieplnej wynosząca średnio 0,05 (K·m)/W, a w maksymalnych wychyleniach 0,075 (K·m)/W. Przedstawiona rozbieżność wyników następujących po sobie (ρ_{T20} , ρ_{T30} , ρ_{T40} ...) wynika z metody pomiarowej (miernika igłowego, słupki błędów pokazane na rys. 31), a stałość przebiegu funkcji przedstawiona jest na rys. 29.

Przy zwiększeniu wilgotności, przewodnictwo cieplne w betonicie 20:1 znacznie się poprawia (rys. 30). Już 3% wilgotności masowej w próbce o temp. 20 °C zmniejsza rezystywność cieplną o 55% (z 1,65 (K·m)/W do 0,75 (K·m)/W). Większa zawartość masowa wody na poziomie 6,5%, zgodnie z hipotezą, daje jeszcze lepsze wyniki, obniżając rezystywność cieplną o 17% (z 0,75 (K·m)/W do 0,625 (K·m)/W). Jak wynika z przeprowadzonych badań, przy obecności wody większą rezystywnością cieplną wykazuje się betonit o zawartości piasku do

cementu 14:1 niż 20:1. Zwiększenie temperatury próbki z 20 °C do 70 °C przy zachowaniu stałej wilgotności skutkuje zmniejszeniem rezystywności cieplnej o co najmniej 0,1 (K·m)/W.

6.4. WNIOSKI

Zaprezentowane w niniejszym rozdziale wyniki potwierdzają przypuszczenie, że betonit zachowuje się podobnie do ziemi tj. wzrost temperatury przy minimalnej zawartości wody poprawia przewodnictwo cieplne. Drugą istotną uzyskaną informacją jest to, że temperatura nie wpływa negatywnie na rezystywność cieplną przy całkowitym wysuszeniu betonitu. Oznacza to, że wpływ źródła ciepła (linii kablowej) na bezpośrednie otoczenie, co najmniej nie zmienia jego właściwości przewodzenia ciepła lub je nieznacznie poprawia (przy utrzymaniu wilgotności powyżej krytycznego poziomu).

7. OPTIMALIZACJA WYPEŁNIENIA KONTROLOWANEGO W LINIACH KABLOWYCH

7.1. WPROWADZENIE

W poprzednich rozdziałach przytaczano, że obciążalność prądowa kabli zasilających zależy m.in. od pola przekroju żyły roboczej. W tabeli 7 przedstawiono podstawowe parametry kabli XRUHKXS 110 kV [79]. Wynika z nich, że przejście z jednego rzędu wielkości przekroju żyły roboczej na drugi wymaga, w zależności od wymiarów analizowanych kabli, zwiększenia pola przekroju żyły roboczej od 35 do 500 mm² (np. z kabla 150RM na 185RM różnica 35 mm² oraz z kabla 2000RMS na 2500RMS różnica 500 mm²). Oznacza to zwiększenie pola przekroju żyły roboczej o (12 - 33)%.

Tabela 7. Parametry techniczne kabli XRUHKXS 110 kV, na podstawie [2]

Przekrój żyły roboczej	Średnica żyły roboczej	Izolacja		Żyła powrotna		Średnica zewnętrzna kabla
		Grubość znamionowa	Średnica na izolacji	Przekrój	Średnica na żyłce powrotnej	
mm ²		mm		mm ²	mm	
150RM	14,4 ^{+0,2}	18	53,4	95	59,2	67
185RM	15,8 ^{+0,4}	17	52,2	95	58,0	66
240RM	18,5 ^{+0,3}	16,5	53,5	95	59,3	67
300RM	20,5 ^{+0,2}	15,5	53,5	95	59,3	67
400RM	23,6 ^{+0,3}	14,5	54,6	95	60,4	69
500RM	26,4 ^{+0,4}	14,0	56,4	95	62,2	71
630RM	30,3 ^{+0,4}	14,0	60,9	95	66,7	75
800RM	34,7 ^{+0,4}	14,0	65,3	95	71,1	80
1000RM	38,3 ^{+0,4}	14,0	68,9	95	74,7	84
1200RMS	41,6 ^{+0,8}	14,0	73,8	95	79,6	89
1400RMS	45,8 ^{+0,8}	14,0	78,0	95	83,8	94
1600RMS	49,6 ^{+1,2}	14,0	81,8	95	87,6	98
1800RMS	53,2 ^{+1,0}	14,0	85,4	95	91,2	102
2000RMS	54,6 ^{+1,0}	14,0	86,8	95	92,6	103
2500RMS	60,0 ^{+1,0}	14,5	94,2	95	100,4	112
3000RMS	68,4 ^{+1,0}	14,5	102,6	95	108,8	121

Objaśnienie:

RM – Round Multiwire (Conductor) okrągła, wielodrutowa żyła robocza
RMS – Round Multiwire Segmented (Conductor) okrągła, wielodrutowa, segmentowa żyła robocza

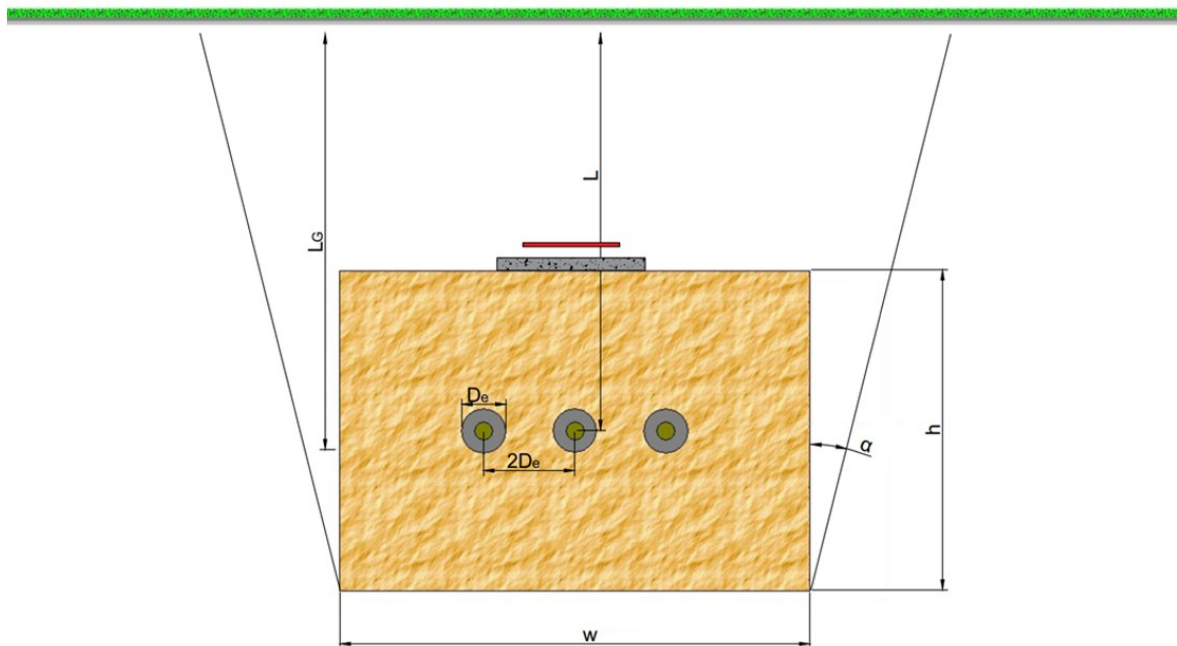
Przez wzgląd na powyższe, zazwyczaj pole przekroju żyły roboczej kabla dobiera się tak, aby było ono możliwie jak najmniejsze. Aby zapewnić obciążalność prądową długotrwałą

określoną w projekcie, projektanci dokonują ewaluacji wymaganej obciążalności prądowej długotrwałej kabla dla zadanych warunków ułożenia i dobierają kabel o minimalnym polu przekroju żył spełniającym zadany warunek obciążalności prądowej. W pewnych przypadkach może okazać się, że kabel w kilku miejscach rozpatrywanego odcinka nie spełnia wymagań co do obciążalności prądowej długotrwałej, ze względu na zwiększoną głębokość ułożenia, bliskość innych źródeł ciepła lub lokalne zwiększenie rezystywności cieplnej ziemi rodzimej. Aby zachować niezmienną powierzchnię przekroju poprzecznego żyły roboczej kabla, możliwe jest zwiększenie jego obciążalności prądowej przez stworzenie korzystniejszych, w stosunku do naturalnych, warunków do oddawania ciepła wokół zakopanych kabli. W praktyce stosuje się wypełnienie kontrolowane o odpowiedniej geometrii i odpowiednio niskiej rezystywności cieplnej.

W niniejszym rozdziale przedstawiono propozycję zwiększenia zastosowania wypełnienia kontrolowanego w praktyce [16] i zaproponowano metodę automatyzującą oraz przyspieszającą obliczenia obciążalności prądowej kabli elektroenergetycznych z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych. Wykaże się, że przy znanych kosztach związanych z budową linii kablowej (tj. koszcie kabla, wykopania rowu kablowego, ułożenia kabla, wypełnienia kontrolowanego, zagęszczenia betonitu itp.) możliwe jest opracowanie modelu wspomagającego planowanie inwestycji polegającego na określeniu punktu przejścia na kabel o innym przekroju poprzecznym żyły roboczej przy uwzględnieniu wpływu geometrii wypełnienia kontrolowanego.

7.2. GEOMETRIA WYPEŁNIENIA KONTROLOWANEGO I ZESTAWIENIE KOSZTÓW INSTALACJI KABLA WN

Rysunek 32 przedstawia standardowe ułożenie linii kablowej w układzie płaskim, z wykorzystaniem betonitu jako wypełnienia kontrolowanego. Normatywne wymiary takiego ułożenia dla polskich OSD i OSP przedstawiono w rozdziale 5.



Rysunek 32. Ułożenie linii kablowej w analizowanym układzie płaskim. Wyjaśnienie symboli w tekście

Oznaczenia na rysunku 32:

w – szerokość wypełnienia kontrolowanego, mm,

h – wysokość wypełnienia kontrolowanego, mm,

L_G – głębokość ułożenia geometrycznego środka wypełnienia kontrolowanego, mm,

L – głębokość ułożenia kabla, mm,

D_e – średnica zewnętrzna kabla, mm,

α – kąt skarpy rowu kablowego, °.

Żeby zobrazować koszt typowej linii kablowej WN, w tabeli 8 zaprezentowano koszty poszczególnych prac ziemnych, wypełnienia kontrolowanego oraz kabla bez osprzętu i roboczogodzin.

Tabela 8. Koszty elementów i prac związanych z budową linii kablowej (źródło: ELTEL Networks Energetyka SA, stan na 12.2019 r.)

Parametr	Współczynnik	Jednostka	Koszt [PLN/m]
Ręczne roboty ziemne	c_1	m ³	61,31
Mechaniczne roboty ziemne	c_2	m ³	41,18
Taśma ostrzegawcza i chodniki z płyt betonowych	c_3	m	55,36
Zasypanie rowu kablowego	c_4	m ³	19,65
Wywóz ziemi rodzimej, wypełnienie kontrolowane i zagęszczenie	c_5	m ³	335,04
Ułożenie kabli	c_6	m	10,31
Kabel o żyłach roboczych 630 mm ²	c_n $n=630,800,1000$	m	337,50
Kabel o żyłach roboczych 800 mm ²		m	476,10
Kabel o żyłach roboczych 1000 mm ²		m	550,00

Stosunek kosztów kabla do całkowitych kosztów ułożenia linii kablowej rośnie jedynie w miarę zwiększania pola przekroju żył roboczych kabla. Uzasadnione jest zatem zbadanie potencjału zwiększenia obciążalności linii kablowej przez zwiększenie pola przekroju wypełnienia kontrolowanego. Wypełnienie to i tak w większości wypadków musi zostać zainstalowane, co powoduje stosunkowo mniejszy wzrost kosztów niektórych elementów instalacji w odniesieniu do całości kosztów inwestycji. Przez wzgląd na powyższe, zaproponowano algorytm optymalizujący, który opublikowano w [57].

7.3. ALGORYTM OPTIMALIZUJĄCY LINIĘ KABLOWĄ WN

Na warunki brzegowe, ograniczające propagację geometrii wypełnienia kontrolowanego przez algorytm, wybrano zależności:



$$\frac{h}{2} + L_G \geq L + \frac{D_e}{2} + 100, \quad (29)$$

$$\theta L_G \geq \frac{h}{2}, \quad (30)$$

$$w \geq 5D_e, \quad (31)$$

$$w \leq h. \quad (32)$$

Ograniczenia (29) i (30) określają minimalną głębokość ułożenia kabla, bez których algorytm dążyłby w pierwszych krokach do jej zminimalizowania, proponując ułożenie tuż przy powierzchni ziemi ze względu na oczywistą zależność obciążalności prądowej długotrwałej od głębokości. Ograniczenia (31) i (32) wyznaczają minimalny wymiar szerokości wypełnienia kontrolowanego oraz kierunek jego propagacji. Zależności (29)-(32), oprócz ograniczeń, wyznaczają również punkt początkowy dla geometrii wypełnienia kontrolowanego.

Całkowity koszt linii kablowej WN można przedstawić za pomocą wyrażenia:

$$P = P_K(c_n) + P_E(c_1, c_2) + P_{ZZ}(c_4) + P_B(c_5) + P_{ES}(c_3, c_6), \quad (33)$$

gdzie:

P_K – koszt kabli, PLN/m,

P_E – koszt ekskawacji ziemi rodzimej, PLN/m,

P_{ZZ} – koszt wypełnienia wykopu wypełnieniem kontrolowanym, ziemią rodzimą i zagęszczenie, PLN/m,

P_B – koszt wypełnienia kontrolowanego, PLN/m,

P_{ES} – inne koszty, PLN/m,

$c_1 \dots c_n$ – współczynniki elementów kosztów linii kablowej przedstawione w tabeli 8, PLN/m.

Rozwinięta formuła wzoru (33) zaprezentowana poniżej przedstawia odpowiednie części przekroju rowu kablowego, których dotyczy odpowiedni koszt z tabeli 8:

$$\begin{aligned}
P \geq & \left[w + \left(L_G + \frac{h}{2} \right) \cdot \tan(\alpha) \right] \cdot h \cdot c_1 + (w + 2h \cdot \tan(\alpha)) \cdot \left(L_G + \frac{h}{2} \right) \cdot c_2 + \\
& + \left[(w + h \cdot \tan(\alpha)) \cdot h - 3\pi \left(\frac{D_e}{2} \right)^2 \right] \cdot c_5 + \\
& + \left\{ \left[w + \left(L_G + \frac{h}{2} \right) \cdot \tan(\alpha) \right] \cdot \left(L_G + \frac{h}{2} \right) - h(w + h \cdot \tan(\alpha)) - 3\pi \left(\frac{D_e}{2} \right)^2 \right\} \cdot c_4 + \\
& + 3c_n + c_3 + c_6.
\end{aligned} \tag{34}$$

Wyrażenia takie jak c_3 czy c_6 nie zależą od przekroju poprzecznego rowu kablowego i są niezmiennie dla dowolnego sposobu ułożenia. Inaczej jest z wyrażeniami dotyczącymi prac ziemnych. Aby przeprowadzić proces optymalizacji, wzór na obciążalność prądową długotrwałą trzeba uzależnić od geometrii wypełnienia kontrolowanego. Wobec tego wzór (15) można zapisać za pomocą wyrażień:

$$\begin{aligned}
a &= \Delta\theta - W_d \cdot (0.5T_1 + nT_2 + nT_3) \\
b &= -n \cdot W_d \\
c &= R \cdot T_1 + n \cdot R \cdot [(1 + \lambda_1) \cdot T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot T_3] \\
d &= n \cdot R \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2),
\end{aligned} \tag{35}$$

powodując uwikłanie funkcji do:

$$I_{dd} = \sqrt{\frac{a + b \cdot T_4}{c + d \cdot T_4}}. \tag{36}$$

Pozostałe wyrażenie T_4 , rezystancja cieplna otaczającego medium, jako jedyne jest zależne od geometrii wypełnienia kontrolowanego i rezystywności cieplnej medium wokół kabla. Jeżeli kabel jest ułożony w wypełnieniu kontrolowanym o rezystywności cieplnej różnej od rezystywności cieplnej ziemi rodzimej, to wpływ tego wypełnienia należy obliczyć stosując poprawkę do T_4 podaną przez Nehera i McGratha [12]. Podstawiając (28) do (36) otrzymuje się wyrażenie na obciążalność prądową długotrwałą zależną od geometrii wypełnienia kontrolowanego:

$$I = \sqrt{\frac{a + b \cdot \left[\frac{\rho_c}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{4L}{D_e}\right) + \frac{N}{2\pi} \cdot (\rho_e - \rho_c) \cdot \ln\left(\frac{2L_G}{r_b}\right) \right]}{c + d \cdot \left[\frac{\rho_c}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{4L}{D_e}\right) + \frac{N}{2\pi} \cdot (\rho_e - \rho_c) \cdot \ln\left(\frac{2L_G}{r_b}\right) \right]}} \quad (37)$$

$$= \sqrt{\frac{a + b_1 \cdot \rho_c \cdot \ln(L) + b_2 \cdot \rho_c + f_1 \cdot (\rho_e - \rho_c) \cdot \ln\left(\frac{2L_G}{r_b}\right)}{c + d_1 \cdot \rho_c \cdot \ln(L) + d_2 \cdot \rho_c + f_2 \cdot (\rho_e - \rho_c) \cdot \ln\left(\frac{2L_G}{r_b}\right)}}$$

gdzie stałe zostały przedstawione jako:

$$b_1 = \frac{b}{2\pi},$$

$$b_2 = \frac{b}{2\pi} \ln\left(\frac{4}{D_e}\right),$$

$$d_1 = \frac{d}{2\pi},$$

$$d_2 = \frac{d}{2\pi} \ln\left(\frac{4}{D_e}\right),$$

$$f_1 = \frac{b \cdot N}{2\pi},$$

$$f_2 = \frac{d \cdot N}{2\pi}.$$
(38)

Na podstawie wzorów (29)-(32) można sformułować wyrażenie optymalizujące:

$$\max\{I_{\max}[h, w, L_G, P(h, w, L_G, \alpha), \rho_c, \rho_e]\}. \quad (39)$$

Celem optymalizacji jest wyznaczenie najlepszej zależności kosztów linii kablowej od obciążalności prądowej długotrwałej względem zmieniających się wymiarów wysokości wypełnienia kontrolowanego h oraz głębokości ułożenia L_G kabla dla zadanych warunków rezystywności cieplnej wypełnienia kontrolowanego i ziemi rodzimej.

