

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA
WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY

Robert Żelazny

POPRAWA EFEKTYWNOŚCI
ENERGETYCZNEJ OGRZEWANIA
ROZJAZDÓW KOLEJOWYCH
Z WYKORZYSTANIEM
URZĄDZEŃ INDUKCYJNYCH

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor

Dr hab. inż. Paweł Jabłoński, Prof. PCz

Promotor pomocniczy

Dr inż. Ewa Łada-Tondyra

Częstochowa, 2021r.



Składam serdeczne podziękowania

Panu doktorowi habilitowanemu inżynierowi Pawłowi Jabłońskiemu
za opiekę promotorską, za umiejętność stawiania wymagań, ocenianie pracy oraz liczne
rozmowy będące inspiracją w zakresie innowacyjnych rozwiązań obecnie stosowanych
urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych

Pani doktor inżynier Ewie Łada-Tondyra
za wprowadzenie mnie w tematykę modelowania numerycznego w zakresie pola
elektromagnetycznego i wymiany ciepła oraz liczne uwagi merytoryczne.

Dziękuję także:

Panu Profesorowi doktorowi habilitowanemu inżynierowi Markowi Lisowi
Dziekanowi Wydziału Elektrycznego za udzieloną pomoc w realizacji badań
eksperymentalnych

Panu Profesorowi doktorowi habilitowanemu inżynierowi Waldemarowi Minkinie
Kierownikowi Studiów Doktoranckich za udzieloną pomoc w realizacji badań kamerą
termowizyjną

Dziękuję także wszystkim pracownikom Wydziału Elektrycznego Politechniki
Częstochowskiej, którzy przyczynili się do powstania niniejszej pracy, a równocześnie
do rozwoju systemu elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych na terenie
PKP PLK S.A.

Autor jest wdzięczny Politechnice Częstochowskiej, MSK CzystMAN za przyznanie
dostępu do infrastruktury obliczeniowej zbudowanej w ramach projektów PLATON
nr POIG.02.03.00-00-028/08 - usługa obliczeń kampusowych U3 oraz MAN-HA nr
POIG.02.03.00-00-110/13 - "Realizacja w MAN-ach usług krytycznych o wysokim
poziomie niezawodności".

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE.....	5
ABSTRACT.....	6
1. WSTĘP	7
1.1. Wprowadzenie	7
1.2. Przyczyny blokowania rozjazdów kolejowych.....	7
1.3. Metody zapobiegania blokowania rozjazdów.....	9
1.4. Teza oraz cel i zakres pracy	15
2. URZĄDZENIA TRADYCYJNEGO I INDUKCYJNEGO ELEKTRYCZNEGO OGRZEWANIA ROZJAZDÓW.....	17
3. SYMULACJE NUMERYCZNE DOTYCZĄCE WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNYCH GRZEJNIKA IOR	32
3.1. Rozważania jakościowe.....	32
3.2. Model obliczeniowy	33
3.3. Wyniki symulacji numerycznych	37
3.3.1. Implementacja modelu.....	37
3.3.2. Wpływ liczby i ułożenia zwojów na impedancję cewki.....	38
3.3.3. Wpływ częstotliwości pracy na impedancję cewki	41
3.3.4. Wpływ grubości obudowy na impedancję cewki	42
3.3.5. Wpływ konduktywności obudowy na impedancję cewki.....	44
4. SYMULACJE NUMERYCZNE DOTYCZĄCE ROZPŁYWU CIEPŁA	45
4.1. Uwagi wstępne.....	45
4.2. Założenia modelu obliczeniowego	45
4.3. Wyniki symulacji numerycznych	50
4.3.1. Założenia symulacyjne	50
4.3.2. Badania symulacyjne bez obecności śniegu	51
4.3.3. Badania symulacyjne dla modelu ze śniegiem	56

5. ANALIZA PRACY RZECZYWISTYCH URZĄDZEŃ IOR i EOR	60
5.1. Badania laboratoryjne wytapiania lodu	60
5.1.1. Badania laboratoryjne wytapiania lodu przez urządzenie IOR	60
5.1.2. Badania laboratoryjne wytapiania lodu dla urządzeń EOR	69
5.2. Badania terenowe wytapiania śniegu.....	77
5.2.1. Wyniki pomiarów przy różnych częstotliwościach układu IOR	77
5.2.2. Wyniki pomiarów dla układu EOR	79
5.2.3. Pomiary kamerą termowizyjną urządzeń EOR i IOR.....	86
6. ASPEKTY DOTYCZĄCE JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ I KOMPATYBILNOŚCI ELEKTROMAGNETYCZNEJ	100
6.1. Badania jakości energii elektrycznej oraz kompatybilności elektromagnetycznej	100
6.2. Wyniki pomiarów terenowych dotyczących jakości energii elektrycznej.....	101
6.2.1. Badania terenowe urządzeń EOR	101
6.2.2. Badania terenowe urządzeń IOR	105
6.2.3. Badania laboratoryjne urządzenia IOR.....	108
6.3. Pomiary pola magnetycznego	110
7. ANALIZA PORÓWNAWCZA ZUŻYCIA ENERGII NA OGRZEWANIE ROZJAZDÓW W POLSCE	112
7.1. Zużycie energii elektrycznej na ogrzewanie rozjazdów w Polsce.....	112
7.2. Porównanie zużycia energii elektrycznej do ogrzewania rozjazdu typu Rz 49E1-190-1:9 za pomocą urządzeń EOR i IOR.....	116
7.3. Propozycja hybrydowego układu IOR+EOR	120
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	129

STRESZCZENIE

Rozjazdy kolejowe są ważnymi elementami infrastruktury kolejowej. Umożliwiają prowadzenie ruchu pojazdów kolejowych na wprost lub z jednego toru na inny. W okresach zimowych obszary robocze rozjazdów muszą być oczyszczane z nagromadzonego śniegu lub lodu. Ręczne usuwanie śniegu lub lodu w praktyce byłoby wręcz niemożliwe, dlatego obecnie stosuje się elektryczne ogrzewanie rozjazdów kolejowych (EOR). Ilość zabudowanych urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych na terenie całej Europy, w tym na terenie Polski, jest bardzo duża, co znacząco przekłada się na stosunkowo duże koszty związane ze zużyciem energii elektrycznej.

Zakłady Linii Kolejowych, jako zarządcy infrastruktury, są zobowiązane do zapewnienia bezpiecznego i właściwego prowadzenia ruchu pociągów. Obecnie w urządzeniach EOR stosowane są grzejniki oporowe w postaci płasko-owalnego pręta przymocowanego do stopki szyny. Metoda ta ma jednak tę wadę, że znaczna ilość ciepła jest akumulowana w szynie i rozprzestrzeniana poza obszar roboczy rozjazdu, zamiast zostać spożytkowana na wytopienie lodu lub śniegu w obszarze roboczym rozjazdu. W jednym z nowszych rozwiązań wykorzystuje zjawisko indukcji elektromagnetycznej. W ten sposób powstało prototypowe urządzenie indukcyjnego ogrzewania rozjazdów (IOR).

W pracy opisano wyniki badań czasu wytapiania lodu przez urządzenie IOR w zależności od częstotliwości roboczej. Dokonano również pomiarów czasu wytapiania lodu przez obecnie stosowane urządzenie EOR. Pomiary były wykonywane w komorze klimatycznej, w której dla zadanych temperatur otoczenia dokonywano pomiarów czasu wytapiania lodu w zależności od częstotliwości pracy urządzenia IOR. Wykonano również pomiary wskaźników jakości energii elektrycznej dla tradycyjnego urządzenia elektrycznego ogrzewania rozjazdów oraz dla prototypowego indukcyjnego ogrzewania rozjazdów. W okresie zimowym dokonano pomiarów w terenie w zakresie wytapiania uformowanych warstw śniegu dla urządzenia indukcyjnego ogrzewania rozjazdów oraz dla urządzenia tradycyjnego ogrzewania rozjazdów, w tym z zastosowaniem kamery termowizyjnej. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że urządzenie IOR charakteryzuje się większą efektywnością energetyczną oraz umożliwia dostosowanie szybkości działania do aktualnych warunków pogodowych. Zaproponowano też hybrydowe rozwiązanie IOR+EOR, w którym siodełka rozjazdu byłyby ogrzewane metodą oporową, aby ułatwić ewentualne prace serwisowo-naprawcze. Takie rozwiązanie miałoby mniejszą efektywność energetyczną niż metoda IOR, jednak większą niż metoda EOR.

ABSTRACT

Railway turnouts are important elements of the railway infrastructure. They enable the movement of railway vehicles straight ahead or from one track to another. In winter periods, the working areas of turnouts must be cleaned of accumulated snow or ice. Manual removal of snow or ice would be practically impossible, which is why electric railroad turnout heating (EOR) is currently used. The number of installed electric heating devices for railway turnouts throughout Europe, including Poland, is very large, which significantly translates into relatively high costs related to electricity consumption.

Zakłady Linii Kolejowych, as infrastructure managers, are obliged to ensure safe and proper train traffic management. Currently, EOR devices use resistance heaters in the form of a flat-oval rod attached to the foot of the rail. However, this method has the disadvantage that a significant amount of heat is accumulated in the rail and spread beyond the turnout working area, rather than being used to melt ice or snow in the turnout working area. In one of the newer solutions, the phenomenon of electromagnetic induction is used. In this way, a prototype device for induction heating of turnouts (IOR) was created.

The paper describes the results of research on the ice melting time by the IOR device depending on the operating frequency. The ice melting time was also measured by the currently used EOR device. The measurements were performed in a climatic chamber where, for the given ambient temperatures, the ice melting time was measured depending on the frequency of the IOR device. Measurements of the electric energy quality indicators were also carried out for the traditional device for electric heating of turnouts and for the prototype induction heating of turnouts. In the winter, measurements were made for the melting of formed snow layers for the device of induction heating of turnouts and for the device of traditional heating of turnouts, including the use of a thermal imaging camera. Based on the conducted research, it was found that the IOR device is characterized by greater energy efficiency and allows for adjusting the speed of operation to the current weather conditions. A hybrid IOR + EOR solution was also proposed, in which the turnout saddles would be heated using the resistive method to facilitate possible service and repair works. Such a solution would have lower energy efficiency than the IOR method, but greater than the EOR one.

1. WSTĘP

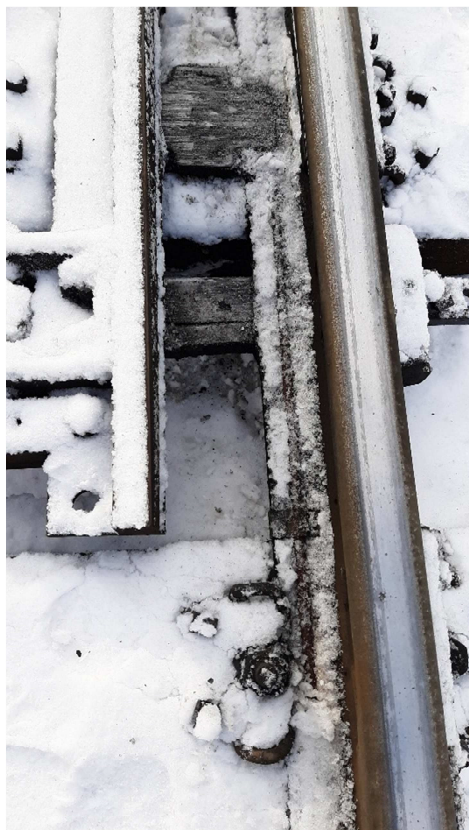
1.1. Wprowadzenie

W okresach zimowych prowadzenie ruchu kolejowego może być utrudnione ze względu na niekorzystne warunki atmosferyczne. Newralgicznymi elementami infrastruktury kolejowej są rozjazdy. W obszarze roboczym rozjazdu może gromadzić się śnieg lub lód, prowadząc do jego zablokowania. Może to utrudnić lub nawet uniemożliwić prowadzenie ruchu pociągów [1]. W celu eliminacji takiego typu zagrożeń wprowadzono rozwiązania techniczne, które powodowały usuwanie śniegu lub lodu z kluczowych miejsc rozjazdów [2]. Obecnie najbardziej rozpowszechnioną metodą zapewniania pełnej sprawności rozjazdów ze względu na niesprzyjające warunki atmosferyczne w okresach zimowych są zabudowane urządzenia elektrycznego ogrzewania rozjazdów (EOR). Duża moc zainstalowana w urządzeniach EOR skutkuje generowaniem znacznych kosztów. Ze względu na duże zużycie energii elektrycznej urządzenia EOR, są przedmiotem prac badawczych mających na celu znaczne ograniczenie kosztów związanych z eksploatacją infrastruktury kolejowej. Proponowana modyfikacja elementów zasilania i sterowania wpisuje się także w trend ochrony środowiska poprzez budowę efektywniejszych urządzeń, w tym urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów.

1.2. Przyczyny blokowania rozjazdów kolejowych

W przypadku braku zabudowanych urządzeń do usuwania śniegu albo lodu lub ich uszkodzenia w okresie zimowym panują warunki sprzyjające do blokowania rozjazdów. Rysunek 1.1 ukazuje przykład nagromadzenia się śniegu w rozjeździe przy opornicy (szynie nieruchomej) po uszkodzeniu zabudowanego urządzenia elektrycznego ogrzewania rozjazdów. Iglica (szyna ruchoma), przesuwając się po siodełku w kierunku do opornicy, przemieszcza nagromadzony śnieg. Powoduje to mechaniczną blokadę, a w związku z tym trudności w prowadzeniu ruchu pociągów.

a)



b)



Rys. 1.1. Zablokowany rozjazd kolejowy przez śnieg nagromadzony pomiędzy iglicą a opornicą (a,b). Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 1.2 pokazano zablokowany po burzy śnieżnej rozjazd kolejowy, w którym nastąpiło uszkodzenie urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów. Nagromadzony śnieg z czasem zamienia się w lód. W przypadku pojawienia się śniegu lub lodu w głównych miejscach rozjazdu występuje brak możliwości właściwej i bezpiecznej eksploatacji linii kolejowych.



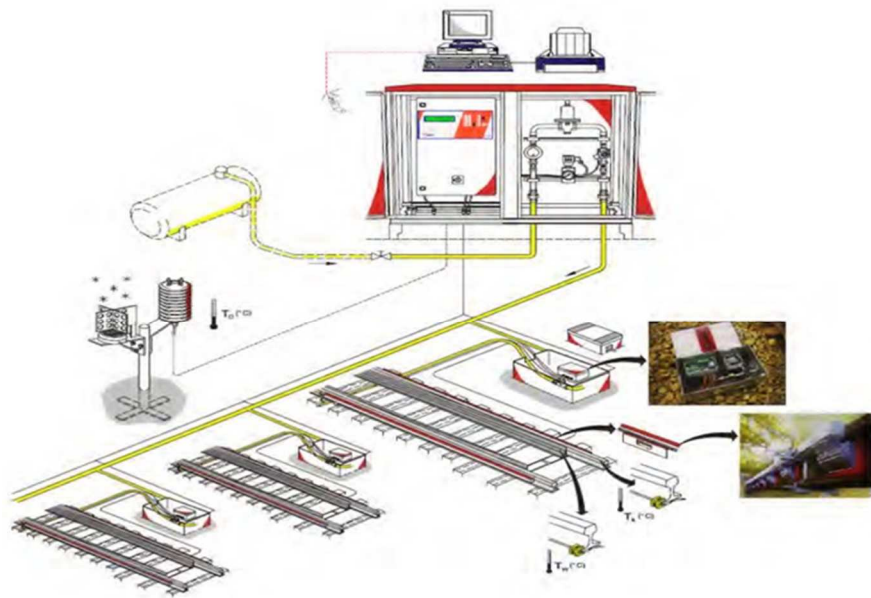
Rys. 1.2. Zablokowany rozjazd kolejowy po burzy śnieżnej przez nagromadzony śnieg pomiędzy iglicą a opornicą (a,b).
Źródło: opracowanie własne.