7.4. WYNIKI OBLICZEŃ Z WYKORZYSTANIEM ALGORYTMU OPTYMALIZACYJNEGO

Optymalizacja została przeprowadzona dla założeń:

- temperatura ziemi rodzimej jest równa 20 °C;

- maksymalna dopuszczalna temperatura na izolacji kabla jest równa 90 °C;
- kąt skarpy rowu wynosi 15° do pionu;
- głębokość ułożenia kabli jest stała i wynosi 1200 mm do najwyżej położonego kabla;
- rezystywność cieplna wypełnienia kontrolowanego wynosi $\rho_c = 0,5 - 0,9$, a ziemi rodzimej $\rho_e = 1,0 - 2,5$ (K·m)/W;
- dopuszczalna cena za metr linii kablowej mieści się w przedziałach:

$$P(c_{630}) = 1220 - 2750 \text{ PLN/m};$$

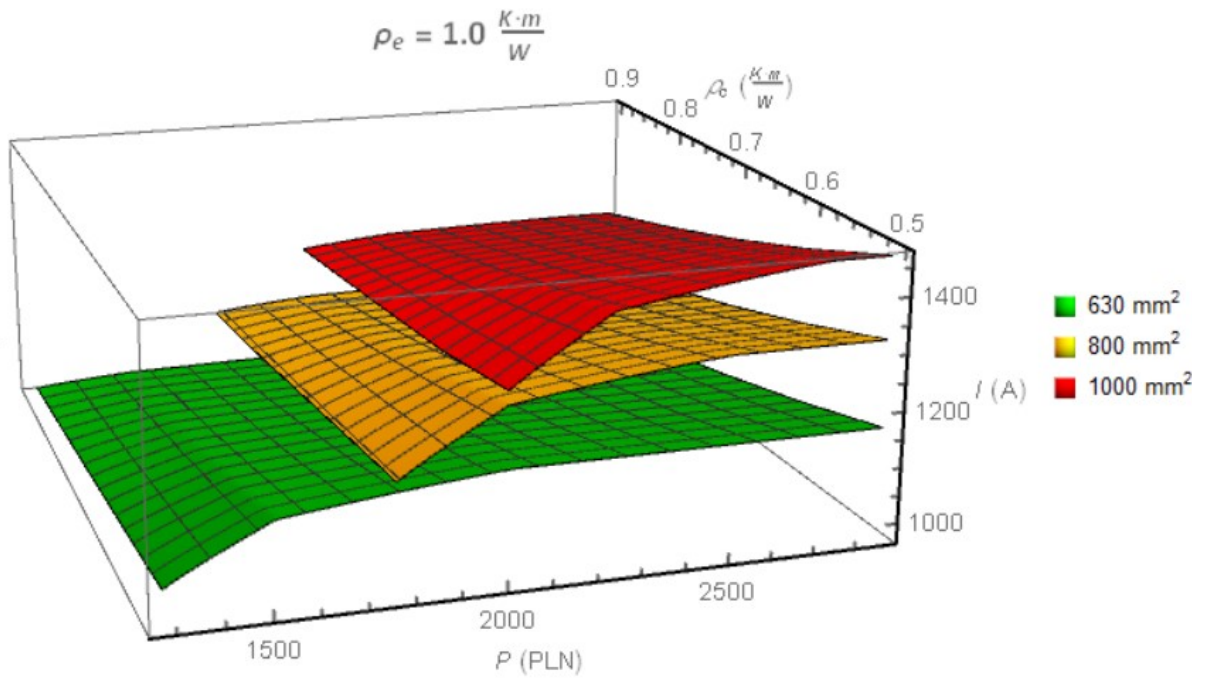
$$P(c_{800}) = 1670 - 2750 \text{ PLN/m};$$

$$P(c_{1000}) = 1870 - 2750 \text{ PLN/m}.$$

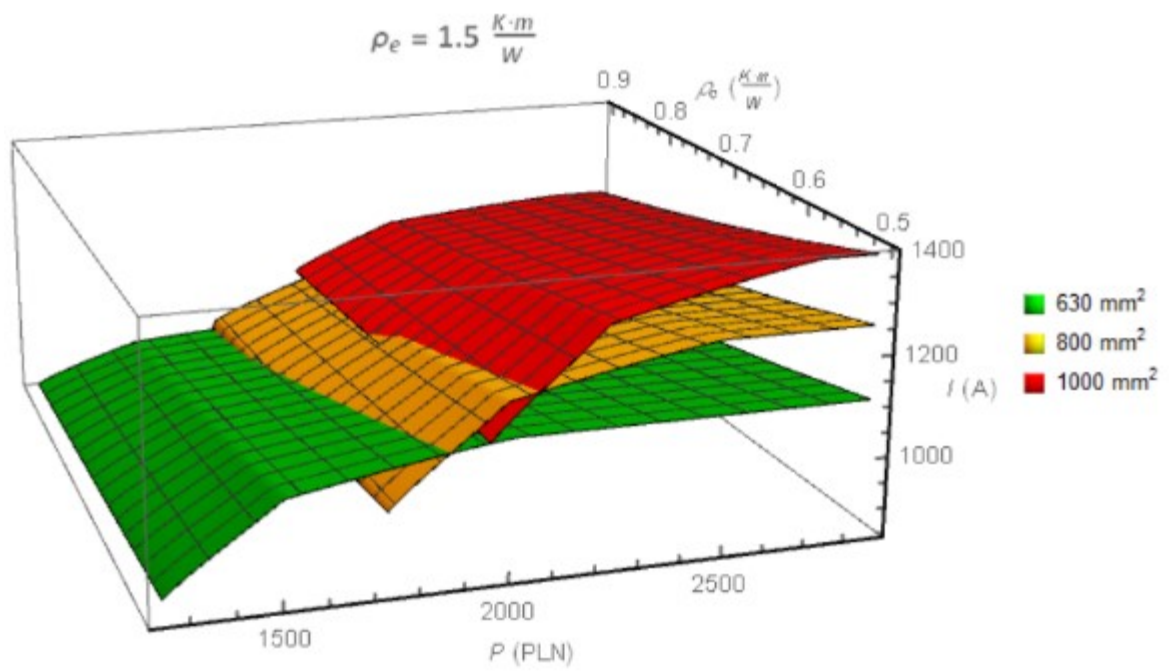
Geometria wypełnienia kontrolowanego x, y uwikłana jest w koszcie linii P i jego propagacja została pokazana graficznie w dalszej części rozdziału.

Wyniki optymalizacji zostały przedstawione na rysunkach 33 i 34. Obciążalność prądowa długotrwała rośnie wraz ze wzrostem nakładów inwestycyjnych w polepszenie warunków odprowadzania ciepła oraz jest tym większa, im mniejsza jest różnica pomiędzy rezystywnością cieplną wypełnienia kontrolowanego i ziemi rodzimej. Dla przypadków, gdzie różnica pomiędzy wartościami rezystywności cieplnej obu mediów zwiększa się, zaobserwować można przecinanie się płaszczyzn wartości obciążalności (np. rys. 33a względem rys. 34c-d). Miejsca przecięcia wyznaczają optymalny punkt przejścia z kabla o większym polu przekroju żyły roboczej na kabel o mniejszym polu przekroju żyły roboczej względem kosztów instalacji przypadających na jeden metr długości linii kablowej.

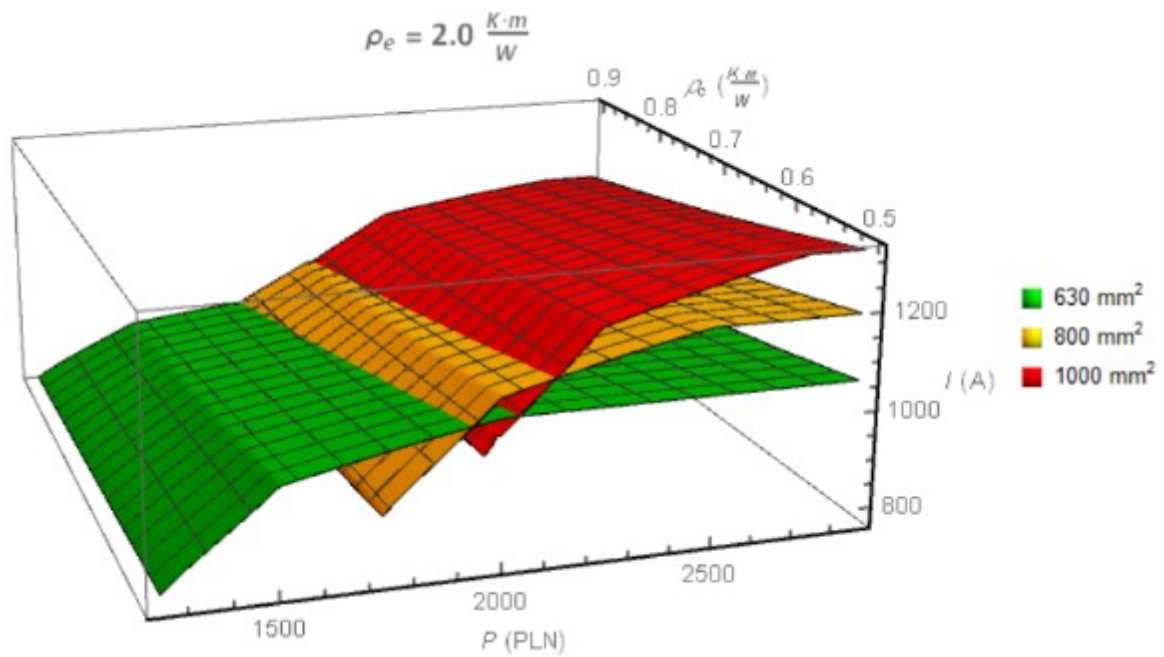
a)



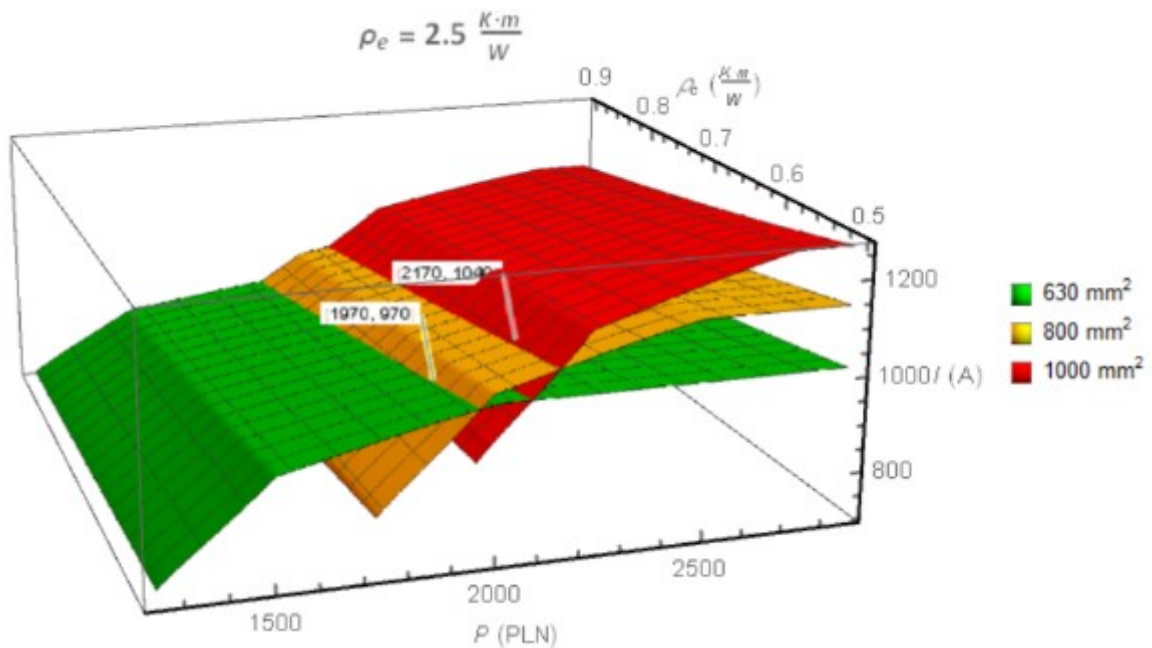
b)



c)



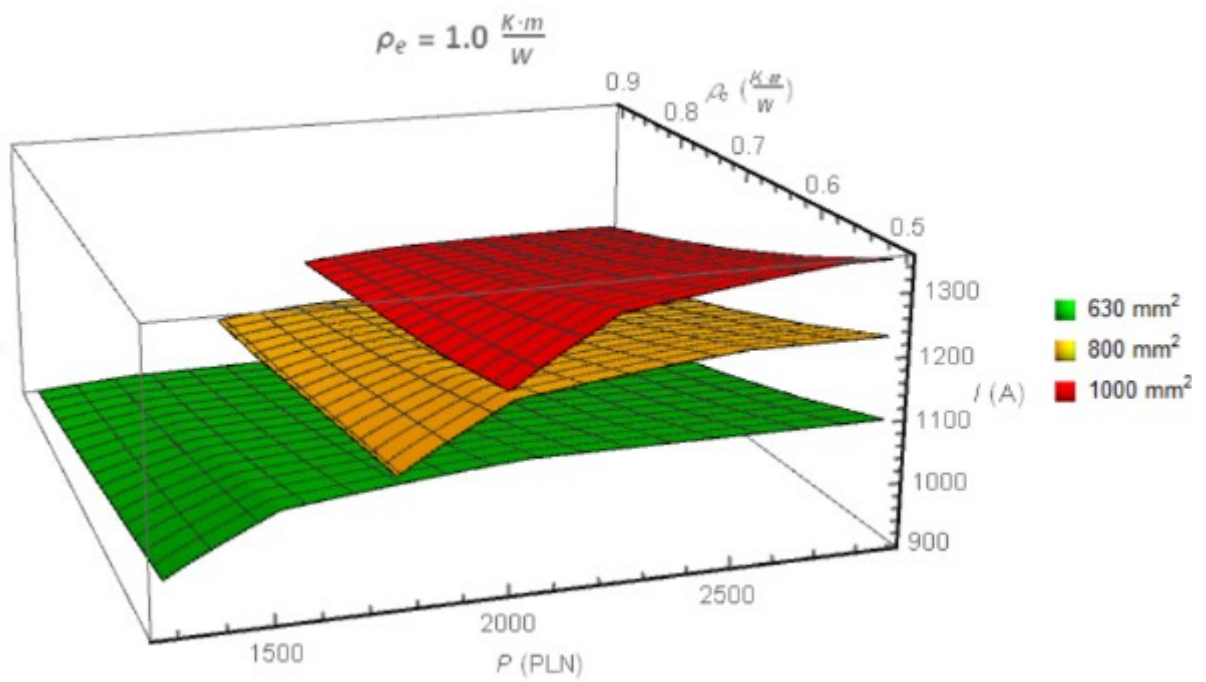
d)



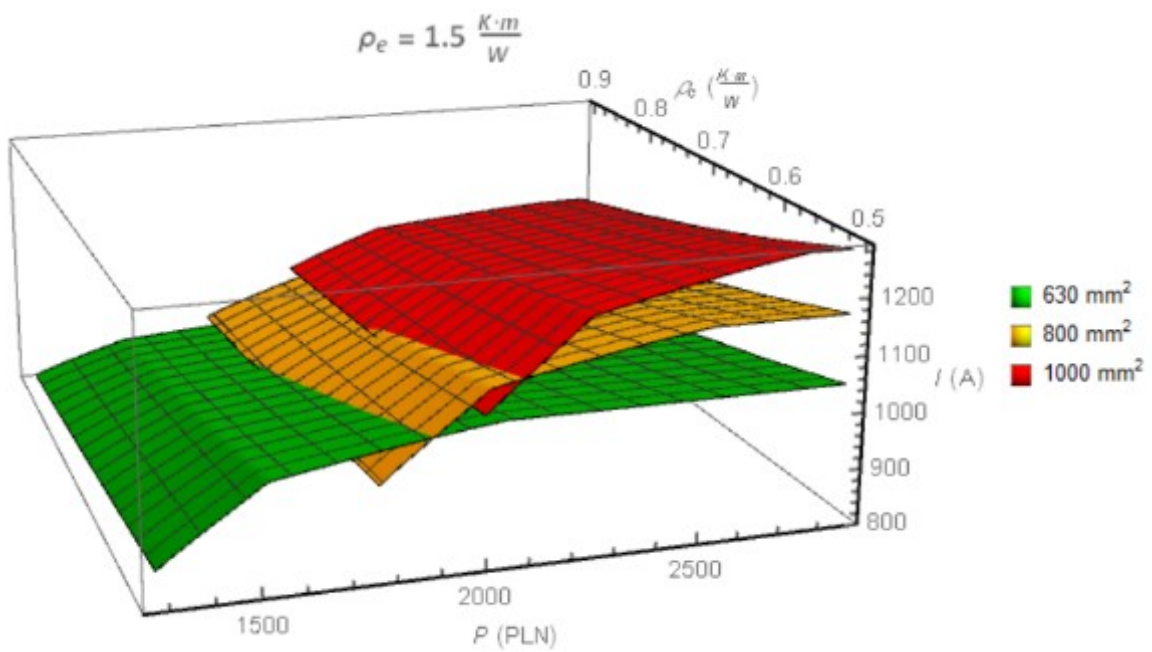
Rysunek 33. Obciążalność prądowa kabli WN (630 mm², 800 mm² i 1000 mm²) w konfiguracji płaskiej jako funkcja kosztów instalacji kabla oraz rezystywności cieplnej wypełnienia kontrolowanego i ziemi rodzimej: (a) $\rho_e = 1,0$ (K·m)/W; (b) $\rho_e = 1,5$ (K·m)/W; (c) $\rho_e = 2,0$ (K·m)/W; (d) $\rho_e = 2,5$ (K·m)/W.