1.3. Metody zapobiegania blokowania rozjazdów

Metody usuwania śniegu lub lodu z rozjazdów ewoluowały wraz z rozwojem techniki. W początkowych latach rozwoju kolei czynności te wykonywane były ręcznie przez pracowników obsługi. W kolejnych latach w celu zapobiegania blokowania rozjazdów wprowadzono specjalne korytka, w których umieszczano elementy paliwa stałego, między innymi takie jak rozpalony koks, który podgrzewał najważniejsze elementy rozjazdów. Kolejnym rozwiązaniem technicznym było wprowadzenie oczyszczania pneumatycznego oraz ogrzewania gazowego, wodnego, geotermalnego i elektrycznego [3]. Podstawowym czynnikiem decydującym o wyborze typu ogrzewania rozjazdów jest dostępność źródeł energii w połączeniu z kosztami ponoszonymi w celu budowy oraz eksploatacji danego systemu ogrzewania.

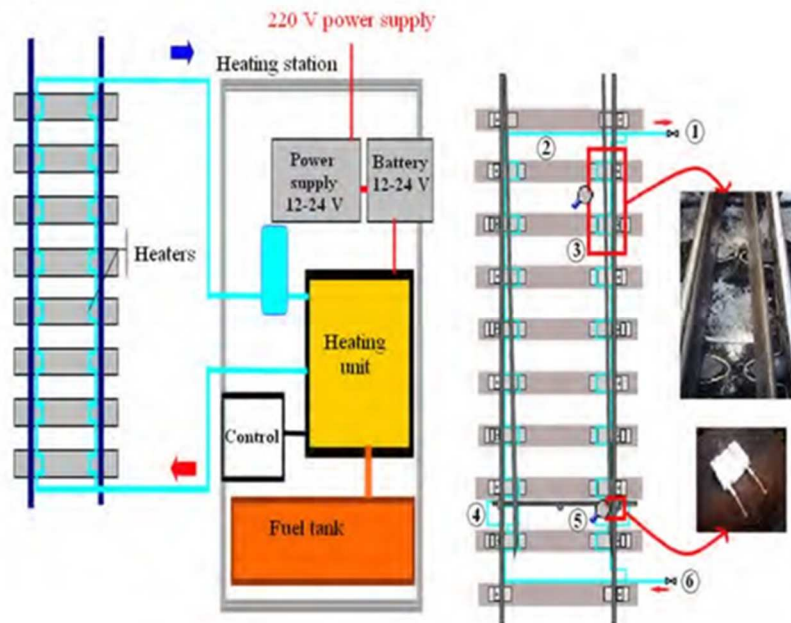
W rejonach, gdzie temperatury otoczenia w okresach zimowych są znacznie poniżej zera, a przy tym wilgotność jest zmniejszona, dobrze sprawdzają się pneumatyczne metody oczyszczania rozjazdów. Oczyszczanie pneumatyczne polega na tym, że strumień sprężonego powietrza wydmuchuje śnieg z obszaru roboczego rozjazdu.

System ogrzewania gazowego jest stosowany w rejonach, gdzie występują ekstremalnie trudne warunki pogodowe (rys. 1.3). W szczególności stosowane są tam, gdzie występują obfite opady śniegu i niskie temperatury dochodzące do $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Systemy gazowego ogrzewania rozjazdów charakteryzują się dużą sprawnością cieplną. Wady to wysokie koszty eksploatacji ze względu na wykorzystywane paliwo, możliwość rozszczelnienia układu, przede wszystkim przez drgania wywoływane przez przejeżdżające pojazdy kolejowe, a w najgorszym wypadku możliwość wybuchu gazu.



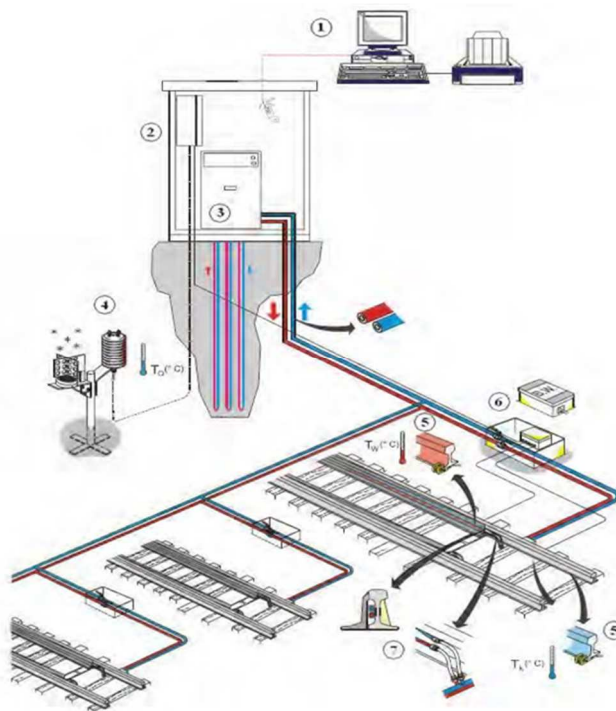
Rys. 1.3. System gazowego ogrzewania rozjazdów. Źródło [3]

Ogrzewanie wodne wykorzystuje metodę transmisji energii cieplnej z wykorzystaniem czynnika roboczego (rys. 1.4). Zabudowana jednostka olejowa powoduje podgrzewanie płynu roboczego w postaci mieszanki wody oraz środków zapobiegających zamarzaniu. Podgrzany płyn doprowadzany jest do wymienników ciepła. Wymienniki ciepła umieszczone są równoległe do szyn i siodełek rozjazdu. Podgrzany płyn oddaje ciepło i wraca z powrotem do jednostki grzewczej. Tego rodzaju system uzyskuje energię cieplną ze spalania oleju opałowego i przekazuje ją w najbardziej newralgiczne miejsca rozjazdów.



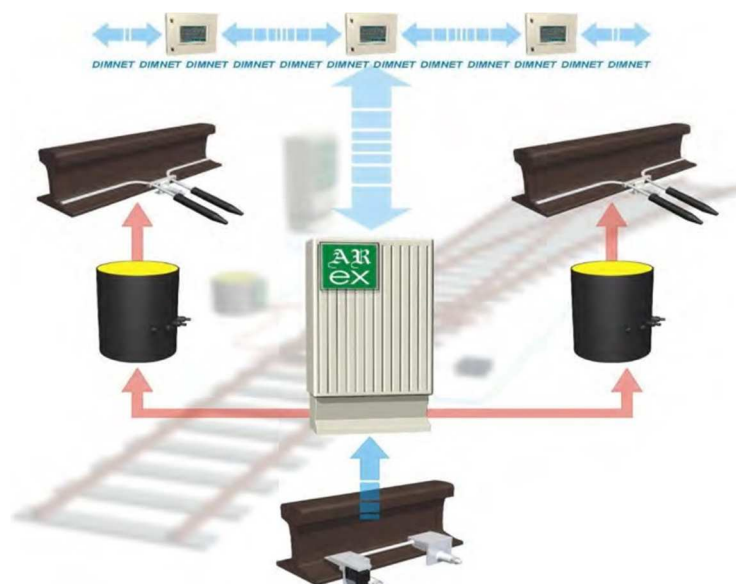
Rys. 1.4. System wodnego ogrzewania rozjazdów (1 - powrót czynnika roboczego do nagrzewnicy, 2 - rura stalowa o średnicy 12 mm, 3 - wymiennik ciepła, 4 - wymiennik ciepła ogrzewania iglicy, opornicy oraz siodełek, 5 - wymiennik ogrzewania pomocniczego, 6 - zasilanie wymienników podgrzany czynnikiem roboczym). Źródło [3]

Inną metodą, która może być zastosowana do ogrzewania rozjazdów, są systemy geotermalne (rys. 1.5). Zastosowany układ geotermalnego ogrzewania wykorzystuje naturalne ciepło podziemne. Główny element takiego układu to pompa ciepła. Układ taki umożliwia osiągnięcie temperatury czynnika służącego do ogrzewania rozjazdów około 50-60 °C.



Rys. 1.5. System geotermalnego ogrzewania rozjazdów (1 - układ lokalnego sterowania i monitoringu, 2 - układ sterowania i monitoringu, 3 - pompa ciepła i obieg grzewczy, 4 - czujnik opadów śniegu i temperatury otoczenia, 5 - czujnik wilgotności i temperatury szyny, 6 - puszka przyłączeniowa, 7 - wymienniki ciepła (nagrzewnice)). Źródło [3]

Obecnie w Polsce najczęściej stosowany system usuwania śniegu lub lodu z rozjazdów, to system elektrycznego ogrzewania rozjazdów (EOR) (rys. 1.6), jest on powszechnie stosowany od lat 70-tych XX wieku [4,5]. System elektrycznego ogrzewania rozjazdów jest to zespół elementów zasilających i sterujących, które zgodnie z zadanymi warunkami w układzie sterowania spowodują załączenie zasilania do grzejników zabudowanych w kluczowych elementach rozjazdów [6]. Zasilanie urządzeń EOR wymaga dostarczenia energii elektrycznej o normatywnych parametrach [7,8].



Rys. 1.6. System tradycyjnego elektrycznego ogrzewania rozjazdów (EOR). Źródło [3]

Obecnie stosowane układy elektrycznego ogrzewania rozjazdów wykorzystują płaskoowalne grzejniki opornicowe. Są one zamocowane specjalnymi uchwytami do stopki szyny. Zamocowanie takie wymusza przepływ energii cieplnej do opornicy. Szczególną uwagę przykłada się w takim systemie do właściwego przylegania grzejnika do stopki opornicy. Zastosowana automatyka powoduje załączenie układu EOR do pracy, co powoduje przepływ energii cieplnej poprzez mechanizm przewodnictwa od grzejnika do opornicy [2,6]. Opornica jako radiator przekazuje energię cieplną do otoczenia. Wykorzystywana energia cieplna w przestrzeni pomiędzy iglicą a opornicą powoduje wytopienie śniegu lub lodu z głównych elementów rozjazdu. Pozostała energia cieplna przekazywana jest do otoczenia z główki szyny oraz z zewnętrznej części opornicy, co powoduje zwiększenie strat energii [9]. Przepływ energii cieplnej z szyny (opornicy) do otoczenia jest dużą wadą tego układu, co znacznie zmniejsza jego sprawność. W celu zmniejszenia strat, wprowadzano różne rozwiązania, między innymi zaproponowano zastosowanie izolacji cieplnych, tzw. otulin termoizolacyjnych montowanych na wysokości szyjki szyny od zewnętrznej strony opornicy, co powodowało zmniejszenie strat energii cieplnej [10]. Otuliny termoizolacyjne powodowały podwyższenie temperatury opornicy oraz zmniejszenie czasu nagrzewania opornicy. Dodatkowym atutem takiego rozwiązania było spowolnienie stygnięcia opornicy, co jest szczególnie ważne przy zastosowaniu układu selektywnego włączania poszczególnych urządzeń EOR ze względu na brak możliwości zwiększenia mocy umownej danego przyłącza dedykowanego dla całej główki rozjazdowej. Zgodnie z wymaganiami obowiązującymi na terenie PKP PLK S.A. odnośnie grzejników opornicowych w tradycyjnym układzie ogrzewania dla normalnych warunków atmosferycznych średnia temperatura grzejnika po czasie 60 minut grzania powinna wynosić powyżej 160 °C dla układu z odbiorem ciepła przy napięciu zasilania 230 V, lecz nie więcej niż 400 °C jako temperatura ustalona dla układu

z odbiorem ciepła przy napięciu zasilania 253 V [11]. Tak znaczna temperatura grzejnika jest wadą tego układu ponieważ powoduje zagrożenie dla bezpieczeństwa obsługi z powodu możliwości oparzenia. Kolejną wadą urządzenia EOR jest brak możliwości płynnej regulacji mocy grzejników w zależności od panujących warunków atmosferycznych. Urządzenia te są załączane w sposób ręczny lub automatyczny. Po załączeniu urządzenia grzejniki niezależnie od warunków atmosferycznych działają zawsze z taką samą mocą. Nie można również zwiększyć mocy w przypadku pojawienia się burzy śnieżnej lub po załączeniu urządzeń po awarii lub braku zasilania. Kolejną wadą urządzeń EOR jest duża moc zainstalowana w każdym rozjeździe. Dla całej grupy rozjazdów, szczególnie w głowicy rozjazdowej, powoduje to konieczność zabudowy odrębnego przyłącza, a czasami wymusza to poniesienie dodatkowych kosztów związanych z zabudową stacji transformatorowej. W celu poprawy istniejącego systemu ogrzewania rozjazdów rozważano i w niektórych przypadkach zastosowano innowacyjne rozwiązania na terenie PKP PLK S.A. Testowane rozwiązania ogrzewania rozjazdów polegały na zabudowaniu ogrzewania wodnego oraz geotermalnego. Niewątpliwie dużą uwagę skierowano na rozwiązania z zastosowaniem systemu indukcyjnego ogrzewania rozjazdów (IOR). Pierwsze rozwiązania w zakresie indukcyjnego ogrzewania rozjazdów wprowadzono na terenie PKP w latach 1978/1979 [12]. W tych rozwiązaniach ze względu na ograniczone możliwości dostępu do elementów elektronicznych, w tym układów umożliwiających zmianę częstotliwości w elementach zasilania, zastosowano zasilanie o częstotliwości sieci zasilającej 50 Hz. Szyny rozjazdów kolejowych nagrzewały się poprzez indukowanie prądów wirowych w szynach. Było to bardzo nowatorskie rozwiązanie, które wg [13] pozwalało zmniejszyć zużycie energii elektrycznej o około 35%, ale niestety posiadało również wady. Dużą wadą było to, że przewody induktora wibrowały i wytwarzały fale akustyczne w paśmie słyszalnym. Po spektakularnym początku prac zaprzestano. Obecnie dostępność całej gamy elementów i układów energoelektronicznych umożliwiła rozwój układów indukcyjnego ogrzewania rozjazdów. Dodatkowo współcześnie dostępne programy komputerowe umożliwiają analizę teoretyczną w celu wyboru optymalnego rozwiązania, zarówno w zakresie intensywności nagrzewania, jak również w zakresie zużycia energii elektrycznej [14]. Urządzenia indukcyjnego ogrzewania rozjazdów umożliwiają płynną regulację intensywności nagrzewania w zależności od warunków atmosferycznych, a gdy zajdzie taka konieczność, pracownik może ręcznie ustawić dowolną wartość intensywności nagrzewania z dostępnego zakresu. Jak każde urządzenie, pomimo dużej ilości cech pozytywnych, również i ono narażone jest na powstawanie pewnych usterek. Podstawowe usterki, jakie mogą zaistnieć, to uszkodzenie elementów energoelektronicznych, dlatego ich zastosowanie powinno być zminimalizowane. Dodatkowo zastosowanie elementów indukcyjnego ogrzewania rozjazdów powinno być w formie kompaktowej, aby w przypadku awarii, była możliwość szybkiej wymiany uszkodzonego elementu, bez ingerencji w układ rozjazdu. Reasumując, zastosowanie układu indukcyjnego ogrzewania rozjazdów przy założeniu znacznego zmniejszenia zużycia energii elektrycznej i niewielkiego poziomu

awaryjności w stosunku do obecnie stosowanych urządzeń EOR oznaczałoby znaczny postęp w zakresie elektroenergetyki kolejowej.