Na rys. 33d wyszczególniono punkty optymalnego przejścia na kabel o rząd wyższym polu przekroju żyły roboczej {1970 PLN, 970 A} i {2170 PLN, 1040 A}, dla rezystywności cieplnej wypełnienia kontrolowanego $\rho_c = 0,6$ (K·m)/W

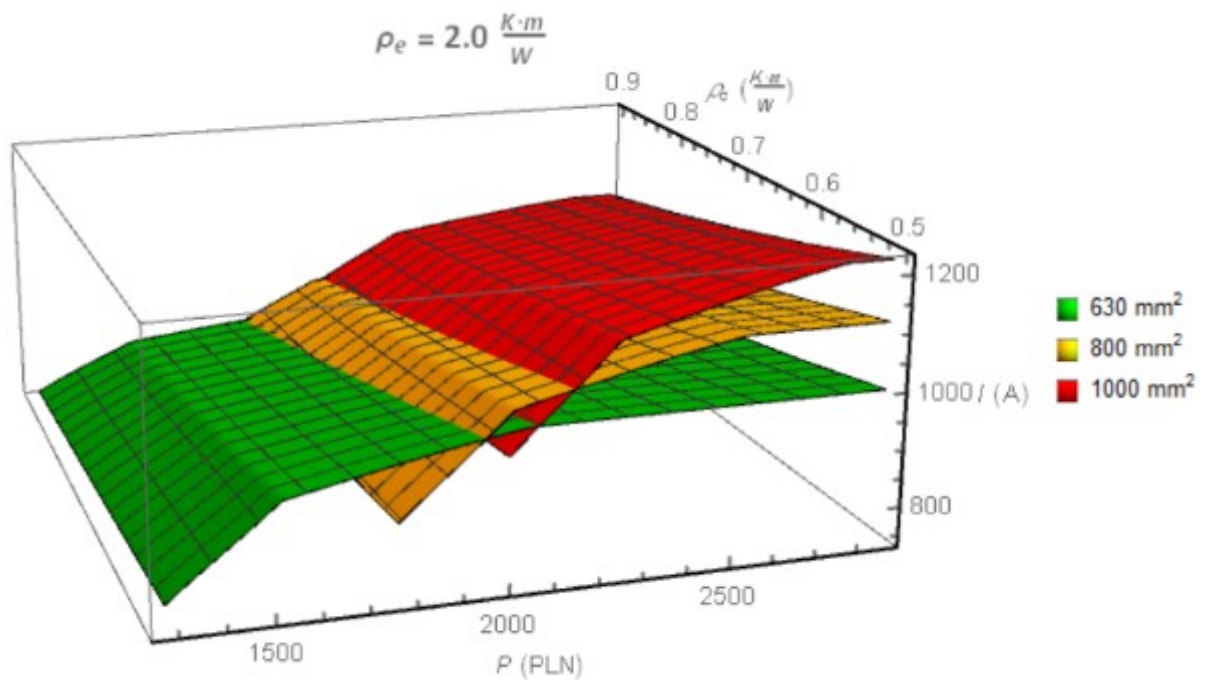
a)



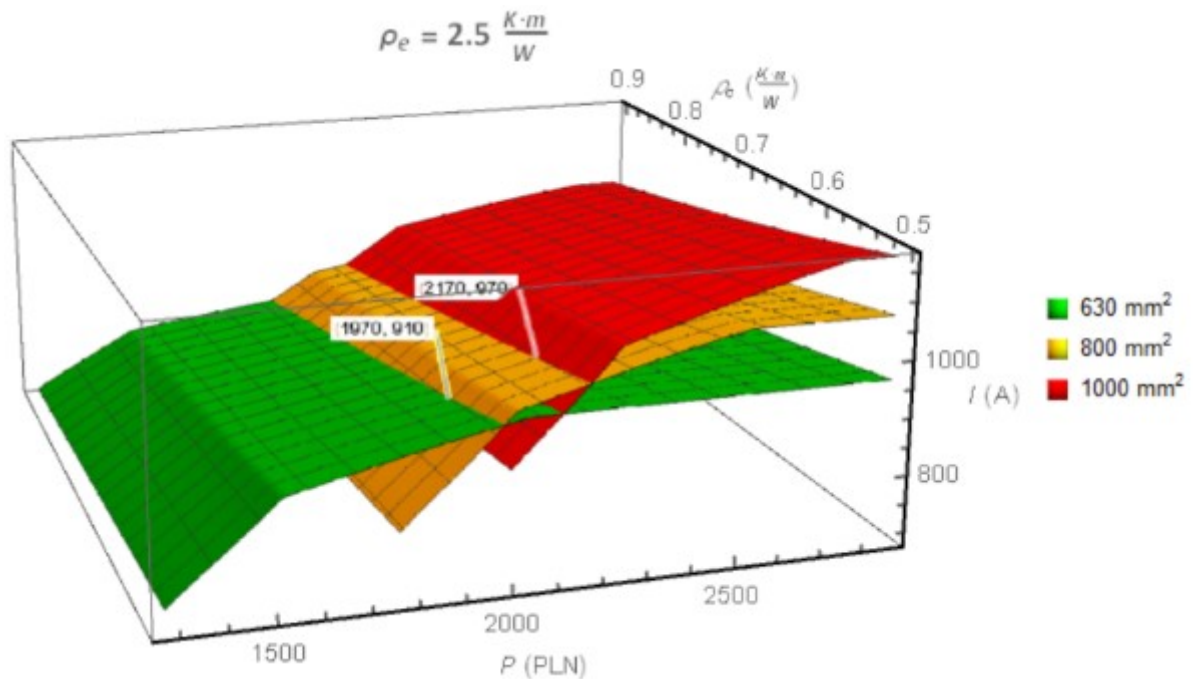
b)



c)



d)



Rysunek 34. Obciążalność prądowa kabli WN (630 mm², 800 mm² i 1000 mm²) w konfiguracji trójkąta równobocznego jako funkcja kosztów instalacji kabla oraz rezystywności cieplnej wypełnienia kontrolowanego i ziemi rodzimej: (a) $\rho_e = 1,0$ (K·m)/W; (b) $\rho_e = 1,5$ (K·m)/W; (c) $\rho_e = 2,0$ (K·m)/W; (d) $\rho_e = 2,5$ (K·m)/W. Na rys. 34d wyszczególniono punkty optymalnego przejścia na kabel o rząd wyższym polu przekroju żyły roboczej {1970 PLN, 910 A} i {2170 PLN, 970 A}, dla rezystywności cieplnej wypełnienia kontrolowanego $\rho_c = 0,6$ (K·m)/W

Jak można zaobserwować, dla przypadku z rysunku 33d, dla kabli ułożonych w konfiguracji płaskiej, przy rezystywności cieplnej ziemi $2,5 \text{ (K}\cdot\text{m)/W}$ i wypełnienia kontrolowanego $0,6 \text{ (K}\cdot\text{m)/W}$, obciążalność prądowa długotrwała zaczyna się dla standardowych warunków ułożenia od 723 A przy koszcie 1220 PLN (inwestycja w kabel 630 mm^2 , zielona płaszczyzna na rysunku 33). Dalsze nakłady finansowe w wypełnienie kontrolowane zwiększają obciążalność (na rysunku 33 max. 2750 PLN). Na linii ponoszonych kosztów można zaobserwować, że płaszczyzna reprezentująca kabel 630 mm^2 (zielona) przecina się z płaszczyzną kabla 800 mm^2 (żółta) w punkcie {1970 PLN, 910 A}. Do tego punktu, dla warunków rezystywności obu mediów z omawianego przykładu, płaszczyzna położona najwyżej reprezentuje warunki ułożenia, które są optymalne kosztowo względem obciążalności (tutaj: zakres 1220 – 1970 PLN, kabel 630 mm^2). Powyżej kosztu równego 1970 PLN najlepszym wyborem staje się kabel 800 mm^2 , ale z mniejszą inwestycją w wypełnienie kontrolowane w stosunku do przypadku dla kabla 630 mm^2 . Dla pełniejszego zrozumienia zagadnienia można rozpatrzeć kwotę 1750 PLN. Dla tej kwoty rozszerzenie wymiarów wypełnienia kontrolowanego w stosunku do wymaganego standardami (jego koszt dla wymaganych minimalnych wymiarów wg standardów technicznych to 1220 PLN) skutkuje obciążalnością $I_{630} = 902 \text{ A}$. Jeżeli przyjąć taki sam koszt dla kabla o przekroju żyły roboczej 800 mm^2 (1750 PLN – większy przekrój żyły roboczej, ale mniej wypełnienia kontrolowanego), to jego obciążalność długotrwała wyniesie tylko $I_{800} = 849 \text{ A}$, a więc jest o 6% niższa w stosunku do rozwiązania z kablem o przekroju 630 mm^2 .

Drugim charakterystycznym punktem dla danego przykładu jest punkt przecięcia płaszczyzn kabla 800 mm^2 i kabla 1000 mm^2 (odpowiednio żółta i czerwona płaszczyzna), oznaczony na rysunku 33 wartością {2170 PLN, 1040 A}.

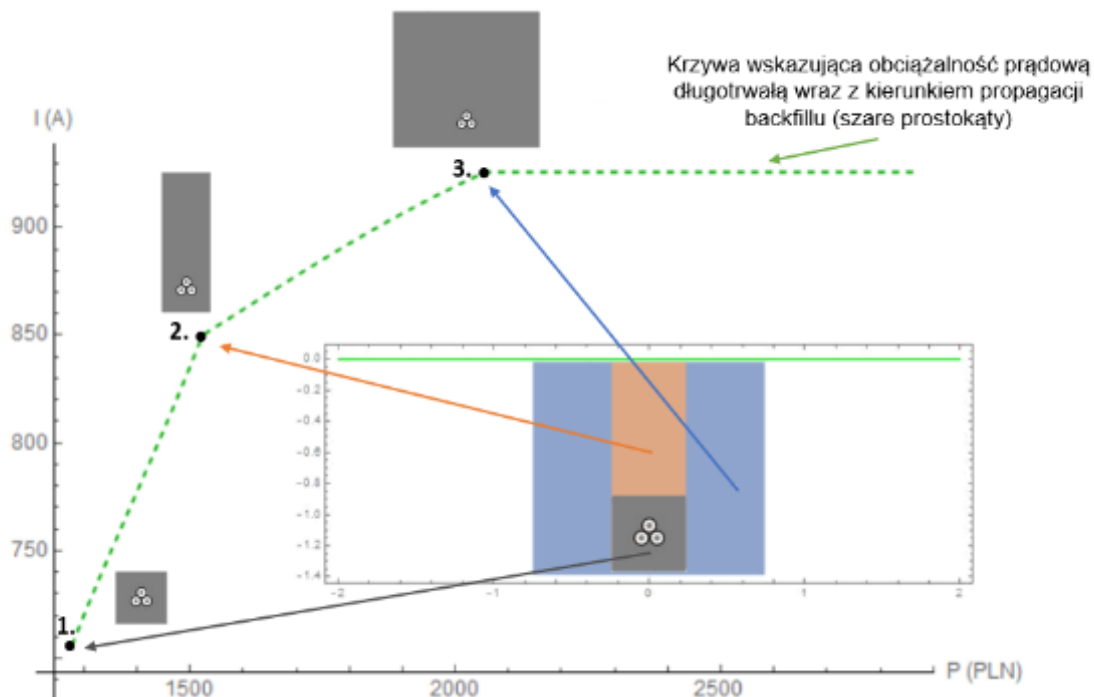
Analiza przypadku rezystywności cieplnej ziemi rodzimej $\rho_e = 2,5 \text{ (K}\cdot\text{m)/W}$ i rezystywności cieplnej wypełnienia kontrolowanego $\rho_c = 0,6 \text{ (K}\cdot\text{m)/W}$ (z rysunku 33d) pozwala sformułować następujące wnioski:

- Jeśli pożądana obciążalność prądowa długotrwała wynosi poniżej 970 A, powinno się dobrać kabel 630 mm^2 wraz z odpowiednią inwestycją w wypełnienie kontrolowane;

- Jeżeli pożądana obciążalność prądowa długotrwała wynosi pomiędzy 970 A i 1040 A, powinno się dobrać kabel 800 mm² wraz z odpowiednią inwestycją w wypełnienie kontrolowane;
- Jeśli pożądana obciążalność prądowa długotrwała wynosi powyżej 1040 A, powinno się dobrać kabel 1000 mm² wraz z odpowiednią inwestycją w wypełnienie kontrolowane.

W podobny sposób przeprowadzono obliczenia dla ułożenia kabli w konfiguracji trójkątnej symetrycznej (ang. *trefoil*). Charakterystyka przebiegu funkcji jest taka sama jak dla ułożenia płaskiego. Nieco inne są miejsca przecięcia się poszczególnych płaszczyzn (rys. 34). Dla przypadku rezystywności cieplnej ziemi rodzimej $\rho_e = 2,5$ (K·m)/W i rezystywności cieplnej wypełnienia kontrolowanego $\rho_c = 0,6$ (K·m)/W, na rysunku 34d wyszczególniono dwa charakterystyczne punkty przejść:

- Jeśli pożądana obciążalność prądowa długotrwała wynosi poniżej 910 A, powinno się dobrać kabel 630 mm² wraz z odpowiednią inwestycją w wypełnienie kontrolowane (koszt inwestycji do 1970 PLN/m);
- Jeżeli pożądana obciążalność prądowa długotrwała wynosi pomiędzy 910 A i 970 A, powinno się dobrać kabel 800 mm² wraz z odpowiednią inwestycją w wypełnienie kontrolowane (koszt inwestycji pomiędzy 1970 a 2170 PLN/m);
- Jeśli pożądana obciążalność prądowa długotrwała wynosi powyżej 970 A, powinno się dobrać kabel 1000 mm² wraz z odpowiednią inwestycją w wypełnienie kontrolowane (koszt inwestycji powyżej 2170 PLN/m).



Rysunek 35. Obciążalność prądowa długotrwałą w funkcji kosztu. Kable 630 mm² ułożone w konfiguracji trójkąta równobocznego (trefoil). Punkty charakterystyczne:
 (1) $I = 706$ A (najmniejszy przekrój poprzeczny wypełnienia kontrolowanego); (2) $I = 851$ A;
 (3) $I = 926$ A (największa powierzchnia wypełnienia kontrolowanego).
 Rezystywność cieplna: $\rho_e = 2,5$ (K·m)/W, $\rho_c = 0,6$ (K·m)/W.

Jak wykazano, wyższą obciążalność prądową kabli można uzyskać zachowując ten sam przekrój żyły roboczej kabla, ale tworząc odpowiednie warunki do oddawania ciepła przez zwiększenie pola przekroju wypełnienia kontrolowanego. Na rysunku 35 przedstawiono propagację powierzchni wypełnienia kontrolowanego dla przykładu linii kablowej z kablami 630 mm² w formacji trefoil, przy rezystywności cieplnej ziemi rodzimej $\rho_e = 2,5$ (K·m)/W i wypełnienia kontrolowanego $\rho_c = 0,6$ (K·m)/W. Zaznaczony na rys. 35 w punkcie 1 obszar wypełnienia kontrolowanego jest najmniejszy, a obciążalność linii kablowej wynosi 706 A, zaś dla największego, oznaczonego w punkcie 3, wynosi 926 A. Przerywana linia wskazuje zmianę obciążalności w funkcji kosztów instalacji – a przez to zwiększania powierzchni przekroju wypełnienia kontrolowanego. Stroma linia między punktami 1 i 2 odpowiada za największy przyrost obciążalności w stosunku do kosztów linii kablowej w przekroju całej funkcji dla kabla 630 mm². Jest to spowodowane tym, że algorytm jako najlepszy możliwy wariant uznaje wymianę ziemi rodzimej na odcinku kabel – powierzchnia ziemi na wypełnienie

kontrolowane o mniejszej rezystywności cieplnej. Wynika to z logarytmicznej zależności na G_b , będącej składową T_4 , która jest zależna od geometrycznego środka wypełnienia kontrolowanego i stosunku odcinków (do pokonania przez ciepło) ziemi rodzimej i wypełnienia kontrolowanego pomiędzy kablem a powierzchnią ziemi. Pomiedzy punktami 2 i 3 następuje zmniejszenie kąta nachylenia przebiegu funkcji – w miejscu osiągnięcia przez algorytm powierzchni ziemi propagacja wypełnienia kontrolowanego zaczyna przebiegać na boki, co daje mniejszy wzrost obciążalności w zależności od poniesionych nakładów inwestycyjnych w wypełnienie kontrolowane. Po przekroczeniu punktu 3, przebieg funkcji robi się prawie horyzontalny. Kolejne kroki algorytmu zwiększają szerokość i wysokość wypełnienia kontrolowanego jednakowo, obniżając przy tym jego geometryczny środek – od tego punktu zwiększanie nakładów inwestycyjnych w wypełnienie kontrolowane jest nieuzasadnione ekonomicznie.

7.5. WNIOSKI

Zakładaną projektowo obciążalność prądową długotrwałą linii kablowej wysokich napięć można uzyskać przez dobór kabla o odpowiednio dużym przekroju żyły roboczej albo przez wpływ na polepszenie warunków oddawania ciepła w bezpośrednim otoczeniu tejże linii, np. powiększając pola przekroju wypełnienia kontrolowanego. Proces optymalizacji opisany w rozdziale jest szczególnie wskazany dla linii kablowych położonych w gruncie, gdzie na jej długości nie występują przepusty lub przeciski rurowe pod przeszkodami. Dla takich odcinków (np. w stacjach elektroenergetycznych lub wyprowadzenie mocy z farm wiatrowych do Głównego Punktu Odbioru), przy odpowiednio dużej różnicy pomiędzy rezystywnością cieplną wypełnienia kontrolowanego a ziemi rodzimej poleca się, w zależności od wymaganej projektem obciążalności prądowej, inwestycję w ponadnormatywne wymiarowo wypełnienie kontrolowane o niskiej rezystywności cieplnej. Stąd przedstawione przez autora rozprawy podejście, związane z projektowaniem systemu elektroenergetycznego, może być interesujące i przydatne dla inwestorów, a także projektantów linii kablowych elektroenergetycznych do optymalizacji wysokonapięciowych systemów kablowych.

8. BADANIA ZMIAN TEMPERATURY I WILGOTNOŚCI FIZYCZNEGO MODELU LINII KABLOWEJ

8.1. WPROWADZENIE

Pomiary mające na celu ustalenie migracji wilgoci, weryfikację rozkładu temperatury wyznaczonego za pomocą symulacji numerycznych w programach typu ANSYS oraz na potrzeby zbadania zachowania nowych propozycji mieszanek wypełnień kontrolowanych są stosunkowo często przeprowadzane przez badaczy. Można wymienić m.in. prace [79-83], które były przeprowadzane laboratoryjnie, pracę Andersa i Radhakrishna [84], opisującą eksperyment, który został przeprowadzony na rzeczywistym obiekcie linii kablowej wysokiego napięcia, oraz wyniki numeryczne, np. [85, 86].

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badania eksperymentalnego, mającego na celu ustalenie zmian temperatury i wilgotności wokół obciążonej linii kablowej, w długim przedziale czasu. W ramach tych badań oceniono również wpływ otuliny paroizolacyjnej, mającej na celu zatrzymanie wilgoci w betonicie, który otacza kable.

8.2. OPIS BADAŃ

Na terenie laboratorium LINTE², należącym do Politechniki Gdańskiej, wybudowano instalację badawczą, mającą na celu symulację pracy linii kablowej. Na głębokości 1 m ułożono w układzie płaskim przewody grzejne w odstępach 15 cm, na długości 2 m. Przewody te otoczono otuliną betonitową o wymiarach 60 x 30 cm. Betonit wykonano w proporcji 14:1 (piasek : cement)(rys. 36). Do symulacji linii kablowej użyto przewodu grzejnego PTFE o łącznej długości 7 m i mocy 80 W, wraz z regulatorem Esco ES-10D (rys. 37). W ten sposób zasymulowano generację strumienia cieplnego, który pojawia się w kablu pod wpływem płynącego prądu. Na odcinku jednego metra symulowanej linii kablowej kable owinięto folią paroizolacyjną, tworząc w ten sposób stanowisko pomiarowe, do którego później referuje się jako „stanowisko w folii paroizolacyjnej”. Drugi metr długości symulowanej linii kablowej pozostawiono w ułożeniu standardowym z betonitem (bez folii), tworząc w ten sposób stanowisko pomiarowe, do którego odwołuje się później jako „bazowe”. W połowie długości każdego stanowiska (0,5 m) umiejscowiono sondy do pomiaru wilgotności i temperatury, których ułożenie jest wyjaśnione w dalszej części rozdziału. Do pomiarów temperatury i wilgotności użyto rejestratorów firmy Efento (rys. 38).

Celem eksperymentu było zbadanie:

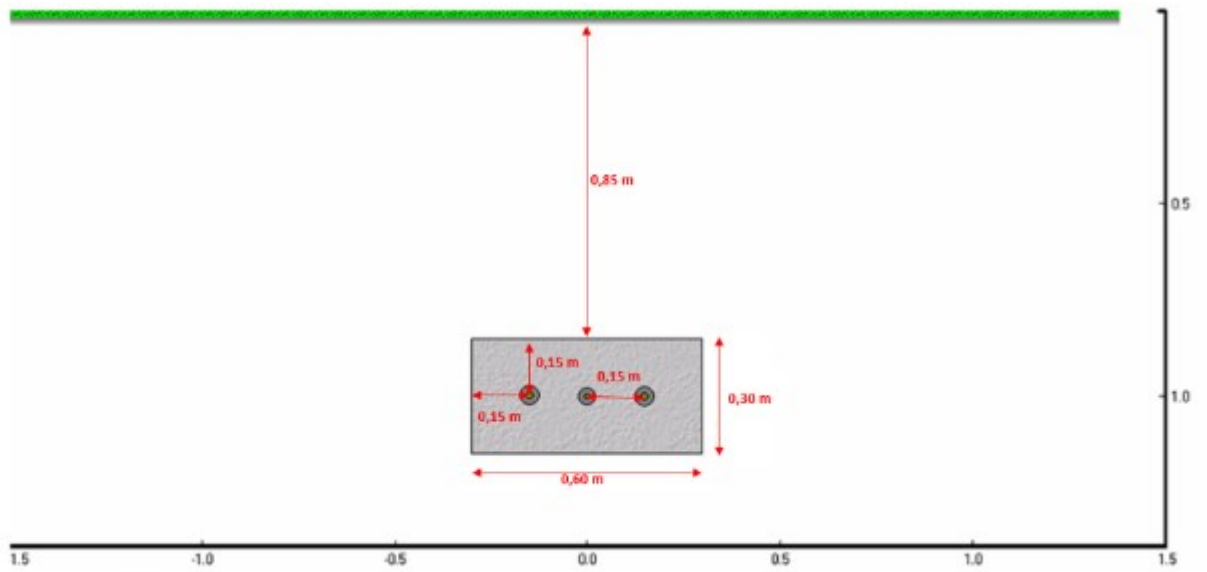
- rozkładu temperatury wokół linii kablowej przy określonym stałym obciążeniu;
- rozkładu wilgotności wewnątrz i wokół wypełnienia kontrolowanego;
- wpływu zaproponowanej otuliny paroizolacyjnej na wilgotność wewnątrz i wokół linii kablowej.

Proces budowy stanowiska pomiarowego składał się z następujących etapów:

- przygotowanie sond pomiaru wilgotności (widocznych na rys. 38);
- wykopanie rowu kablowego (rys. 39-41);
- instalacja betonitu i symulowanej linii kablowej (rys. 42-48);
- zasypanie betonitu ziemią rodzimą (rys. 49 i 50).

Zmierzona wilgotność masowa początkowa ziemi rodzimej na głębokości 1,15 m wynosiła 6,6%. Przy wytwarzaniu betonitu o proporcjach piasku do cementu 14:1 dodano 8% masowo wody (piasek użyty do wytworzenia betonitu był w wilgotności atmosferycznej). Po wsypaniu mieszanki piaskowo-cementowej do rowu kablowego i ubiciu go, odczekano 24 h w celu zestalenia, a następnie zwiększono wilgotność betonitu na obu stanowiskach (z folią i bez folii) do 20% masowej wilgotności. Po dokładnym zabezpieczeniu jednego stanowiska folią, cały układ badawczy zasypano ziemią rodzimą. W procesie budowy stanowiska, ze względu na silne opady atmosferyczne, które zaburzyłyby wilgotność na głębokości pracy linii kablowej użyto folii zabezpieczającej powierzchnię gruntu (rys. 41).

Dnia 30.07.2021 zakopano rów kablówy i pozostawiono do ustabilizowania temperatury. Eksperyment rozpoczął się 02.08.2021 r. przez załączenie przewodu grzejnego, a wyniki zamieszczone w niniejszej pracy były zbierane do 21.03.2022 r., co odpowiada 234 dniom pomiarowym.



Rysunek 36. Poglądowe ułożenie symulowanej linii kablowej ułożonej w betonie



Rysunek 37. Testy przewodu grzejnego i regulatora



Rysunek 38. Przygotowanie sond wilgotności zgodnie z instrukcją producenta



Rysunek 39. Widok rowu kablowego. Po bokach widać elementy istniejącej infrastruktury podziemnej. W centralnej części fotografii bariera do separacji stanowisk (odcinek bez z folii i odcinek z folią)



Rysunek 40. Pomiar głębokości rowu kablowego



Rysunek 41. Zabezpieczenie stanowiska przed wpływem opadów atmosferycznych



Rysunek 42. Przygotowanie folii paroizolacyjnej wraz z miernikami



Rysunek 43. Proces wypełniania betonem odcinka ułożonego w folii paroizolacyjnej



Rysunek 44. Ułożenie przewodu grzejnego symulującego linię kablową (źródło ciepła) na obu stanowiskach pomiarowych. Dno rowu wypełnione betonem



Rysunek 45. Zakończenie umieszczania betonitu



Rysunek 46. Proces owijania betonitu w folię paroizolacyjną. Szczególną uwagę zwrócono, by nie powstały „kieszenie” z folii, w których mogłaby osiadać wilgoć



Rysunek 47. Zakończenie uszczelniania folii na stanowisku



Rysunek 48. Widok na stanowisko pomiarowe przed zasypaniem go ziemią rodzimą



Rysunek 49. Stanowisko pomiarowe po zasypaniu ziemią rodzimą



Rysunek 50. Przyłączenie przewodu grzejnego – zakończenie budowy stanowiska pomiarowego

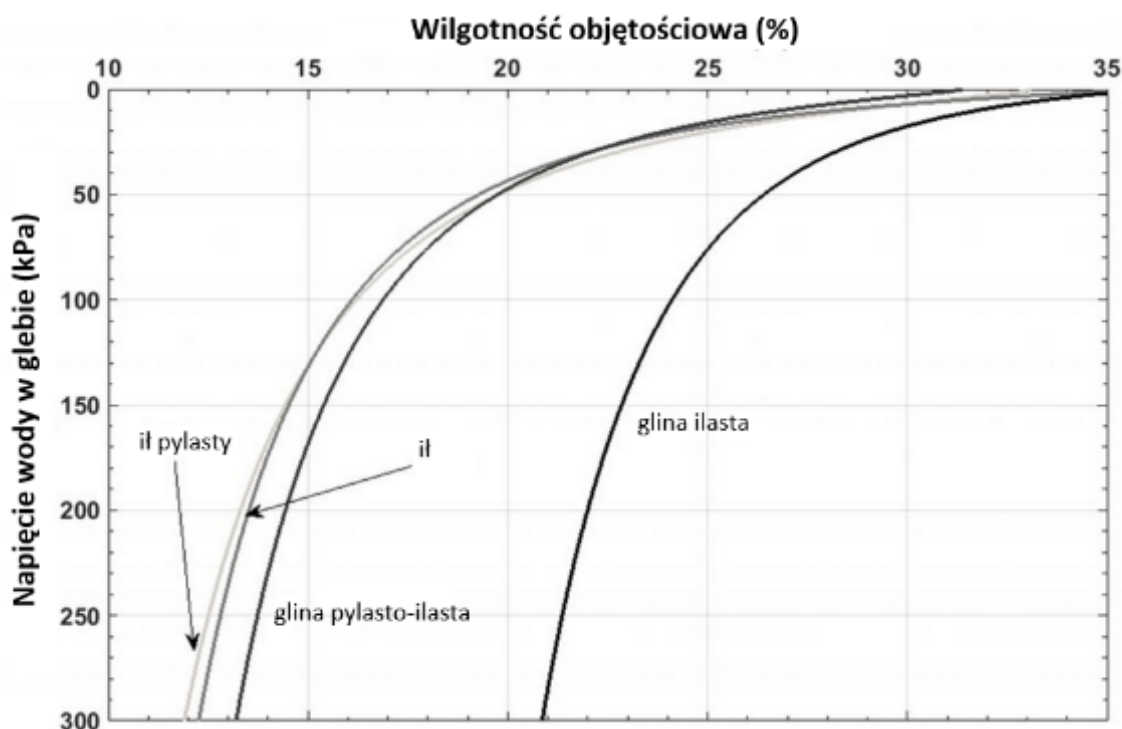
8.2. WYNIKI POMIARÓW

Wyniki pomiarów zaprezentowano na rysunkach 52-55. Sondy oznaczono skrótami **D**- dół, **B**- bok oraz **G**- góra, które oznaczają kierunek, w którym zostały umiejscowione w stosunku do osi symetrii układu kablowego. Numery 1-3 oznaczają odległość ułożenia od najbardziej wysuniętego kabla/przewodu grzejnego, tj. 1- w odległości 7,5 cm, 2- w odległości 15 cm i 3- w odległości 30 cm. Litera **F** wskazuje na pomiary ze stanowiska owiniętego folią paroizolacyjną. Sondy ułożone najbliżej, 1, znajdują się w połowie odległości pomiędzy najbliższym kablem a granicą betonitu. Sondy środkowe, 2, znajdują się w ziemi rodzimej, za granicą ośrodków betonitu i ziemi rodzimej, np. D2F oznacza sondę na stanowisku z folią, znajdującą się pod betonitem, pod folią, mając z nią styczność. Sondy wysunięte najdalej od linii kablowej, 3, znajdują się w odległości 15 cm od granicy betonitu, w ziemi rodzimej, w osi symetrii układu. Uproszczoną wizualizację ułożenia sond wraz z wynikami zaprezentowano na rysunkach 56-59. Na rysunku 60 zaprezentowano temperaturę powietrza oraz opady atmosferyczne ze stacji IMGW Gdańsk-Świbno, które posłużyły do oceny wpływu atmosfery na wilgotność i temperaturę na stanowisku pomiarowym (rys. 61 i 62).

W trakcie trwania pomiarów uszkodzeniu uległo (w różnym czasie) 7 z 18 sond. Na stanowisku G3F nastąpił błąd odczytu danych w okresie od 05.12.2021 do 27.01.2022, co jest widoczne na rysunku 53. Mimo tych przeciwności trend przebiegu funkcji temperatury i wilgotności w czasie jest zauważalny na każdym stanowisku.

8.3. OMÓWIENIE METODY POMIARU WILGOTNOŚCI

Jednym z głównych czynników decydujących o właściwościach materiałowych gleb nienasyconych jest zmiana ciśnienia dynamicznego w glebie. Zależność pomiędzy zdolnością do przepływu wody w ośrodku a wilgotnością jest nieliniowa, na którą duży wpływ ma frakcja gleby. Relacja ta jest histerezą i jest spowodowana tym, że podczas nawilżania i wysuszenia gleby wypełniają się oraz wysuszają małe pory przed dużymi. Zależność tę w postaci nieliniowego przebiegu funkcji można zaobserwować na rysunku 51.



Rysunek 51. Napięcie wody w glebie w funkcji wilgotności dla czterech typów gleb sklasyfikowanych wg BN-78/9180-11 [87]. Rysunek przetłumaczono z języka angielskiego na podstawie licencji CC BY 4.0 z [88]

Pomiar wilgotności na stanowisku laboratoryjnym wykonany został przez sondę hydrodynamiczną (rys. 38), wewnątrz której znajduje się elektroda umieszczona w granulacie. Dzięki hydrofilowej powłoce granulatu, sonda ma zdolność do aktywnej reakcji na zmianę wilgoci otoczenia - wraz ze zmieniającą się wilgotnością gleby, rezystancja granulatu pomiędzy elektrodami rośnie lub maleje, co wpływa na wynik odczytu.

Zastosowane w eksperymencie sondy są szeroko stosowane w rolnictwie, a mierzona przez nie wartość to tzw. napięcie wody w glebie (SWT – ang. soil water tension). Definiuje się je jako ciśnienie wody w glebie w określonym czasie, która reprezentuje ilość siły potrzebnej do wydobycia wody z jej porów. Jest to wielkość empiryczna, która powstała ze względu na sposób pomiaru wilgotności gleby, zaproponowanego przez Schocka [85]. Poza metodą analityczną Philipa i De Vriesa z użyciem rozwinięcia Galerkina [84] służącą do powiązania tych dwóch wielkości, istnieje wiele prac empirycznego powiązania tych wielkości, głównie dla różnych rodzajów ziemi. Dla mieszanki cementowo-piaskowej, wg wiedzy autora, nie przeprowadzono dotychczas pomiarów, których można by było użyć w niniejszej rozprawie.

Zwyczajowo, do oceny stanu wilgotności ziemi stosuje się następującą tabelę porównawczą, jak poniżej (Tab. 8).

Tabela 8. Stopień nawodnienia gleby na podstawie odczytu napięcia wody

Stan ziemi	Napięcie wody w glebie, kPa
Nasycona	0 - 10
Mokra	10 - 30
Dobrze nawodniona	30 - 60
Nawodniona	60 - 100
Sucha	100 - 200

8.4. OMÓWIENIE WYNIKÓW I WNIOSKI

Temperatura

Przebiegi temperatury są bardzo zbliżone pomiędzy czujnikami na różnych odległościach od kabla w jednej linii. Różnica temperatur pomiędzy skrajnymi miernikami na danym stanowisku, 1 i 3 oraz 1F i 3F, nie przekracza 3 °C. Obserwowane przebiegi temperatury na dwóch stanowiskach nie różnią się zbyt od siebie. Im bliżej linii kablowej, tym różnice temperatury są mniejsze, i tak, porównując odczyty z G1 i G1F pojedyncze wartości w danej chwili odczytu różnią się o maksymalnie 0,7 °C. Mniejszymi wartościami temperatury betonitu, w szczególności podczas wahań temperatury (zmiany przebiegu funkcji temperatury w czasie), charakteryzuje się ośrodek wewnątrz folii paroizolacyjnej, co wskazuje na to, że prędkość oddawania ciepła w wilgotnym ośrodku jest większa. Jak można zauważyć na rys. 61, temperatura powietrza ma bardzo duży wpływ na charakterystykę przebiegu temperatury w czasie wokół kabla.

Wilgotność

Ziemia wokół stanowiska z folią jest wilgotniejsza niż na stanowisku bazowym (bez folii) (rys. 54, 55, 58, 59). Odczyty wilgotności z sond umieszczonych wewnątrz folii nie zmieniły się od rozpoczęcia eksperymentu (okres niemal 8 miesięcy) – zakłada się, że zamierzony cel został osiągnięty i zatrzymano wilgoć wewnątrz wypełnienia kontrolowanego owiniętego folią. Nasylenie ziemi wodą po uruchomieniu przewodu grzejnego raptownie zaczęło spadać w rejonach na zewnątrz folii na stanowisku z folią oraz na stanowisku bazowym,

w szczególności w betonicie, blisko źródła ciepła. Wpływ opadów atmosferycznych w krótkim okresie najbardziej oddziałuje na płytsze partie ziemi rodzimej, co szczególności można zaobserwować po odczycie sondy G3F na rys. 55. Dodatkowo, duże opady atmosferyczne, trwające ponad tydzień na początku września 2021 bardzo mocno wpłynęły na przebieg dynamiki nasycania się ziemi wodą, co nastąpiło tuż przed okresem zimowym, ogólnie charakteryzującym się dużą wilgotnością. W szczególności interesujący jest przebieg funkcji wilgotności w czasie z sond G1 i D1 (fioletowa linia na rys. 54, wzrost wilgotności od grudnia 2021) na stanowisku bazowym. Według danych z pomiarów, od początku zimy obserwuje się wzrost wilgotności w punktach pomiarowych w nieosłoniętym folią betonicie. Dla porównania, proces nasycania ziemi wodą dla punktów pomiarowych G3F i B2F rozpoczął się jeszcze wcześniej, co można zauważyć na rysunku 53 (zmiana przebiegu zielonej linii i żółtej linii w połowie listopada). Na rysunku 62 zaobserwować można, że nie intensywność opadów, a długość ich trwania wpływa najbardziej na zmianę wilgotności na większej głębokości (wrzesień, listopad 2021).

W rysunkach 52-59 zastosowano oznaczenie symboli:

G1 – sonda górna (w odl. 7,5 cm) w układzie bez folii,

G2 – sonda górna (w odl. 15 cm) w układzie bez folii,

G3 – sonda górna (w odl. 30 cm) w układzie bez folii,

B1 - sonda na wysokości kabla (w odl. 7,5 cm) w układzie bez folii,

B2 - sonda na wysokości kabla (w odl. 15 cm) w układzie bez folii,

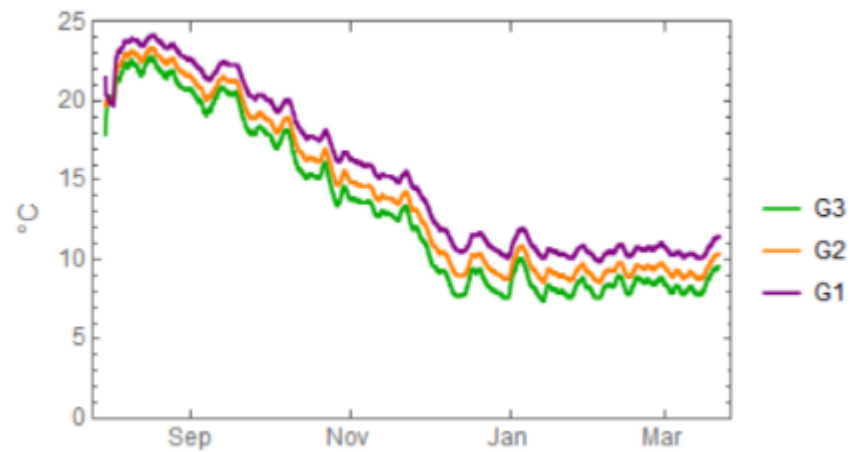
B3 - sonda na wysokości kabla (w odl. 30 cm) w układzie bez folii,

D1 - sonda poniżej kabla (w odl. 7,5 cm) w układzie bez folii,

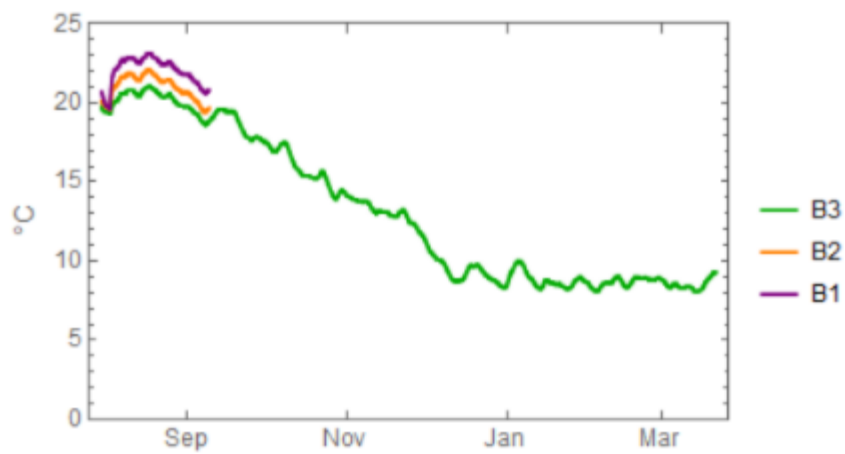
D2 - sonda poniżej kabla (w odl. 15 cm) w układzie bez folii,

D3 - sonda poniżej kabla (w odl. 30 cm) w układzie bez folii.