1.4. Teza oraz cel i zakres pracy

Na podstawie przedstawionych wyżej rozważań postawiono następującą tezę:

Zastosowanie indukcyjnego ogrzewania rozjazdów w połączeniu z tradycyjnym urządzeniem elektrycznego ogrzewania rozjazdów pozwoli na istotne zmniejszenie energochłonności poboru energii elektrycznej w porównaniu z obecnie stosowanym tradycyjnym elektrycznym ogrzewaniem rozjazdów

Aby dowieść tezy, sformułowano następujące szczegółowe cele poznawcze i użytkowe:

- analiza pracy układów elektrycznego i indukcyjnego ogrzewania rozjazdów kolejowych;
- przeprowadzenie badań prototypowego urządzenia indukcyjnego ogrzewania rozjazdów w laboratorium Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej;
- przeprowadzenie badań prototypowego urządzenia indukcyjnego ogrzewania rozjazdów oraz tradycyjnego ogrzewania rozjazdów w komorze klimatycznej poprzez wytapianie brył lodu dla różnych temperatur otoczenia, a następnie dokonanie analizy danych;
- przeprowadzenie badań wybranych istniejących urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów w terenie analizatorem SONEL PQM 701Z w zakresie badań parametrów jakości energii elektrycznej;
- zbadanie efektywności urządzenia indukcyjnego ogrzewania rozjazdów oraz tradycyjnego ogrzewania rozjazdów w terenie w zakresie wytapiania śniegu w okresie panującej zimy;
- analiza zużycia energii elektrycznej dla prototypowego urządzenia indukcyjnego ogrzewania rozjazdów oraz tradycyjnego ogrzewania rozjazdów w celu optymalizacji systemu ogrzewania rozjazdów kolejowych;
- przeprowadzenie oszacowania efektywności energetycznej dla elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych w układzie IOR, jak również rozwiązania hybrydowego, które zastąpiłoby klasyczne rozwiązanie EOR.

Wyniki badań symulacyjnych porównano z wynikami badań i analizy układów IOR oraz EOR zabudowanych w terenie oraz poddanych badaniom w komorze klimatycznej.

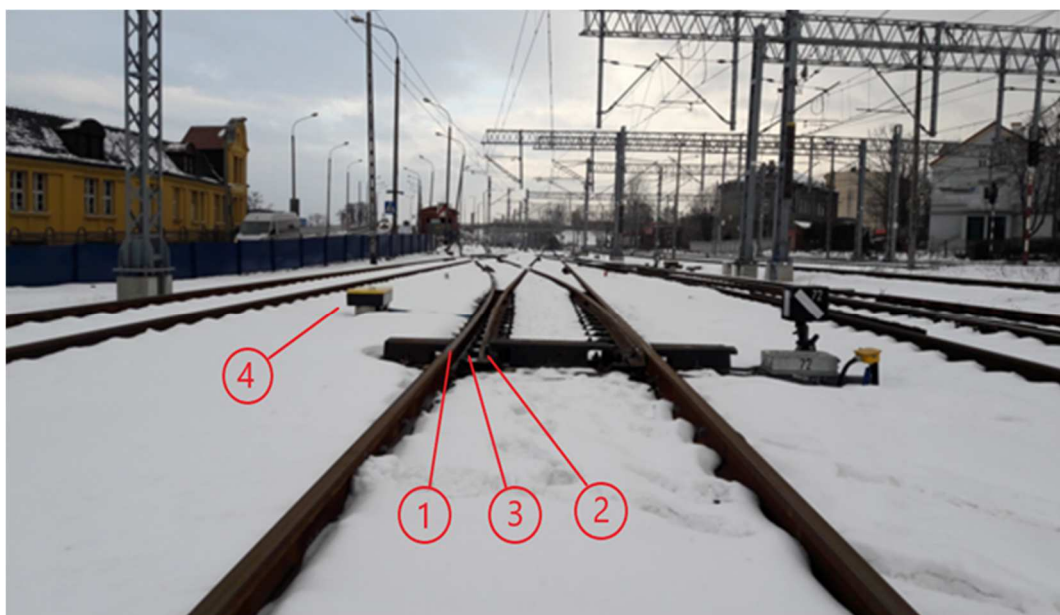
Do osiągnięcia wymienionych wyżej celów zastosowano następującą metodykę badań:

- analizę literaturową dotyczącą urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych;
- analizę teoretyczną, modelowanie i badania symulacyjne indukcyjnego ogrzewania rozjazdów kolejowych;
- badania laboratoryjne i terenowe wybranych urządzeń elektrycznego tradycyjnego oraz indukcyjnego ogrzewania rozjazdów kolejowych;
- analizę efektywności energetycznej, w tym zużycia energii elektrycznej dla różnych rozwiązań elektrycznego i indukcyjnego ogrzewania rozjazdów kolejowych.

2. URZĄDZENIA TRADYCYJNEGO I INDUKCYJNEGO ELEKTRYCZNEGO OGRZEWANIA ROZJAZDÓW

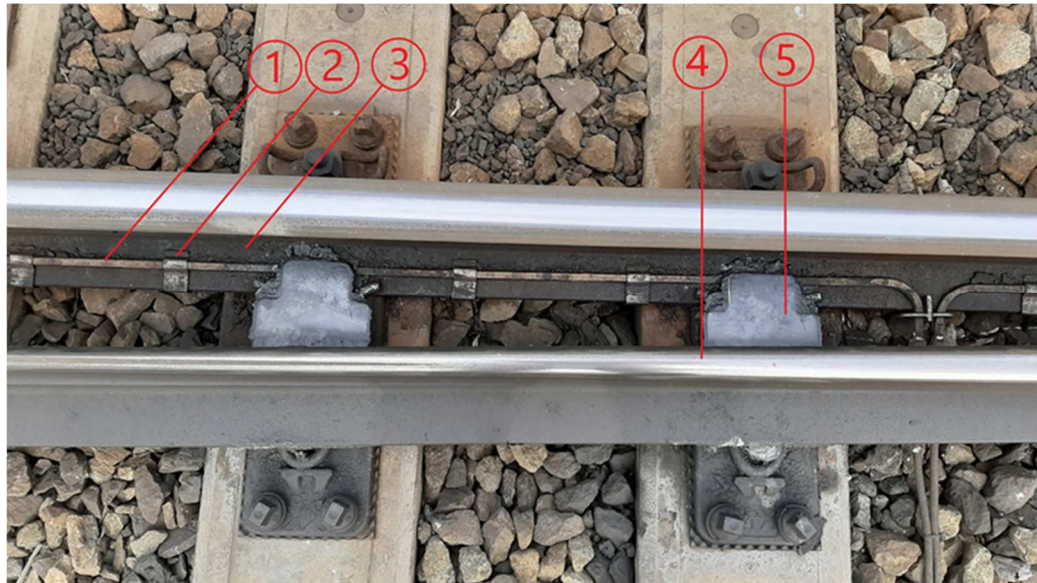
Ogrzewanie rozjazdów kolejowych jest jednym z najważniejszych elementów bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego. W krajach, w których warunki klimatyczne silnie wpływają na możliwość zablokowania rozjazdów wskutek zalegającego śniegu lub przymarznięcia elementów ruchomych, stosuje się różne rozwiązania: elektryczne (rezystancyjne), wodne, gazowe, pneumatyczne, geotermalne [15,10]. Przedstawiono je skrótowo w podrozdziale 1.3. W niniejszym podrozdziale skupiono się na przeglądzie literatury w zakresie ogrzewania rozjazdów bazującego na metodach elektrycznych, tj. metodzie rezystancyjnej i przede wszystkim indukcyjnej. Warto jednak nadmienić, że istotne są także inne aspekty ogrzewania rozjazdów. Przykładowo, w pracy [16] Autorzy dokonali przeglądu literatury w zakresie badań koncentrujących się na identyfikacji ewentualnych awarii w systemach ogrzewania rozjazdów kolejowych i zaproponowali prostą metodę prognostyczną, która ma na celu wykrywanie i prognozowanie ilości awarii dotyczących rozjazdów kolejowych.

Obecnie stosowane w Polsce i w wielu innych krajach metody ogrzewania rozjazdów wykorzystują przede wszystkim ogrzewanie elektryczne rezystancyjne. Elementy ogrzewane rozjazdu to przede wszystkim: iglica (szyna ruchoma), opornica (szyna nieruchoma), zamknięcia nastawcze oraz inne elementy w zależności od typu rozjazdu (rys. 2.1) [9]. Do ogrzewania rozjazdów służą grzejniki opornikowe płaskoowalne [11] przytwierdzone do stopki szyny przez specjalne uchwyty [17] oraz płyty grzewcze i inne grzejniki specjalne montowane w zależności od typu rozjazdu.



Rys. 2.1. Zabudowane elementy urządzenia elektrycznego ogrzewania rozjazdów (1 - opornica, 2 - iglica, 3 - przestrzeń robocza rozjazdu, 4 - skrzynie transformatorów separacyjnych). Źródło: [20].

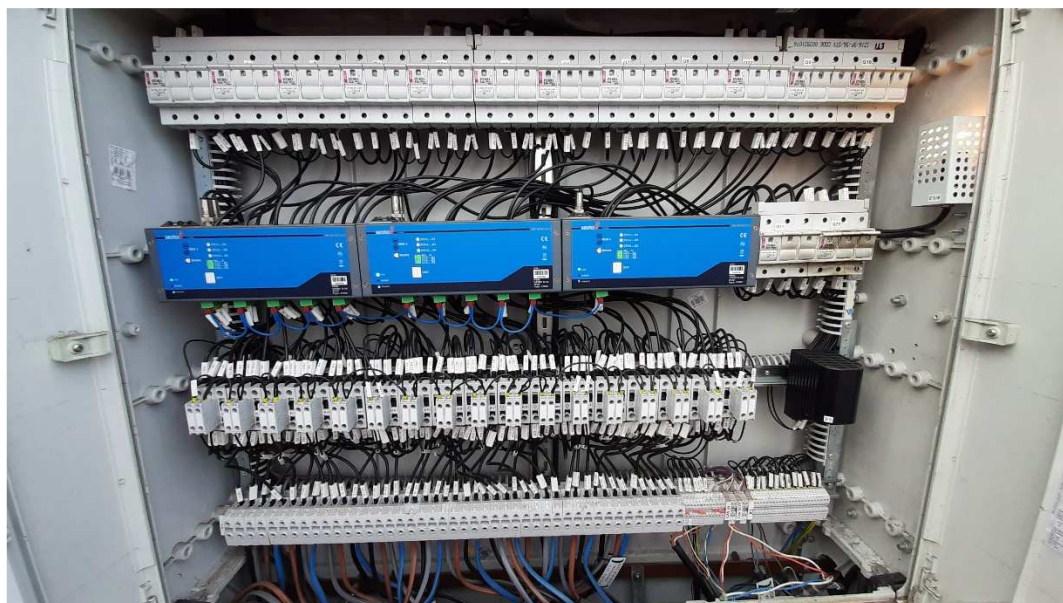
Urządzenia elektrycznego ogrzewania rozjazdów składają się z następujących elementów: grzejniki [11] (rys. 2.2), transformatory separacyjne [18] (rys. 2.3) i szafy zasilająco-sterujące [19] (rys. 2.4). Rozbudowane układy sterowania realizują swą funkcję za pomocą przetworników pogodowych, wraz z zestawem czujników zamontowanych w rozjeździe wzorcowym [6], które umożliwiają automatyczne załączanie grzejników w zależności od panujących warunków atmosferycznych (rys. 2.5). Układy zasilania i sterowania są dostosowane do przekazywania wybranych parametrów celem nadzoru i kontroli oraz do zmiany ustawień w układzie sterowania.



Rys. 2.2. Zabudowane grzejniki płaskoowalne (1), zamocowane specjalnymi uchwytami (2) do stopki opornicy (3); iglica (4) spoczywa na siodełkach (5). Źródło: [20].



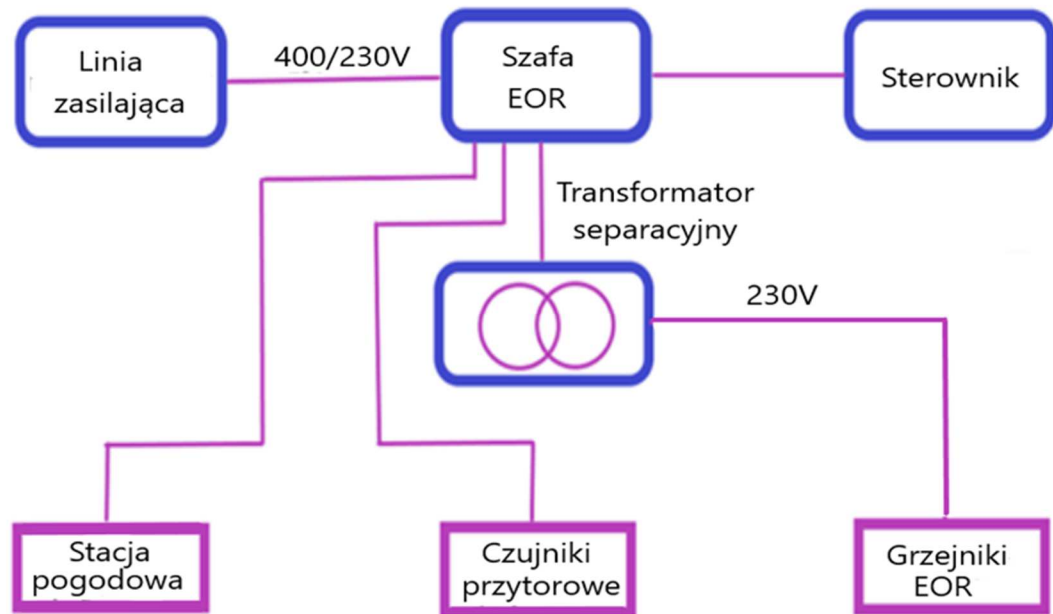
Rys. 2.3. Zabudowane skrzynie transformatorowe z transformatorami separacyjnymi. Źródło: [20].



Rys. 2.4. Szafa zasilająco-sterująca. Źródło: opracowanie własne.

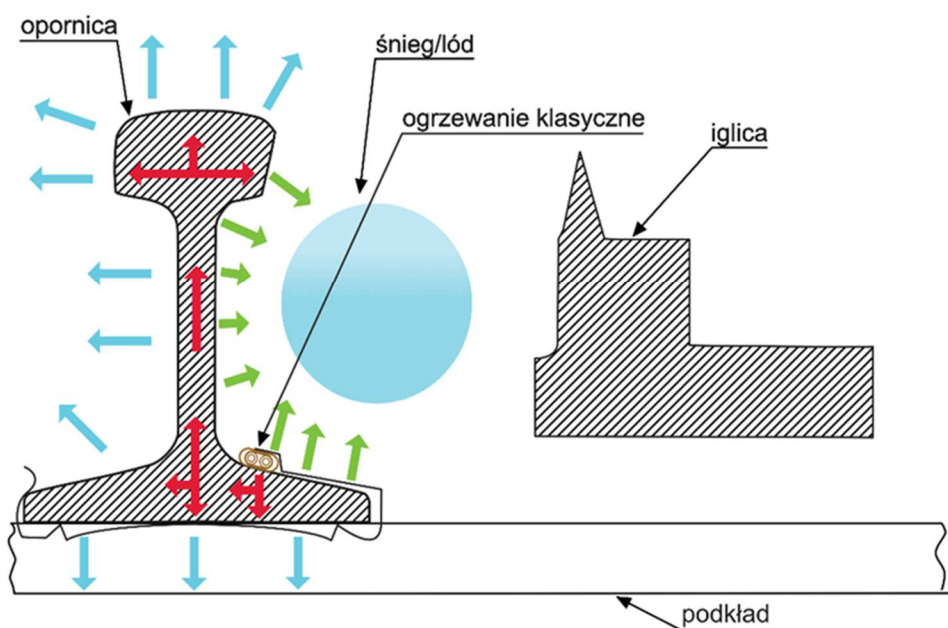
Transformatory separacyjne dla urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów przeznaczone są do zasilania grzejników zamontowanych w rozjazdach, jak i zamknięć nastawczych. Transformatory separacyjne spełniają swoje zadanie jako ochrona obsługi przed porażeniem napięciem 230 V oraz dodatkowo jako separacja obwodów zasilających od przepływu prądów trakcyjnych (błądzących) oraz ochrona przed przeniesieniem potencjału sieci trakcyjnej 3 000 V prądu stałego poza strefę oddziaływania trakcji elektrycznej. W skrzyniach transformatorowych (rys. 2.3) zabudowane są m.in. transformatory separacyjne elektrycznego ogrzewania rozjazdów o mocach od 150 do 4600 VA w układzie zasilania napięciem fazowym 230V: 230V/230V, 230V/24V (zamknięcia nastawcze) lub w układzie zasilania napięciem międzyfazowym 3x400V: 400V/230V, 400V/24V (zamknięcia nastawcze). Moc urządzenia elektrycznego ogrzewania rozjazdów wynosi dla pojedynczej grzałki od 50 W do 1600 W, natomiast moc całego układu EOR dla jednego rozjazdu zawiera się w przedziale od 2400 W do ponad 25 000 W. Do ogrzewania przestrzeni pomiędzy iglicą a opornicą stosowane są grzejniki o mocach 900 W, 1050 W, 1250 W i 1600 W, zaś do ogrzewania zamknięć nastawczych stosowane są grzejniki o mocach 50 W i 150 W. Stosowane są również inne typy grzejników, w zależności od specjalnych uwarunkowań rozjazdu. Grzejnik opornicy składa się z pręta, w którym umieszczona jest spirala zasilana przez przewód o przekroju $3 \times 1,5 \text{ mm}^2$ z przewodem ochronnym podłączonym do płaszcza grzejnika oraz mufy kablowej oznaczonej odpowiednim kolorem w zależności od mocy grzałki.