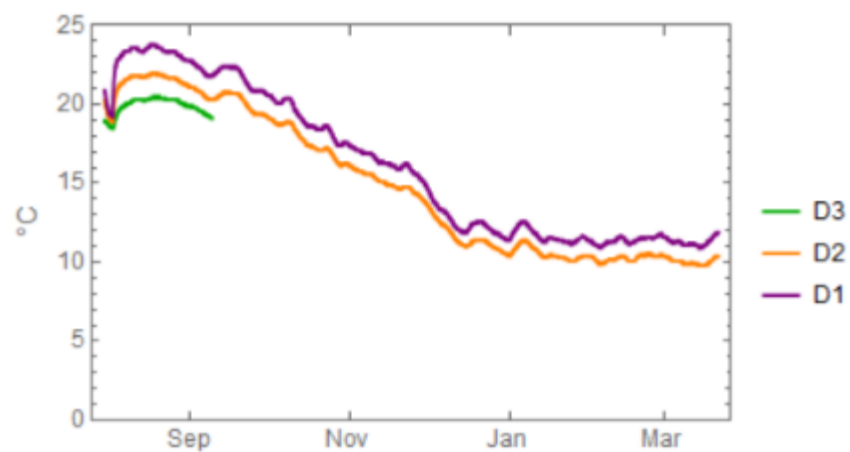
a)



b)

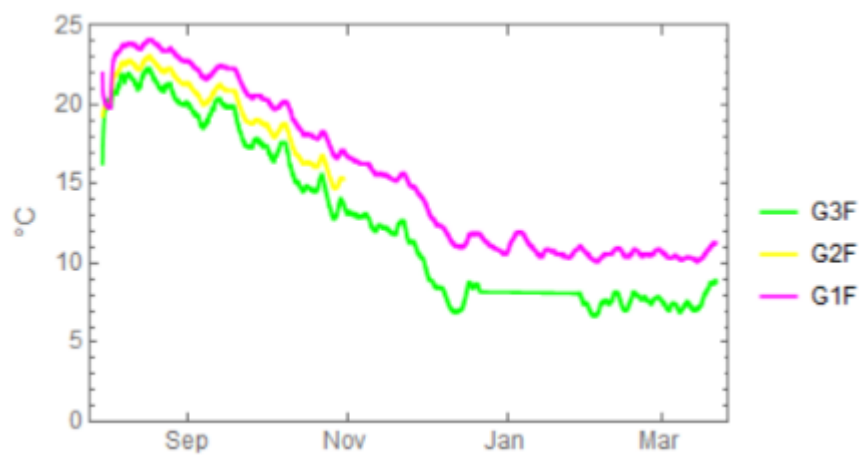


c)

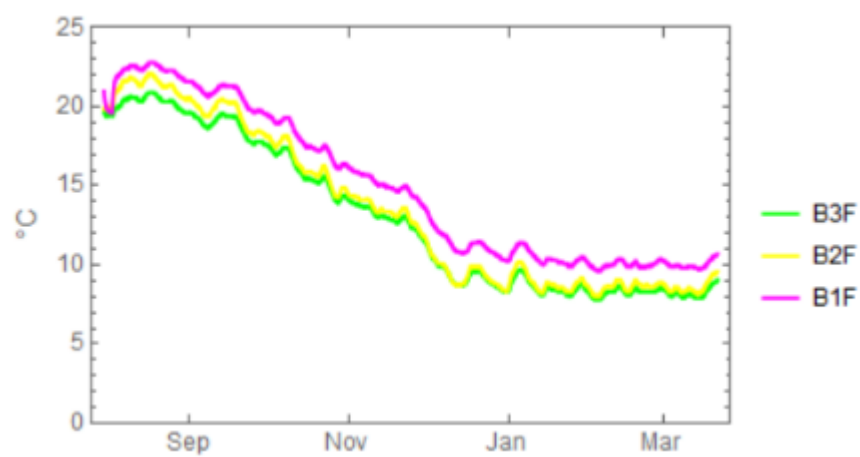


Rysunek 52. Przebieg temperatury w czasie (sierpień 2021 – marzec 2022) wokół badanej linii kablowej na stanowisku bazowym (bez folii). Odczyty z sond: a) G1, G2, G3, b) B1, B2, B3, c) D1, D2, D3

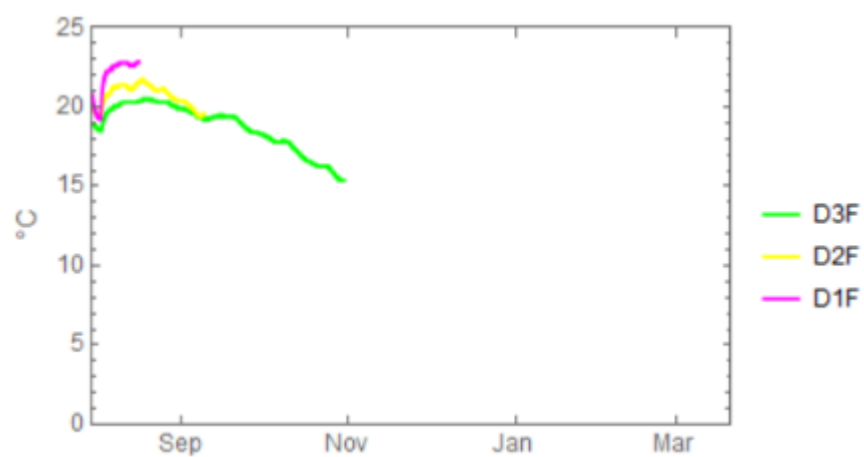
a)



b)

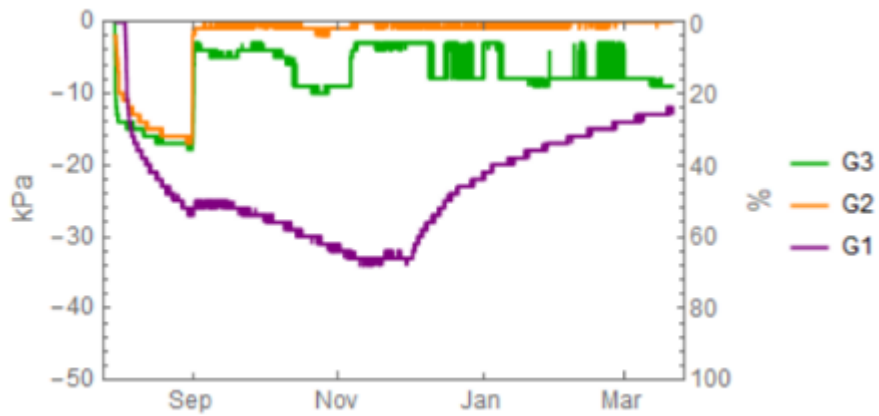


c)



Rysunek 53. Przebieg temperatury w czasie (sierpień 2021 – marzec 2022) wokół badanej linii kablowej na stanowisku owiniętym folią paroizolacyjną. Odczyty z sond: a) G1F, G2F, G3F, b) B1F, B2F, B3F, c) D1F, D2F, D3F

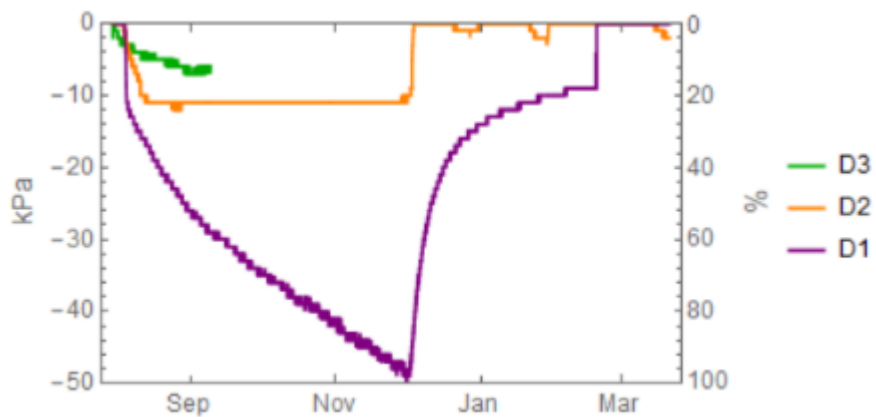
a)



b)

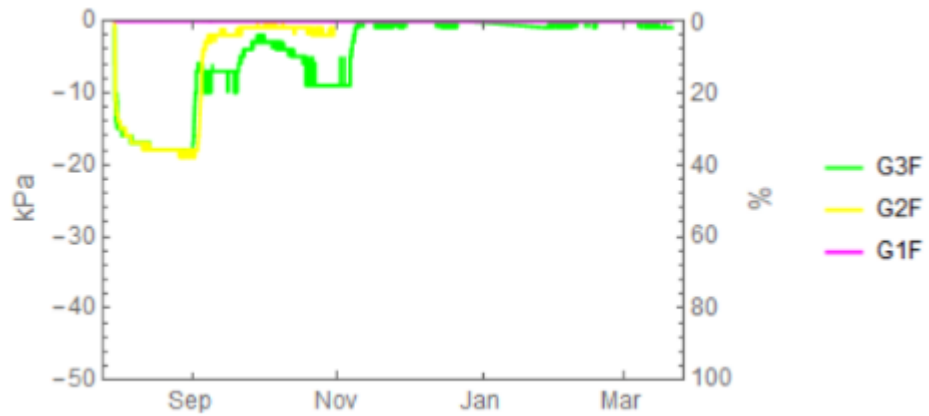


c)

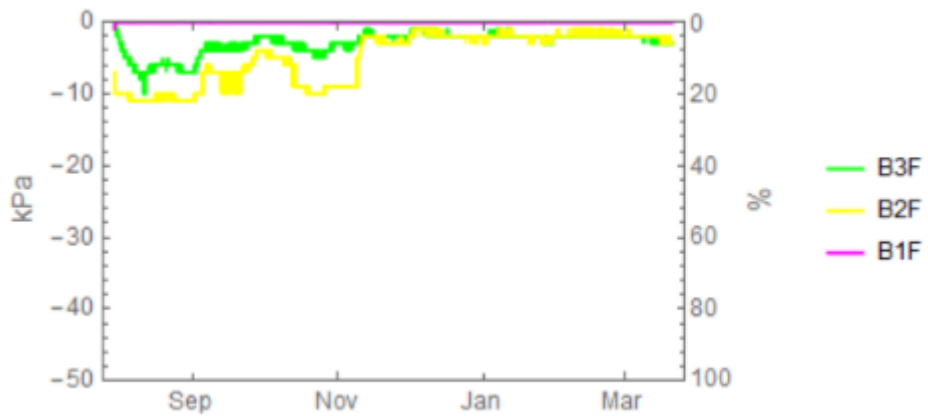


Rysunek 54. Stopień nawodnienia w czasie (sierpień 2021 – marzec 2022) wokół badanej linii kablowej na stanowisku bazowym, oś po prawej wskazuje różnicę względną wilgotności pomiędzy najwyższą i najniższą zarejestrowaną wilgotnością (bez folii). Odczyty z sond: a) G1, G2, G3, b) B1, B2, B3, c) D1, D2, D3

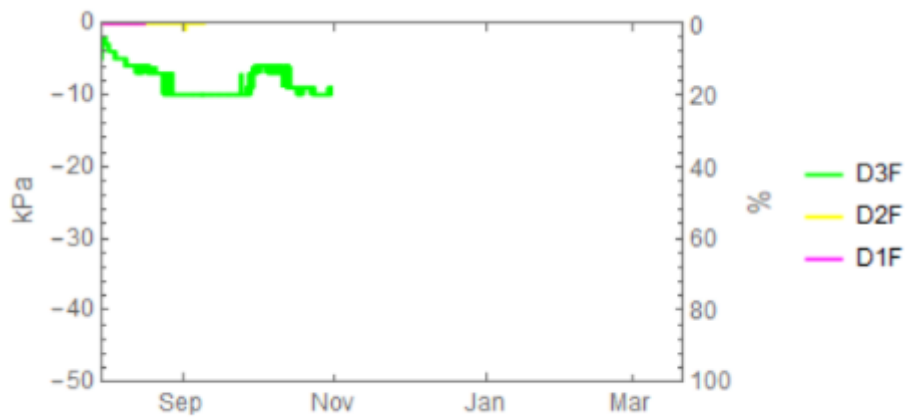
a)



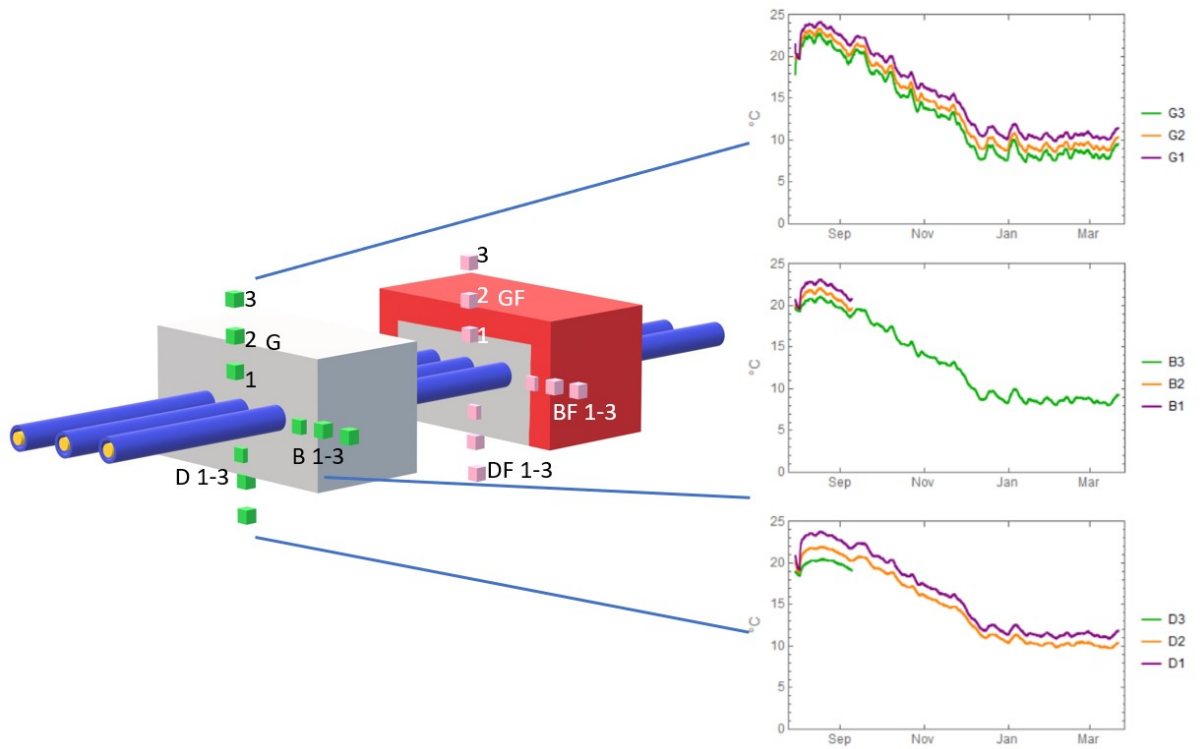
b)



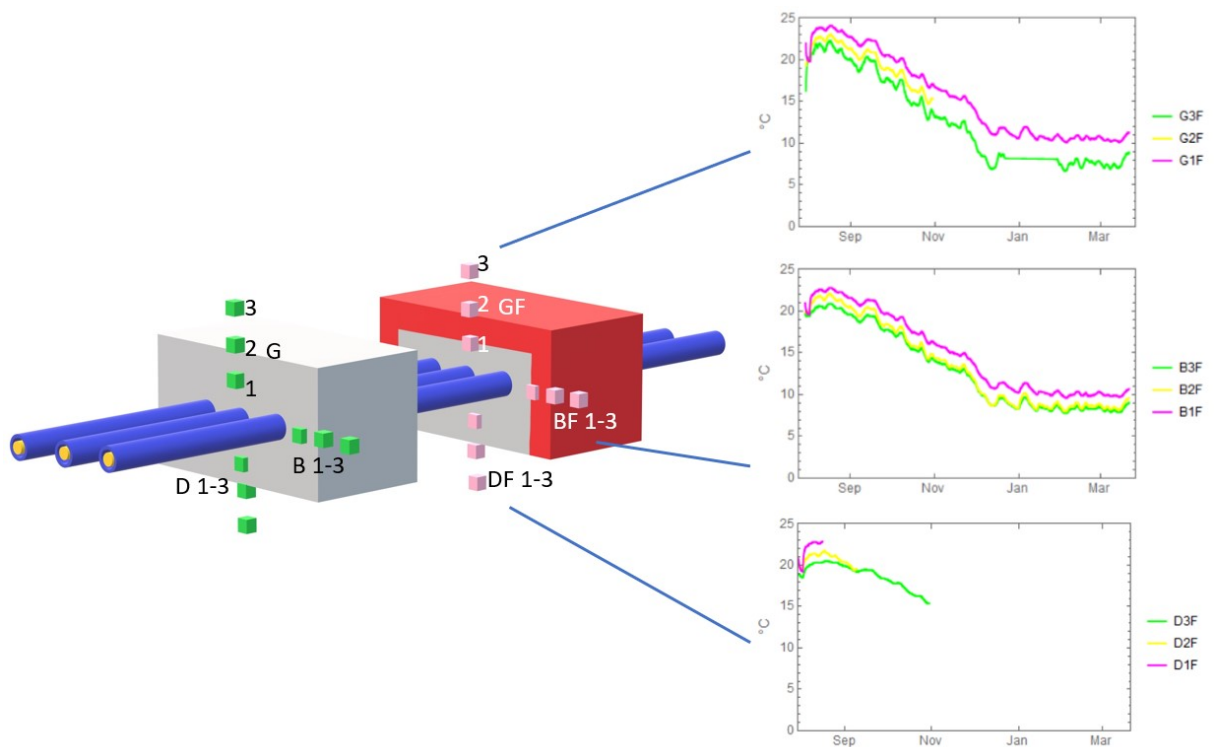
c)