Szafy zasilająco-sterujące EOR (rys. 2.4) służą do zasilania skrzyń transformatorowych elektrycznego ogrzewania rozjazdów oraz do sterowania całego układu w zależności od panujących warunków pogodowych w stosunku do zadanych parametrów sterownika [6,21]. Schemat blokowy systemu EOR przedstawiono na rysunku 2.5



Rys. 2.5. Schemat blokowy układu EOR. Źródło: opracowanie własne.

W klasycznym rozwiązaniu EOR grzejnik rezystancyjny w postaci płasko-owalnego pręta jest przymocowany do stopki opornicy w ten sposób, że znaczna część ciepła zostaje przekazana do opornicy wskutek przewodnictwa cieplnego. Schemat dystrybucji ciepła dla tradycyjnego układu ogrzewania rozjazdów przedstawiono na rysunku 2.6. Grzejnik oporowy nagrzewając stopkę szyny przekazuje ciepło do szyny. Ciepło oddawane od opornicy w kierunku iglicy jest wykorzystywane do wytapiania śniegu i lodu. Ciepło oddawane na zewnątrz opornicy jest traktowane jako straty układu EOR. Analiza rozptyłu ciepła w takim układzie wskazuje, że znaczna część ciepła zostaje pochłonięta przez opornicę, a następnie oddana nie tylko do przestrzeni roboczej rozjazdu (obszaru między opornicą a iglicą), ale także poza tę przestrzeń, przez co efektywność ogrzewania przestrzeni roboczej jest stosunkowo mała [22]. Aby zniwelować ten problem, stosuje się otulinę montowaną po zewnętrznej stronie opornicy, jednakże okazuje się ona stosunkowo nietrwała [15].



Rys. 2.6. Dystrybucja ciepła pomiędzy iglicą a opornicą rozjazdu dla układu klasycznego. Źródło: opracowanie własne na podstawie [14]

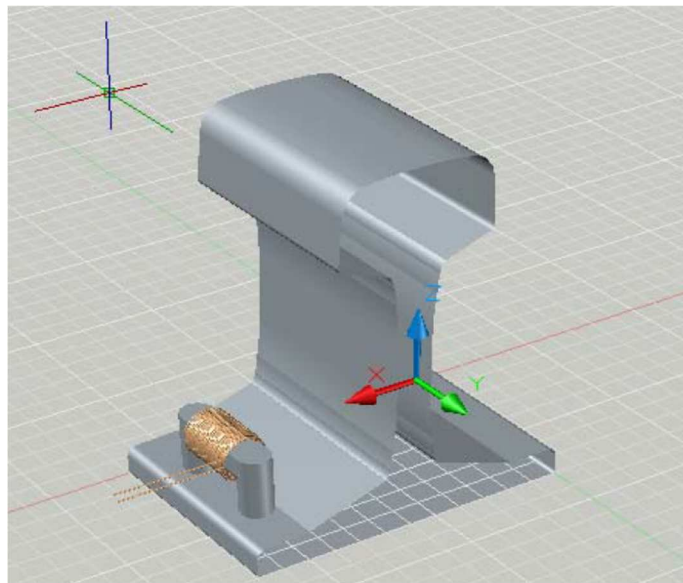
Innym kierunkiem redukcji ciepła uciekającego poza obszar roboczy jest odseparowanie grzejnika od opornicy (metoda bezstykowa). Zagadnieniu temu poświęcone są prace [14,23,24,25,26], w których dokonano analizy porównawczej efektywności obydwu metod (stykowej i bezstykowej). Metodyka badań w znacznej mierze opierała się na symulacjach numerycznych. W rozprawie [14] Autor opisał analizę badań procesów nagrzewania rozjazdów kolejowych, które przeprowadzono za pomocą metod symulacji komputerowych w programie ANSYS. Rozpatrywano efektywność energetyczną układów ogrzewania przy pomocy dwóch typów grzejników: klasycznego i bezstykowego. Podkreślono, że główną przyczyną dużej energochłonności jest długi czas niezbędny do wytopienia śniegu lub lodu wynikający z nagrzewania opornicy rozjazdu. Wykazano, że wzrost efektywności energetycznej dla procesu ogrzewania rozjazdów kolejowych można uzyskać poprzez zwiększenie powierzchni dystrybucji ciepła w obszar roboczy rozjazdu. Następnie analizowano układ z grzejnikiem odizolowanym od stopki szyny. W takim przypadku brak jest intensywnego przekazywania ciepła do szyny wskutek przewodności cieplnej. Powoduje to wzrost temperatury elementu grzejnego oraz obniżenie temperatury szyny (opornicy). W tym przypadku energia cieplna zostaje ukierunkowana bezpośrednio w kluczowe obszary rozjazdu. Badano także możliwość indukcyjnego ogrzewania rozjazdów, choć w znacznie

mniejszym zakresie. Wykazano, że w przypadku zastosowania układów ze źródłem ciepła odizolowanym od stopki szyny, np. dla grzejników bezstykowych lub indukcyjnych, otrzymuje się wyniki charakteryzujące się wyższą sprawnością procesu nagrzewania w stosunku do obecnie stosowanego układu z rozwiązaniem klasycznym. Stwierdzono, że wytopienie śniegu trwa znacznie krócej. Zmniejszenie czasu wytapiania w przypadku badań teoretycznych oraz wybranymi metodami eksperymentalnymi oszacowano nawet do 50% w porównaniu z klasycznym układem ogrzewania rozjazdów. Dokonano analizy porównawczej układu EOR oraz IOR, która wykazała, że dla układu EOR występuje duża energochłonność, duże straty energii i niska sprawność [14,27]. Natomiast po analizie teoretycznej układu IOR wykazano jego dużą efektywność energetyczną oraz podkreślono przyszłość tego typu rozwiązań jako alternatywę dla obecnie stosowanych urządzeń EOR. Wskazano, że układ indukcyjnego ogrzewania rozjazdów kolejowych stanowi interesujący obszar dla przyszłych badań i analiz.