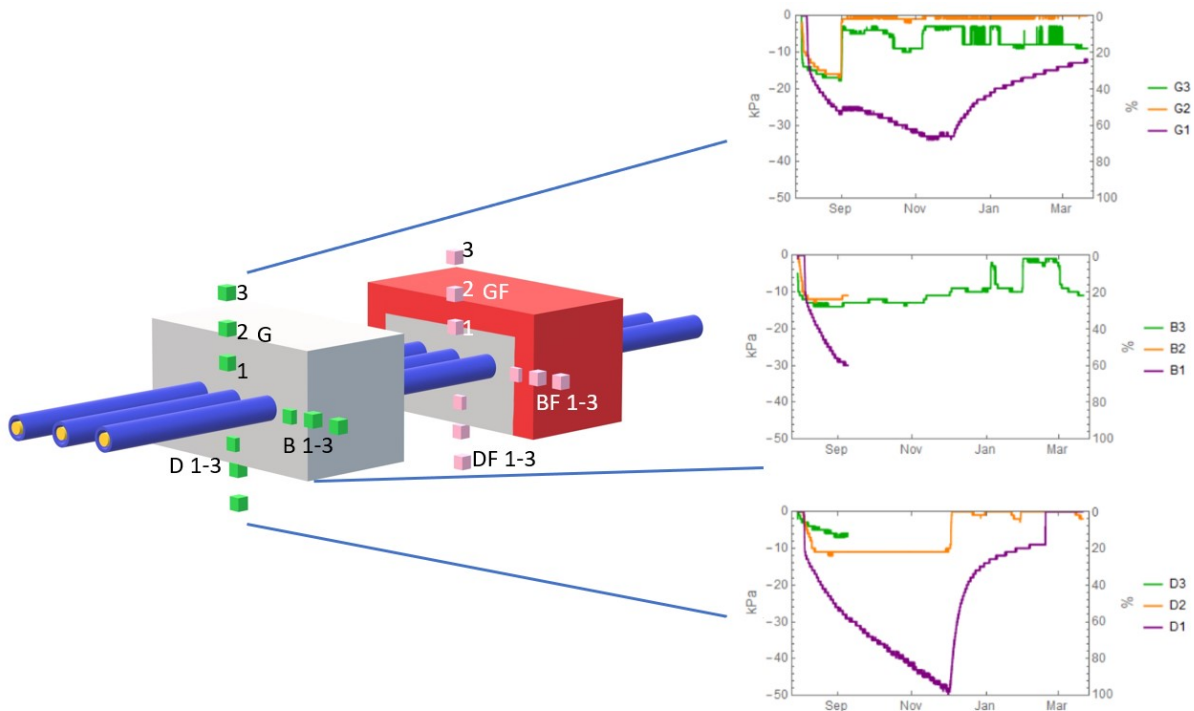
Rysunek 55. Stopień nawodnienia w czasie (sierpień 2021 – marzec 2022) wokół badanej linii kablowej na stanowisku owiniętym folią, oś po prawej wskazuje różnicę względną wilgotności pomiędzy najwyższą i najniższą zarejestrowaną wilgotnością na stanowisku owiniętym folią paroizolacyjną. Odczyty z sond: a) G1F, G2F, G3F, b) B1F, B2F, B3F, c) D1F, D2F, D3F



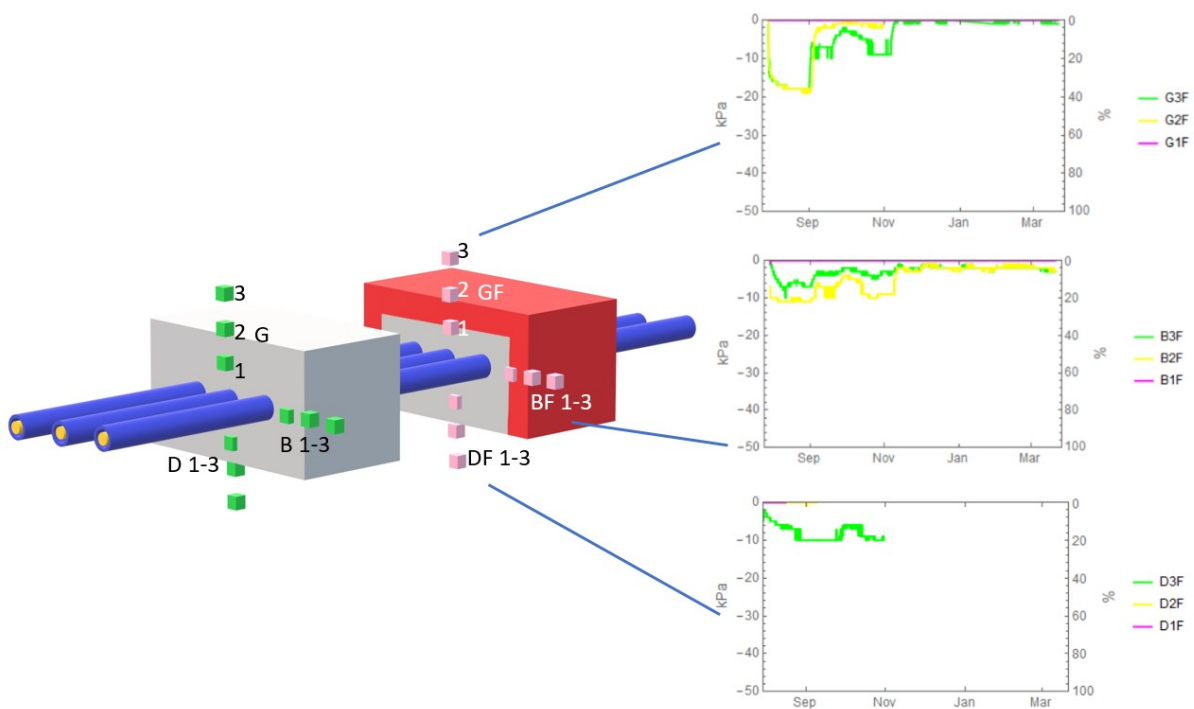
Rysunek 56. Wyniki pomiaru temperatury wokół stanowiska bazowego (bez folii) zagregowane na uproszczonej prezentacji stanowiska pomiarowego



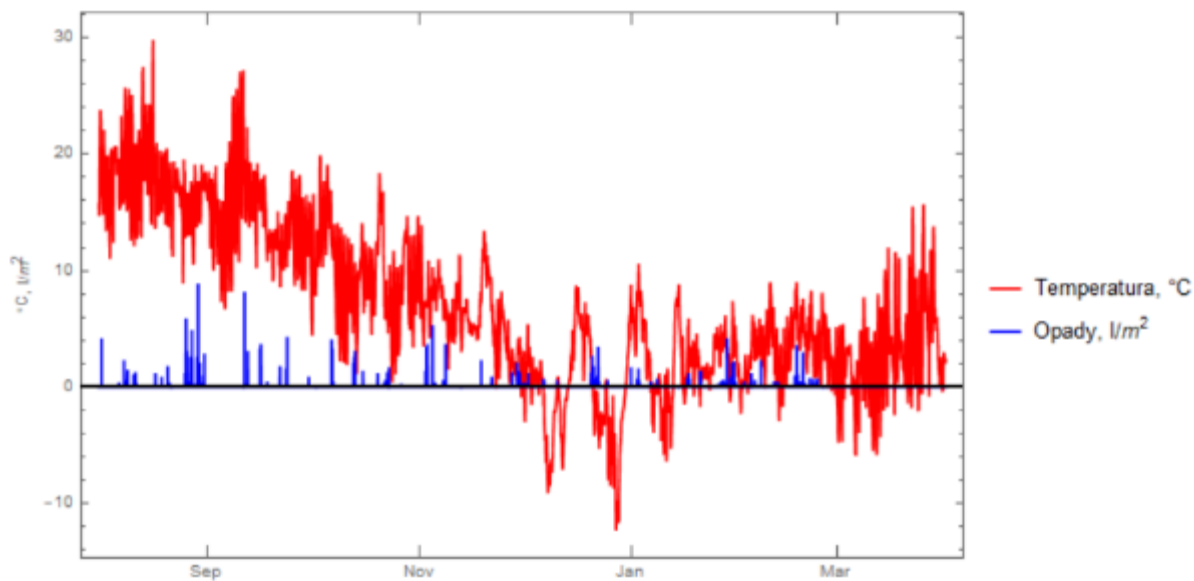
Rysunek 57. Wyniki pomiaru temperatury wokół stanowiska z folią paroizolacyjną zagregowane na uproszczonej prezentacji stanowiska pomiarowego



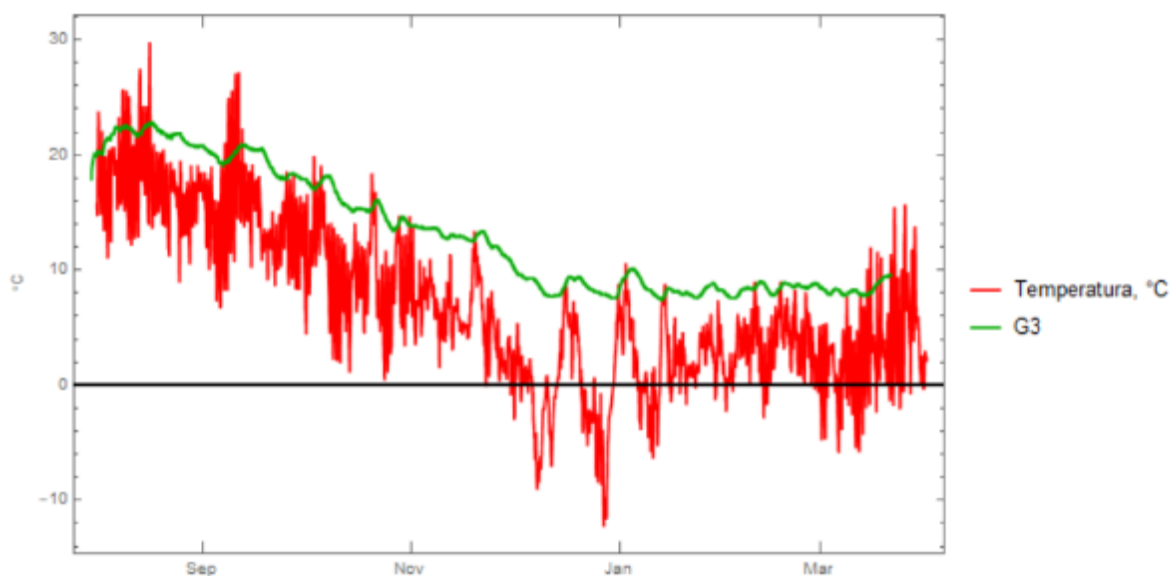
Rysunek 58. Wyniki pomiaru stopnia nawodnienia wokół stanowiska bazowego (bez folii) zagregowane na uproszczonej prezentacji stanowiska pomiarowego



Rysunek 59. Wyniki pomiaru stopnia nawodnienia wokół stanowiska z folią paroizolacyjną zagregowane na uproszczonej prezentacji stanowiska pomiarowego

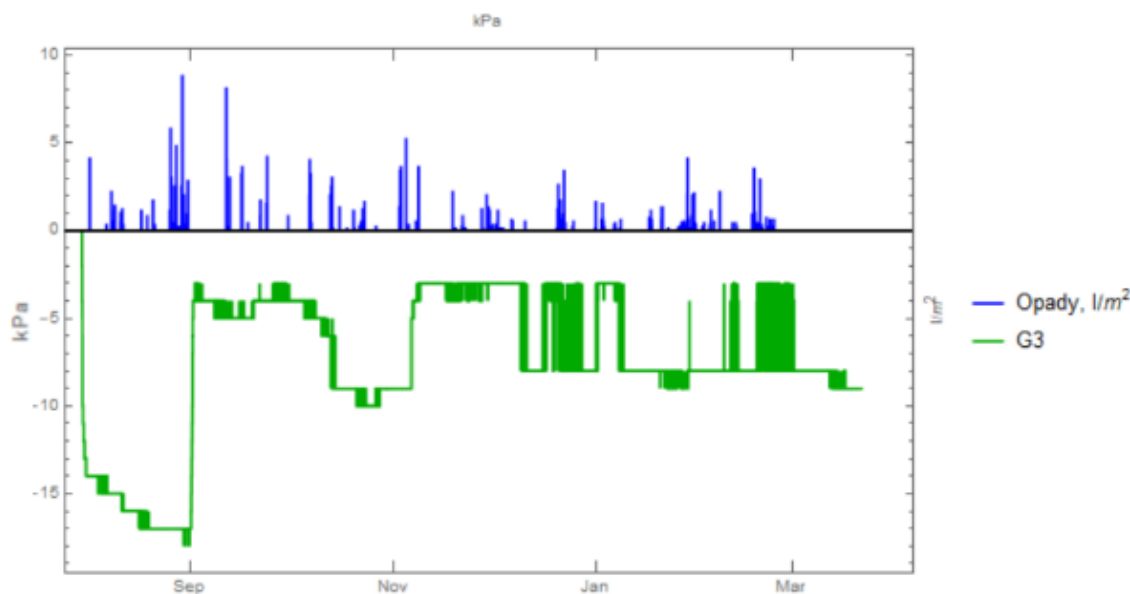


Rysunek 60. Opady atmosferyczne i temperatura powietrza zarejestrowana w okresie sierpień 2021 – marzec 2022 w stacji pogodowej Gdańsk-Świbno⁴



Rysunek 61. Zestawienie danych temperatury powietrza ze stacji pogodowej Gdańsk-Świbno z pomiarem temperatury na stanowisku pomiarowym w punkcie G3; okres: sierpień 2021 – marzec 2022

⁴ Źródłem pochodzenia danych jest Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy [89] i zostały udostępnione na podstawie regulaminu udostępniania danych. Dane Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego. Dane zostały przetworzone



Rysunek 62. Zestawienie danych opadów atmosferycznych w stacji pogodowej Gdańsk-Świbno z pomiarem wilgotności ziemi rodzimej na stanowisku pomiarowym w punkcie G3; okres: sierpień 2021 – marzec 2022

W niniejszym rozdziale przeanalizowano:

- wpływ ciepła oddawanego z linii kablowej na dystrybucję temperatury wokół linii kablowej,
- wpływ ciepła oddawanego z linii kablowej na dystrybucję wilgotności wokół linii kablowej,
- warunków atmosferycznych: opadów i temperatury powietrza, na zmianę wilgotności i temperatury wypełnienia kontrolowanego i ziemi wokół linii kablowej,
- wpływ zastosowania otuliny paroizolacyjnej wokół betonitu na wilgotność wewnątrz.

Najistotniejszą częścią doświadczenia jest ostatni z powyższych punktów i odpowiedzenie na pytanie, czy w praktyce takie rozwiązanie (zatrzymanie wilgoci za pomocą bariery stałej – tu: folia paroizolacyjna) mogłoby mieć zastosowanie.

Z wyników pomiarów można wykazać, że wilgoć wewnątrz otuliny paroizolacyjnej nie zmieniła się przez cały okres pomiarów, dodatkowo zastosowanie jej korzystnie wpłynęło na utrzymanie wilgotności za wypełnieniem kontrolowanym (w porównaniu do pomiarów ze stanowiska bazowego). Zastosowanie w procesie budowy linii kablowej folii lub innego materiału jest więc w praktyce zagadnieniem wartym rozważenia. Wykonując poprawnie



„zamknięcie” przestrzeni wokół kabli (szczelnie i bez kieszeni powietrza) można uzyskać wypełnienie kontrolowane o gwarantowanej niskiej i stałej rezystywności cieplnej.

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W wyniku pomiarów rezystywności cieplnej ziemi rodzimej i wypełnień kontrolowanych wykazano, że przyjmowane minimalne wartości, podane przez krajowe normy korespondują z wartościami uzyskanymi w wyniku eksperymentów. Na podstawie pomiarów betonitu wykazano, że dla skrajnie małych wartości wilgotności betonitu, rezystywność utrzymuje stałą wartość w miarę wzrostu temperatury oraz że maleje ona przy obecności wilgoci w wyższej temperaturze, dając większy margines obciążalności przy obliczeniach projektowych.

Przedstawiono autorską metodę zwiększania obciążalności linii kablowej przez kształtowanie pola przekroju poprzecznego betonitu. Metoda ta uwzględnia aspekty ekonomiczne, bardzo istotne z praktycznego punktu widzenia.

Dla kabli ułożonych w przepustach rurowych wykazano, że można zwiększyć obciążalność przez zwiększenie średnicy rury przepustowej. Tym samym wykazano brak konieczności wypełnienia przepustu dodatkowym medium przy zachowaniu tej samej obciążalności – jest to łatwiejsze przy wykonywaniu robót budowlanych i serwisowych, a co za tym idzie, ogranicza koszty. Przedstawiono wpływ poszczególnych mechanizmów transportu ciepła w wymianie ciepła i porównano uproszczoną metodę proponowaną przez IEC do własnych rezultatów analitycznych.

Przedstawiono rezultaty przeprowadzonego eksperymentu pomiarów temperatury i wilgotności wokół modelu obciążonej linii kablowej ułożonej w dwóch konfiguracjach wypełnienia kontrolowanego:

1. bez zabezpieczenia przed migracją wilgoci,
2. z folią paroizolacyjną zabezpieczającą otoczenie modeli linii kablowej przed migracją wilgoci.

Wyniki badań wykazały pozytywny wpływ zabezpieczenia (folii) na utrzymanie wilgoci w wypełnieniu kontrolowanym wokół kabli.

Podsumowując, do najważniejszych osiągnięć autora rozprawy należy:

- eksperymentalne wykazanie zależności rezystywności cieplnej betonitu od temperatury i wilgotności,

- zaproponowanie nowych sposobów zwiększania obciążalności linii kablowych,
- przedstawienie ulepszony⁵ algorytmu poszukującego optymalnej konfiguracji ułożenia linii kablowej w wypełnieniu kontrolowanym dla zadanej obciążalności prądowej, z uwzględnieniem kosztów inwestycji.

Teza niniejszej pracy została udowodniona. Przedstawiono techniki budowy linii kablowych zwiększające obciążalność prądową długotrwałą, które można stosować dla długich (rozdz. 5.2), jak i dla krótkich linii kablowych (rozdz. 6-8). Przedstawiono bezpośrednią zależność nakładów inwestycyjnych na spodziewany przyrost obciążalności linii kablowych przy układaniu linii w wypełnieniu kontrolowanym oraz przedstawiono metody zwiększania obciążalności dla odcinków w przepuście rurowym, które ograniczają koszty prac inwestycyjnych i materiałów. Wyniki badań autora rozprawy mogą być wykorzystane w praktyce przy projektowaniu elektroenergetycznych linii kablowych, w szczególności, gdy w danej linii należy ustabilizować warunki oddawania ciepła do otoczenia.

Dalsze prace związane z analizą obciążalności prądowej długotrwałej linii kablowych będą związane z:

- ustaleniem minimalnej rzeczywistej wilgotności ziemi wokół kabla obciążonego długotrwałe oraz w przypadku zmieniającego się obciążenia;
- opracowaniem algorytmu optymalizujący koszty linii kablowych, w szczególności pod kątem kosztów budowy linii kablowych w przeciskach rurowych, wykorzystując wykazaną zależność z rozdziału 5;
- opracowaniem propozycji standaryzacji pomiarów rezystywności cieplnej otoczenia linii kablowej;
- pomiarami oraz przeglądem literaturowym rezystywności cieplnej najczęściej stosowanych wypełnień kontrolowanych i najczęściej występujących typów ziem rodzimych i przedstawieniem wyników dla odpowiednich organów normalizacyjnych.

⁵ W stosunku do propozycji [15,16,35]



BIBLIOGRAFIA

- [1] Musiał E.: Obciążalność cieplna oraz zabezpieczenia nadprądowe przewodów i kabli, INPE 2008, nr 107, str. 3-41.
- [2] "TELE-FONIKA Kable S.A. Kable elektroenergetyczne wysokich i ekstra wysokich napięć, 2022".
- [3] "CYMCAP – software for power cable ampacity rating" [oprogramowanie komputerowe], <https://cyme.com/software/cymcap/>.
- [4] G.J. Anders, M.A. El-Kady, "Transient ratings of buried power cables. I. Historical perspective and mathematical model", *IEEE transactions on power delivery*, 1992.
- [5] C. Holyk, G.J. Anders, "Power cable rating calculations - A historical perspective", *IEEE Industry Applications Magazine*, 2015.
- [6] A. E. Kennelly, "On the carrying capacity of electric cables, submerged, buried or suspended in air," *Proc. Minutes 9th Annu. Meeting Association Edison Illuminating Companies*, pp. 79–92, 1893.
- [7] R. W. Atkinson, H. Fisher, "Current rating of electric cables," *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng.*, vol. 33, no. 1, pp. 325–331, 1913.
- [8] W. J. Jenks, "Electricity as a Fire Hazard", NY: General Electric, Schenectady, 1894.
- [9] S. Melsom, H. Booth, "Summary of the theoretical and experimental work already published on the heating of buried cables," *J. Inst. Elect. Eng.*, vol. 52, no. 236, pp. 780–788, 1914.
- [10] S. Whitehead, E. Hutchings, "Current rating of cables for transmission and distribution," *J. Inst. Elect. Eng.*, vol. 83, no. 502, pp. 517–557, 1938.
- [11] D. M. Simons, "Cable geometry and the calculation of current-carrying capacity," *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng.*, vol. XLII, pp. 600–620, 1923.
- [12] J. H. Neher, M. H. McGrath, "The calculation of thermal rise and load capability of cable systems," *Power Apparatus Syst., Part III. Trans. Amer. Inst. Elect. Engineers*, vol. 76, no. 3, pp. 752–764, 1957.
- [13] "IEC 60287-1-1:2006 Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General".
- [14] G. J. Anders, M. El-Kady, R. W. D. Ganton, D. Horrocks, J. Motlis, "Calculations of power cable load capability on a desktop computer: A review," *Proc. Inst. Elect. Eng.—Part C: Generation, Transmission Distribution*, vol. 133, no. 7, pp. 431–436, 1986.
- [15] G. J. Anders, M. A. El-Kady, D. J. Horrocks, A. Moshref, "Advanced programs for ampacity calculations of power cables" Canada: N. p., 1989. Web.
- [16] G. J. Anders, *Rating of Electric Power Cables Ampacity Computations for Transmission, Distribution, and Industrial Applications*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1997.
- [17] G. J. Anders, *Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment*; Wiley-IEEE Press: Hoboken, NJ, USA, 2010.
- [18] "Cableizer software" [oprogramowanie komputerowe], <https://www.cableizer.com>.
- [19] "ELEK™ Cable HV software" [oprogramowanie komputerowe, <https://elek.com.au>].
- [20] "Electric Cables—Calculations for Current Ratings—Finite Element Method, IEC TR 62095, 2003."
- [21] "Energetyka Dystrybucja Przesył 2021 – Raport PTPIREE, PTPIREE, Poznań, 2021"
- [22] J. Czarnkowski, "Najdłuższa linia kablowa WN 110 kV w Polsce", *Inżynieria Bezwykopowa*, 4/2015 [60], 2015.
- [23] F. De Leon, "Calculation of Underground Cable Ampacity"; *CYME Int. TD: St. Bruno*, QC, Canada, 2005.
- [24] S. Czapp, F. Ratkowski, "Effect of soil moisture on current-carrying capacity of low-voltage power cables", *Przegląd Elektrotechniczny*, iss. 6, s.154-159, 2019.
- [25] Matuszak, M., Szuchnik, K., Koftun, M., Ratkowski, F., & Bonczkowska, A., "Zastosowanie specjalnego uziemienia żył powrotnych w liniach kablowych SN", *Wiadomości Elektrotechniczne*, 32-36, 2019.
- [26] Ochoń, P., Taler, D., Cisek, P., Pilarczyk, M., "Fem-based thermal analysis of underground power cables located in backfills made of different materials." *Strength of Materials*, 47(5), 770-780, 2015.

- [27] S. Czapp, S. Szultka, F. Ratkowski, A. Tomaszewski, "Risk of power cables insulation failure due thermalthermal effect of solar radiation", *Eksploatacja Niezawodn. Maint. Reliab.*, 22, s. 232–240, 2020.
- [28] D. Enescu, P. Colella, A. Russo, "Thermal Assessment of Power Cables and Impacts on Cable Current Rating: An Overview", *Energies*, 13, 5319, 2020.
- [29] H. Brakelmann, G. J. Anders, S. Cherukupalli, "Mitigation of a Hot Spot Along a Cable Circuit Using a Novel Cooling Solution," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 2, pp. 592-599, 2020.
- [30] "IEEE Task Force on Soil Thermal Resistivity: Compaction of Cable Trench Backfill (1966), IEEEPEP Winter Meeting, Conference paper 31 CP 66-75."
- [31] "IEEE 442-1 991, Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements, 2003".
- [32] L.H. Fink, "Control of the Thermal Environment of Buried Cable Systems," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 73, pp. 406-412, 1954.
- [33] L.H. Fink, J.J. Smerke, "Control of the Thermal Environment of Buried Cables Systems, Part 11," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 77, pp. 161-168, 1958.
- [34] K. E. Saleeby, W. Z. Black, J. G. Hartley, "Effective Thermal Resistivity for Power Cables Buried in Thermal Backfill," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2201-2214, 1979.
- [35] M. El-Kady, "Optimization of power cable and thermal backfill configurations". *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, 12, 4681–4688, 1982.
- [36] "COSiW SEP, N SEP-E-004, Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe. Projektowanie i budowa, Warszawa, aktualizacja 2020"
- [37] "ASTM D5334-08, Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure, 2014"
- [38] J. Jakubowski, A. Cichy, A. Rakowska, Wytyczne Projektowania Linii Kablowych, PTPIREE, Poznań 2019
- [39] S. Dubitsky, G. Greshnyakov, N. Korovkin, "Comparison of finite element analysis to IEC-60287 for predicting underground cable ampacity," 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), pp. 1-6, 2016.
- [40] F. de Leon, G. J. Anders, "Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed with the Finite Element Method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 537-543, 2008.
- [41] F. Aras, C. Oysu, G. Yilmaz, "An assessment of the methods for calculating ampacity of underground power cables", *Electric Power Components and Systems*, 33(12), 1385-1402, 2005.
- [42] S.S.M. Ghoneim, M. Ahmed, N.A. Sabiha, "Transient Thermal Performance of Power Cable Ascertained Using Finite Element Analysis", *Processes*, 9, 438, 2021.
- [43] P. Ocioń, "The effect of soil thermal conductivity and cable ampacity on the thermal performance and material costs of underground transmission line", *Energy*, 231, 120803, 2021.
- [44] P. Ocioń, P. Cisek, M. Matysiak, "Analysis of an application possibility of geopolymer materials as thermal backfill for underground power cable system", *Clean Techn Environ Policy*, 23, 869–878, 2021.
- [45] P. Ocioń, M. Rerak, R. V. Rao, P. Cisek, A. Vallati, D. Jakubek, B. Rozegnał, "Multiobjective optimization of underground power cable systems." *Energy*, 215, 119089, 2021.
- [46] M. Rerak, P. Ocioń, "Thermal analysis of underground power cable system", *Journal of Thermal Science*, 26(5), 465–471, 2017.
- [47] O. E., Gouda, A. Z. El Dein, "Improving underground power distribution capacity using artificial backfill materials", *IET Gen. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 15, pp. 2180-2187, 2015.
- [48] R.S. Olsen, "Dynamic loadability of cable based transmission grids", Rozprawa doktorska, Technical University of Denmark, 2013.
- [49] P. Cisek, P. Ocioń, M. Pilarczyk, "The performance analysis of a new thermal backfill material for underground power cable system", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 108, 233-250, 2016.
- [50] P. Ocioń, "Renewable Energy Utilization Using Underground Energy Systems" *Lecture Notes in Energy*, 2021.

- [51] A. N. Arman, D. M. Cherry, L. Gosland, P.M. Hollingsworth, "Influence of soil-moisture migration on power rating of cables in H.V. transmission systems", *Proc. IEEE*, vol. 111, pp. 1000-1016, 1964.
- [52] O. E. Gouda, A. Z. El Dein, G. M. Amer, "Effect of the Formation of the Dry Zone Around Underground Power Cables on Their Ratings," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 972-978, 2011.
- [53] H. Lu, F. De Leon, D. Soni, W. Wang, "Two-Zone Geological Soil Moisture Migration Model for Cable Thermal Rating", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1–1, 2018.
- [54] P. Ochoń, P. Cisek, M. Pilarczyk, D. Taler, "Numerical simulation of heat dissipation processes in underground power cable system situated in thermal backfill and buried in a multilayered soil", *Energy Convers. Manage*, vol. 95, pp. 352–370, 2015.
- [55] J. Pilgrim, D. Swaffield, P. Lewin, S. Swingler, F. Waite, D. Payne, "Impact of moisture migration on the current rating of high operating temperature power cables", 8th International Conference on Insulated Power Cables, Versailles, France. 18 - 22, pp. 222-227, 2011.
- [56] "International Council on Large Electric Systems CIGRE. Long Term Performance of Soil and Backfill Systems; CIGRE: Paris, France, 2017".
- [57] S. Czapp, F. Ratkowski, "Optimization of thermal backfill configurations for desired high-voltage power cables ampacity", *Energies*, 14, No. 5, 1452, 2021.
- [58] L. Ramirez, G. J. Anders, "Cables in Backfills and Duct Banks – Neher/McGrath Revisited," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 4, pp. 1974-1981, 2021.
- [59] O.T. Farouki, Thermal properties of soils. Series Rock Soil Mech., 11, 1–136, 1986.
- [60] S. Czapp, S. Szultka, A. Dzionk, K. Borowski, "Wpływ warunków otoczenia na obciążalność prądową długotrwałą kabli elektroenergetycznych", *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, (51), 31-34, 2016.
- [61] D. Enescu, P. Colella, A. Russo, "Thermal Assessment of Power Cables and Impacts on Cable Current Rating: An Overview", *Energies*, 13, 5319, 2020.
- [62] A.E. Kennelly, "Heating Conductors by Electric Currents" Association Edison Illum: Niagara Falls, NY, USA, pp. 11–32, 1889.
- [63] Tauron Dystrybucja S.A., Standard techniczny nr 30/2018 dla warunków budowy elektroenergetycznych linii kablowych WN wraz z kablami i osprzętem na terenie TD S.A. (wersja druga), Kraków, 2021.
- [64] PGE Dystrybucja S.A., Wytyczne do budowy systemów elektroenergetycznych w PGE Dystrybucja S.A. Tom 1A. Linie kablowe 110 kV., 2021.
- [65] Energa Operator SA, Standard techniczny projektowania i budowy linii napowietrznych i kablowych 110 kV, Wydanie pierwsze, 2019.
- [66] Enea Operator Sp. z o.o., Elektroenergetyczne linie napowietrzne i kablowe 110 kV. Standard w sieci dystrybucyjnej ENEA Operator Sp. z o.o., 2020.
- [67] "IEC 60287-3-1:2017 Electric cables – Calculation of the current rating – Part 3-1: Operating conditions – Site reference conditions, 2017."
- [68] O. E. Gouda, G. F. Osman, "On-line monitoring device for dry zone formation in the soil surrounding underground power cables", *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14.8, pp. 1483-1490, 2020.
- [69] "CIGRE WG B1.35 A Guide for Rating Calculations of Insulated Cables"
- [70] R. Bednarek, S. Skiba Geografia gleb Polski. W: Andrzej Mocek (red.): Gleboznawstwo. Wyd. I. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, s. 411-414, 2015.
- [71] "IEC Standard-Electric Cables – Calculation of the Current Rating – Part 2-1: Thermal Resistance – Calculation of the Thermal Resistance, IEC Standard 60287-2-1, 1994–12."
- [72] F. Ratkowski, M. Kołtun, S. Czapp, "The effect of cable duct diameter on the ampacity of high-voltage power cables", *Przeгляд Elektrotechniczny*, Vol. 98, iss. 3, 141-144, 2022.
- [73] Wołkowiński K., Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych, WNT, Warszawa 1967
- [74] Szymański, A., Mechanika gruntów, Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2007

- [75] W. Hoppel, R. Marciniak, Uziemienia w sieciach elektroenergetycznych, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 2020.
- [76] O.E. Gouda, A.Z. El Dein, G.M. Amer, "Effect of the formation of the dry zone around underground power cables on their ratings", *IEEE Trans. Power Deliv.*, 26, 972–978, 2010.
- [77] Y. Hiraiwa, T. Kasubuchi, "Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature (5 ± 75 °C)", *European Journal of Soil Science*, 51, 211-218, 2000.
- [78] "Hukseflux Thermal Sensors B.V., Broszura TNS02 (Opis systemu pomiarowego TNS02)".
- [79] S. Ahmad, Z. Rizvi, M. Arsalan Khan, J. Ahmad, F. Wuttke, "Experimental study of thermal performance of the backfill material around underground power cable under steady and cyclic thermal loading", *Materials Today: Proceedings*, 17, 85–95, 2019.
- [80] P. Ochoń, J. Pobędza, P. Walczak, P. Cisek, A. Vallati, "Experimental Validation of a Heat Transfer Model in Underground Power Cable Systems", *Energies* 13, 1747, 2020.
- [81] T. B. Sletten, "Cooling of Buried Power Cables by Using Metallic Pipes as an Alternative to Polymeric Pipes-Comparison of Results from Experiments and Simulations", Praca magisterska, NTNU, 2016.
- [82] L. Lindström, "Evaluating impact on ampacity according to IEC-60287 regarding thermally unfavourable placement of power cables", Praca Magisterska, Royal Institute of Technology, 2011.
- [83] D. Klimenta, et al. "Controlling the thermal environment of underground cable lines using the pavement surface radiation properties." *IET Generation, Transmission & Distribution* 12.12, 2968-2976, 2018.
- [84] G. J. Anders, H. S. Radhakrishna, "Computation of temperature field and moisture content in the vicinity of current carrying underground power cables" *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, 135(1), 51, 1988.
- [85] C.C. Shock, W. Feng-Xin, "Soil water tension, a powerful measurement for productivity and stewardship." *HortScience*, 46.2, 178-185, 2011.
- [86] S. Szultka, "Analiza obciążalności prądowej długotrwałej przewodów elektroenergetycznych z wykorzystaniem zaawansowanych metod numerycznych", Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 2019.
- [87] "BN-78/9180-11. Gleby i utwory mineralne. Podział na frakcje i grupy granulometryczne. Norma branżowa. 1978."
- [88] C.J. Moorberg, D.A. Crouse, "Soils laboratory manual, k-state edition", New Prairie Press, 2017.
- [89] "Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy <https://danepubliczne.imgw.pl>"

SPIS TABEL

Tabela 1. Rezystywność cieplna ziemi przyjmowana do obliczeń w zależności od warunków atmosferycznych oraz dla warunków polskich [67]	29
Tabela 2. Właściwości fizyczne wybranych typów ziemi oraz wypełnienia kontrolowanego [56]	35
Tabela 3. Wartości stałych U , V i Y użytych w wyrażeniu (19), na podstawie [71]	38
Tabela 4. Parametry kabla elektroenergetycznego oraz pozostałe parametry ułożenia linii kablowej	42
Tabela 5. Wyniki obliczeń obciążalności linii kablowej ułożonej w przepustach rurowych o średnicy 160 - 500 mm wypełnionych powietrzem, wodą lub bentonitem	45
Tabela 6. Wyniki obciążalności prądowej długotrwałej układu z rysunków 22 i 23	50
Tabela 7. Parametry techniczne kabli XRUKXS 110 kV, na podstawie [2]	61
Tabela 8. Koszty elementów i prac związanych z budową linii kablowej (źródło: ELTEL Networks Energetyka SA, stan na 12.2019 r.)	64

SPIS RYSUNKÓW

Rysunek 1. Kabel (F)2XS(FL)2Y 1x1000RMC/95 mm 110 kV, izolacja XLPE [3].....	11
Rysunek 2. Różnica obciążalności wynikająca z różnych metod obliczania zmiennej T_4 (zmienną tę opisano w rozdziale 3.3) dla układów o różnych wymiarach wypełnienia kontrolowanego. Przebiegi krzywych: czerwonej (wypełnienie kontrolowane o małym przekroju, rys. 3), niebieskiej (średni przekrój), żółtej (duży przekrój) i szarej (kable bezpośrednio ułożone w ziemi) wskazują różnicę w wyliczonej obciążalności metodą IEC względem obliczeń metodą FEM. Odtworzenie obliczeń z [40].	17
Rysunek 3. Ułożenie linii kablowych w wypełnieniach kontrolowanych o różnym przekroju - rysunek poglądowy. Na podstawie [40].....	17
Rysunek 4. Graficzna reprezentacja modelu migracji wilgoci wokół linii kablowej. Kontur 50 °C wskazuje granicę pomiędzy ośrodkami: suchym i mokrym. Wewnątrz strefy suchej temperatura przekracza 50 °C, która jest uznana jako graniczną dla powstania strefy suchej.....	19
Rysunek 5. Przedstawienie metody obrazów z hipotezą Kennelly'ego.....	25
Rysunek 6. Schemat drabinkowy dla układu kabli elektroenergetycznych. Wyjaśnienie symboli w tekście.....	28
Rysunek 7. Model ziemi: a) pomiędzy ziarnami występują puste przestrzenie, b) w pustych przestrzeniach pomiędzy ziarnami znajduje się woda.....	31
Rysunek 8. Proces układania linii kablowej w wykopie. Na otulinę, będącą mieszaniną piasku i cementu układane są kable w układzie płaskim. Kabel po lewej jest przeciągany na rolkach, które mają za zadanie spowodować uniknięcie ciągnięcia kabla po podłożu. Rysunek pochodzi z firmy Eltel Networks Energetyka SA.....	32
Rysunek 9. Proces układania linii kablowej. Kable zasypuje się wypełnieniem kontrolowanym, tu – mieszaniną piasku i cementu. Pomiędzy kablami z prawej strony widać ułożony kabel ECC o mniejszym przekroju (ang. <i>Earth Continuity Conductor</i>). Rysunek pochodzi z firmy Eltel Networks Energetyka SA.....	33
Rysunek 10. Struktura ułożenia kabli WN w układzie trójkątnym, Energa [65]. Na rysunku widać pojedynczą płytę chodnikową ułożoną na betonicie.....	33
Rysunek 11. Struktura ułożenia kabli WN w układzie trójkątnym, PGE [64]. Na rysunku widać płyty chodnikowe boczne, w odróżnieniu do rys. 10. Różni się też miejsce ułożenia kabla ECC i przesianie ziemi rodzimej nad betonitem.....	34
Rysunek 12. Poglądowy schemat wymiany ciepła w przepuście kablowym.....	37
Rysunek 13. Graficzna reprezentacja przekształceń omawianych w tekście.....	39
Rysunek 14. Układ analizowanego systemu kabli elektroenergetycznych; kable w przepustach rurowych: ułożenie trójkątne, rezystywność cieplna gruntu rodzimego 1,0 (K·m)/W, temperatura otoczenia (gruntu rodzimego) 10 °C.....	41
Rysunek 15. Rezystancja cieplna w przepuście rurowym w funkcji średnicy zewnętrznej rury.....	43
Rysunek 16. Składowe transportu ciepła $W_{conv,s}$, W_{cond} , $W_{rad,s}$ - w oraz całkowite straty mocy W_t generowane w przepuście rurowym na jednostkę długości w funkcji średnicy zewnętrznej rury.....	43
Rysunek 17. Obciążalność linii kablowej z tab. [6] w funkcji średnicy zewnętrznej rury.....	44
Rysunek 18. Rezystywność cieplna wody (przy ciśnieniu atmosferycznym) w funkcji temperatury, [73].....	45
Rysunek 19. Rezystywność cieplna powietrza (przy ciśnieniu atmosferycznym) w funkcji temperatury, [73].....	46
Rysunek 20. Rezystywność cieplna piasku o frakcji 0-2 mm w funkcji wilgotności masowej (wyniki pomiarów własnych).....	47
Rysunek 21. Rezystywność cieplna gleby leśnej w funkcji wilgotności masowej (wyniki pomiarów własnych).....	47

Rysunek 22. Rozkład temperatury wokół kabla YKY 1x240 mm ² (głębokość ułożenia 0,7 m, temperatura ziemi 20 °C, temperatura maksymalna kabla 70 °C) dla rezystywności ziemi a) $\rho_e = 2,5$ (K·m)/W, $I_{dd} = 507$ A, b) $\rho_e = 1,0$ (K·m)/W, $I_{dd} = 732$ A, c) $\rho_e = 0,5$ (K·m)/W, $I_{dd} = 916$ A.....	49
Rysunek 23. Rozkład temperatury wokół kabla YKY 1x240 mm ² (głębokość ułożenia 0,7 m, temperatura gleby 20 °C, temperatura maksymalna kabla 70 °C), biorąc pod uwagę wysuszenie ziemi wokół linii kablowej (rezystywność cieplna strefy 2,5 (K·m)/W). Wyniki dla rezystywności ziemi rodzimej a) $\rho_e = 1,0$ (K·m)/W, $I_{dd} = 614$ A, b) $\rho_e = 0,5$ (K·m)/W, $I_{dd} = 660$ A.....	50
Rysunek 24. Przewodność cieplna ziemi „Red Yellow” w funkcji wilgotności dla różnych temperatur próbek (5 - 75 °C). Punkty A., B. i C. wskazują ekstrema funkcji, opis w tekście. Odtworzenie wyników badania z [77]	53
Rysunek 25. Pole temperatury wokół obciążonej dwutorowej linii kablowej XRUHKXS 1x1000/170 110 kV	54
Rysunek 26. Stanowisko badawcze. Miernik rezystywności cieplnej Hukseflux CRU02 połączony z sondą TP07. Wewnątrz ciepłarki znajduje się próbka betonitu	55
Rysunek 27. Stanowisko badawcze. Do ciepłarki od prawej strony przez izolowaną termicznie śluzę wchodzi przewód sondy	56
Rysunek 28. Uproszczony schemat metody pomiaru próbki. Na rysunku wyszczególniono elementy: 1 – igła termiczna, 2 – miernik, 3 – wyświetlacz. Na podstawie [78]	56
Rysunek 29. Wyniki pomiarów rezystywności cieplnej próbek o stosunku piasku do cementu 14:1 i 20:1, o wilgotności 0% (atmosferycznej) w temperaturach 20 - 70 °C	58
Rysunek 30. Wyniki pomiarów rezystywności cieplnej próbek o stosunku piasku do cementu 14:1 i 20:1, o wilgotności 3% i 6,5% w temperaturach 20 - 70 °C.....	58
Rysunek 31. Zbiornicze wyniki pomiarów rezystywności cieplnej próbek o stosunku piasku do cementu 14:1 i 20:1, o wilgotności 6,5%, 3% i 0% (atmosferycznej) w temperaturach 20 - 70 °C z naniesionymi słupkami niepewności pomiarowej	59
Rysunek 32. Ułożenie linii kablowej w analizowanym układzie płaskim. Wyjaśnienie symboli w tekście	63
Rysunek 33. Obciążalność prądowa kabli WN (630 mm ² , 800 mm ² i 1000 mm ²) w konfiguracji płaskiej jako funkcja kosztów instalacji kabla oraz rezystywności cieplnej wypełnienia kontrolowanego i ziemi rodzimej: (a) $\rho_e = 1,0$ (K·m)/W; (b) $\rho_e = 1,5$ (K·m)/W; (c) $\rho_e = 2,0$ (K·m)/W; (d) $\rho_e = 2,5$ (K·m)/W. Na rys. 33d wyszczególniono punkty optymalnego przejścia na kabel o rząd wyższym polu przekroju żyły roboczej {1970 PLN, 970 A} i {2170 PLN, 1040 A}, dla rezystywności cieplnej wypełnienia kontrolowanego $\rho_c = 0,6$ (K·m)/W	70
Rysunek 34. Obciążalność prądowa kabli WN (630 mm ² , 800 mm ² i 1000 mm ²) w konfiguracji trójkąta równobocznego jako funkcja kosztów instalacji kabla oraz rezystywności cieplnej wypełnienia kontrolowanego i ziemi rodzimej: (a) $\rho_e = 1,0$ (K·m)/W; (b) $\rho_e = 1,5$ (K·m)/W; (c) $\rho_e = 2,0$ (K·m)/W; (d) $\rho_e = 2,5$ (K·m)/W. Na rys. 34d wyszczególniono punkty optymalnego przejścia na kabel o rząd wyższym polu przekroju żyły roboczej {1970 PLN, 910 A} i {2170 PLN, 970 A}, dla rezystywności cieplnej wypełnienia kontrolowanego $\rho_c = 0,6$ (K·m)/W	72
Rysunek 35. Obciążalność prądowa długotrwała w funkcji kosztu. Kable 630 mm ² ułożone w konfiguracji trójkąta równobocznego (trefoil). Punkty charakterystyczne: (1) $I = 706$ A (najmniejszy przekrój poprzeczny wypełnienia kontrolowanego); (2) $I = 851$ A; (3) $I = 926$ A (największa powierzchnia wypełnienia kontrolowanego). Rezystywność cieplna: $\rho_e = 2,5$ (K·m)/W, $\rho_c = 0,6$ (K·m)/W.....	75
Rysunek 36. Pogładowe ułożenie symulowanej linii kablowej ułożonej w betonice.....	79
Rysunek 37. Testy przewodu grzejnego i regulatora	79
Rysunek 38. Przygotowanie sond wilgotności zgodnie z instrukcją producenta.....	80



Rysunek 39. Widok rowu kablowego. Po bokach widać elementy istniejącej infrastruktury podziemnej. W centralnej części fotografii bariera do separacji stanowisk (odcinek bez z folii i odcinek z folią).....	81
Rysunek 40. Pomiar głębokości rowu kablowego	82
Rysunek 41. Zabezpieczenie stanowiska przed wpływem opadów atmosferycznych.....	83
Rysunek 42. Przygotowanie folii paroizolacyjnej wraz z miernikami.....	84
Rysunek 43. Proces wypełniania betonitem odcinka ułożonego w folii paroizolacyjnej.....	85
Rysunek 44. Ułożenie przewodu grzejnego symulującego linię kablową (źródło ciepła) na obu stanowiskach pomiarowych. Dno rowu wypełnione betonitem.....	86
Rysunek 45. Zakończenie umieszczania betonitu.....	87
Rysunek 46. Proces owijania betonitu w folię paroizolacyjną. Szczególną uwagę zwrócono, by nie powstały „kieszenie” z folii, w których mogłaby osiadać wilgoć	88
Rysunek 47. Zakończenie uszczelniania folii na stanowisku	89
Rysunek 48. Widok na stanowisko pomiarowe przed zasypaniem go ziemią rodzimą	90
Rysunek 49. Stanowisko pomiarowe po zasypaniu ziemią rodzimą.....	91
Rysunek 50. Przyłączenie przewodu grzejnego – zakończenie budowy stanowiska pomiarowego.....	91
Rysunek 51. Napięcie wody w glebie w funkcji wilgotności dla czterech typów gleb sklasyfikowanych wg BN-78/9180-11 [87]. Rysunek przetłumaczono z języka angielskiego na podstawie licencji CC BY 4.0 z [88]	93
Rysunek 52. Przebieg temperatury w czasie (sierpień 2021 – marzec 2022) wokół badanej linii kablowej na stanowisku bazowym (bez folii). Odczyty z sond: a) G1, G2, G3, b) B1, B2, B3, c) D1, D2, D3.....	96
Rysunek 53. Przebieg temperatury w czasie (sierpień 2021 – marzec 2022) wokół badanej linii kablowej na stanowisku owiniętym folią paroizolacyjną. Odczyty z sond: a) G1F, G2F, G3F, b) B1F, B2F, B3F, c) D1F, D2F, D3F	97
Rysunek 54. Stopień nawodnienia w czasie (sierpień 2021 – marzec 2022) wokół badanej linii kablowej na stanowisku bazowym, oś po prawej wskazuje różnicę względną wilgotności pomiędzy najwyższą i najniższą zarejestrowaną wilgotnością (bez folii). Odczyty z sond: a) G1, G2, G3, b) B1, B2, B3, c) D1, D2, D3	98
Rysunek 55. Stopień nawodnienia w czasie (sierpień 2021 – marzec 2022) wokół badanej linii kablowej na stanowisku owiniętym folią, oś po prawej wskazuje różnicę względną wilgotności pomiędzy najwyższą i najniższą zarejestrowaną wilgotnością na stanowisku owiniętym folią paroizolacyjną. Odczyty z sond: a) GF1, G2F, G3F, b) B1F, B2F, B3F, c) D1F, D2F, D3F	99
Rysunek 56. Wyniki pomiaru temperatury wokół stanowiska bazowego (bez folii) zagregowane na uproszczonej prezentacji stanowiska pomiarowego	100
Rysunek 57. Wyniki pomiaru temperatury wokół stanowiska z folią paroizolacyjną zagregowane na uproszczonej prezentacji stanowiska pomiarowego	100
Rysunek 58. Wyniki pomiaru stopnia nawodnienia wokół stanowiska bazowego (bez folii) zagregowane na uproszczonej prezentacji stanowiska pomiarowego.....	101
Rysunek 59. Wyniki pomiaru stopnia nawodnienia wokół stanowiska z folią paroizolacyjną zagregowane na uproszczonej prezentacji stanowiska pomiarowego.....	101
Rysunek 60. Opady atmosferyczne i temperatura powietrza zarejestrowana w okresie sierpień 2021 – marzec 2022 w stacji pogodowej Gdańsk-Świbno.....	102
Rysunek 61. Zestawienie danych temperatury powietrza ze stacji pogodowej Gdańsk-Świbno z pomiarem temperatury na stanowisku pomiarowym w punkcie G3; okres: sierpień 2021 – marzec 2022	102

Rysunek 62. Zestawienie danych opadów atmosferycznych w stacji pogodowej Gdańsk-Świbno z pomiarem wilgotności ziemi rodzimej na stanowisku pomiarowym w punkcie G3; okres: sierpień 2021 – marzec 2022103

SPIS ZAŁĄCZNIKÓW

Załącznik 1. Tabela Z1 Rozszerzone wartości (spoza przedziału $1/3 < y/x < 3$, $y = \max(h, w)$, $x = \min(h, w)$) współczynnika geometrycznego G_b , za [14]	117
---	-----

Załącznik 1,

Tabela Z1. Rozszerzone wartości (spoza przedziału $1/3 < y/x < 3$, $y = \max(h, w)$, $x = \min(h, w)$) współczynnika geometrycznego G_b , za [14]

L_G/h h/w	0,6	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0
0,05	0,08	0,32	0,39	0,59	0,77	0,93	1,08	1,21	1,4	1,45	1,56	1,77	1,96	2,14	2,31	2,47
0,1	0,10	0,36	0,65	0,94	1,18	1,39	1,57	1,72	1,87	2,00	2,13	2,37	2,57	2,76	2,94	3,12
0,2	0,14	0,45	1,00	1,37	1,68	1,93	2,12	2,24	2,39	5,53	2,66	2,90	3,12	3,31	3,51	3,69
0,3	0,18	0,56	1,26	1,68	2,02	2,29	2,48	2,60	2,75	2,89	3,02	3,27	3,49	3,69	3,89	4,08
0,4	0,22	0,68	1,43	1,86	2,19	2,45	2,66	2,80	2,95	3,09	3,22	3,47	3,69	3,88	4,02	4,12
0,5	0,25	0,81	1,51	1,92	2,21	2,46	2,67	2,83	2,99	3,13	3,25	3,50	3,71	3,91	4,11	4,29
0,6	0,29	0,90	1,62	2,04	2,34	2,59	2,81	2,98	3,15	3,29	3,42	3,68	3,91	4,13	4,35	4,56
0,7	0,32	0,97	1,71	2,14	2,44	2,70	2,92	3,10	3,27	3,43	3,57	3,86	4,12	4,37	4,62	4,86
0,8	0,35	1,04	1,81	2,26	2,58	2,87	3,12	3,34	3,55	3,74	3,92	4,29	4,64	5,00	5,39	5,79
0,9	0,39	1,11	1,90	2,39	2,74	3,07	3,37	3,64	3,91	4,16	4,40	4,90	5,39	5,89	6,41	6,94
1,0	0,42	1,17	2,00	2,52	2,93	3,31	3,67	4,01	4,35	4,66	5,01	5,68	6,35	7,01	7,67	8,33
1,2	0,47	1,24	2,06	2,58	2,98	3,35	3,70	4,03	4,36	4,68	5,02	5,67	6,30	6,93	7,57	8,21
1,4	0,52	1,31	2,12	2,64	3,03	3,40	3,75	4,08	4,41	4,73	5,05	5,69	6,31	6,92	7,57	8,20
1,6	0,56	1,37	2,18	2,70	3,10	3,47	3,82	4,15	4,48	4,81	5,14	5,78	6,40	7,03	7,66	8,29
1,8	0,60	1,43	2,24	2,76	3,17	3,55	3,91	4,24	4,58	4,92	5,26	5,92	6,56	7,19	7,85	8,50
2,0	0,64	1,48	2,31	2,83	3,25	3,64	4,01	4,36	4,72	5,07	5,43	6,12	6,78	7,45	8,13	8,82
2,2	0,67	1,52	2,39	2,90	3,35	3,77	4,17	4,55	4,94	5,32	5,71	6,47	7,21	7,96	8,71	9,46
2,4	0,70	1,56	2,46	2,98	3,44	3,89	4,32	4,74	5,16	5,58	6,00	6,83	7,65	8,46	9,28	10,11
2,6	0,73	1,59	2,53	3,05	3,54	4,02	4,49	4,94	5,39	5,84	6,29	7,19	8,08	8,97	9,86	10,75
2,8	0,76	1,62	2,60	3,13	3,65	4,15	4,65	5,13	5,62	6,10	6,58	7,55	8,51	9,47	10,44	11,41
3,0	0,79	1,64	2,66	3,20	3,74	4,28	4,81	5,33	5,85	6,37	6,88	7,92	8,95	9,99	11,02	12,06
3,2	0,82	1,67	2,72	3,27	3,84	4,41	4,97	5,53	6,08	6,63	7,18	8,29	9,39	10,50	11,61	12,72
3,4	0,84	1,70	2,77	3,35	3,95	4,55	5,14	5,73	6,32	6,90	7,48	8,66	9,84	11,02	12,20	13,38
3,6	0,86	1,72	2,81	3,42	4,05	4,68	5,31	5,94	6,56	7,10	7,79	9,04	10,29	11,54	12,79	14,04

3,8	0,88	1,75	2,85	3,49	4,16	4,82	5,48	6,14	6,80	7,45	8,10	9,42	10,74	12,07	13,39	14,71
4,0	0,90	1,77	2,89	3,56	4,26	4,96	5,66	6,35	7,04	7,73	8,42	9,81	11,20	12,60	13,99	15,38
4,5	0,94	1,83	2,96	3,74	4,53	5,31	6,10	6,88	7,66	8,44	9,22	10,79	12,35	13,93	15,50	17,08
5,0	0,97	1,88	3,00	3,91	4,79	5,67	6,55	7,42	8,29	9,17	10,04	11,79	13,53	15,28	17,03	18,79