Nagrzewanie indukcyjne jest szeroko wykorzystywane w wielu procesach przemysłowych (np. topnienie metali, hartowanie, zgrzewanie, wyżarzanie, spawanie, kucie), gospodarstwa domowego (kuchenka indukcyjna) oraz medycznych (sterylizacja narzędzi, terapie małoinwazyjne) [28]. Początki zastosowania nagrzewania indukcyjnego do ogrzewania rozjazdów kolejowych sięgają lat siedemdziesiątych XX wieku. W patencie USA [29] z 1972 roku zaproponowano wykorzystanie prądów wirowych do odładzania szyn. Patent nie dotyczył jednak ogrzewania samego rozjazdu, ale raczej szyn, aby zapobiegać ślizganiu się kół pojazdu po szynach. W Polsce testowano indukcyjne ogrzewanie rozjazdów w latach 1978/79 [30,31]. Badania prowadzone przez Horoszko przy 50 Hz wskazywały, że zużycie energii w metodzie indukcyjnej jest około 35% mniejsze niż w metodzie rezystancyjnej. Zrezygnowano jednak z tego rozwiązania z uwagi na to, że przewody induktora wibrowały i wytwarzały fale akustyczne w paśmie słyszalnym. Później proponowano zastosowanie nagrzewania indukcyjnego przy częstotliwościach poniżej 300 Hz do usuwania naprężeń podczas kładzenia szyn [31].

Dzięki rozwojowi energoelektroniki możliwe stało się uzyskiwanie dużych częstotliwości przy stosunkowo niedużych nakładach finansowych. Zwiększenie częstotliwości powoduje, że zjawisko indukcji elektromagnetycznej jest szczególnie uwidacznione z uwagi na szybkość zmian pola magnetycznego. Dodatkowym atutem jest możliwość regulacji częstotliwości, co przekłada się na większe możliwości w zakresie sterowania pracą indukcyjnego urządzenia grzewczego. Nic więc dziwnego, że po roku 2000 pojawiły się nowe prace badawczo-rozwojowe nad zastosowaniem ogrzewania indukcyjnego rozjazdów kolejowych. Wśród tych prac wyróżniają się te prowadzone przez grupę badaczy skupionych wokół Profesor Elżbiety Szychty oraz Profesora Leszka Szychty. Badali oni możliwość indukcyjnego ogrzewania rozjazdów z zastosowaniem grzejnika indukcyjnego przymocowanego do opornicy, zazwyczaj na styku stopki i szynki [3,32,33,34,35,36] - rysunek 2.7. Taki sposób ogrzewania wzbudza prądy wirowe bezpośrednio w opornicy. W pracy [32] przedstawiono prosty model analityczny, w którym szyna została przybliżona

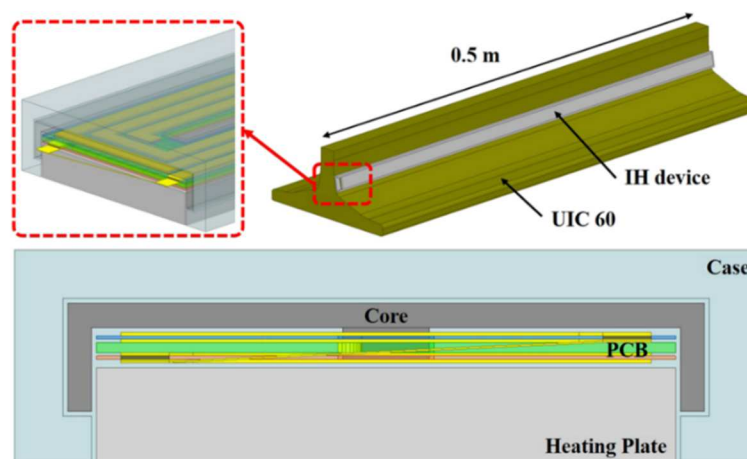
rozległą płytą. Następnie zbudowano realistyczny model szyny UIC-60 i przeprowadzono symulacje numeryczne dotyczące rozkładu pola magnetycznego. Z uwagi na to, że prądy wirowe indukują się bezpośrednio w szynie, wskazano na konieczność identyfikacji jej właściwości materiałowych, czego dokonano w pracy [33] w odniesieniu do szyny 60E1. Wyniki symulacji numerycznych zaprezentowano następnie w dość obszernej pracy [3]. W artykule [34] Autorzy przedstawili wyniki badań ogrzewania indukcyjnego rozjazdów kolejowych z zastosowaniem równoległego obwodu rezonansowego o stosunkowo małej częstotliwości od 50 do 950 Hz. Testowano różne wzbudniki umiejscowione na stopce szyny. Największą efektywność energetyczną uzyskano przy zastosowaniu wzbudnika nawiniętego na rdzeniu ferrytowym. Stwierdzono, że wyniki badań wskazują na przydatność metody indukcyjnej w ogrzewaniu indukcyjnym rozjazdów. W pracy [35] przedstawiono dość ogólnie wybrane zagadnienia związane z ogrzewaniem indukcyjnym w zakresie rozjazdów kolejowych. Podsumowano też wyniki dotychczasowych badań ze wzbudnikiem generującym prądy wirowe bezpośrednio w opornicy.



Rys. 2.7. Grzejnik indukcyjny montowany na stopce opornicy. Źródło [34]

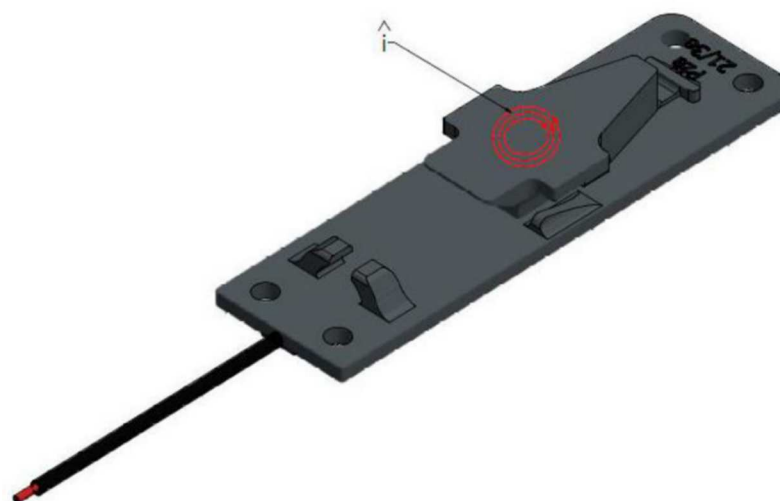
Ideę generowania prądów wirowych bezpośrednio w opornicy zaprezentowano także w pracach [37,38,39], które wpisują się w badania prowadzone w Korei Południowej. Rozpatrywano w nich wzbudnik w postaci cewki planarnej zatopionej w długiej płycie grzewczej przymocowanej do szynki szyny UIC60 (rysunek 2.8). Cewka zasilana była napięciem o częstotliwości 250 kHz, a moc urządzenia wynosiła mocy 200 W. Przeprowadzono analizę elektromagnetyczną oraz termiczną i stwierdzono duży potencjał tego rozwiązania w zakresie efektywności ogrzewania rozjazdów. Oprócz tej pracy warto także wymienić inne koreańskie prace, jak [22,40,41,42,43]. W artykule [22] rozpatrywano nagrzewanie

płaskiej płyty w zależności od częstotliwości i odległości z zastosowaniem falownika o wysokiej częstotliwości. Falownik umożliwiał pracę układu przy częstotliwości kilkudziesięciu kHz, a cały układ zasilany był energią elektryczną o parametrach sieciowych. W pracy [40] rozpatrywano prototyp grzałki indukcyjnej w postaci długiej cewki. Przeprowadzono również analizę elektromagnetyczną i termiczną za pomocą metody elementów skończonych. W pracy [41] analizowano efektywność ogrzewania rezystancyjnego oraz indukcyjnego. Grzejnik indukcyjny w postaci długiego paska mocowany był do szyjki opornicy tuż przy stopce. W pracy [42] rozpatrywano cewkę wykonaną w technologii drukowanej w postaci długiego paska mocowanego do szyjki opornicy. Rozwiązanie takie charakteryzuje się problemami z przegrzewaniem. Zaproponowano modyfikacje konstrukcyjne mające na celu usunięcie tej wady. Z kolei w artykule [43] zaproponowano poprawę skuteczności i niezawodności system ogrzewania rozjazdów, charakteryzujący się prostotą struktury oraz obniżonymi kosztami konserwacji i ewentualnej naprawy.



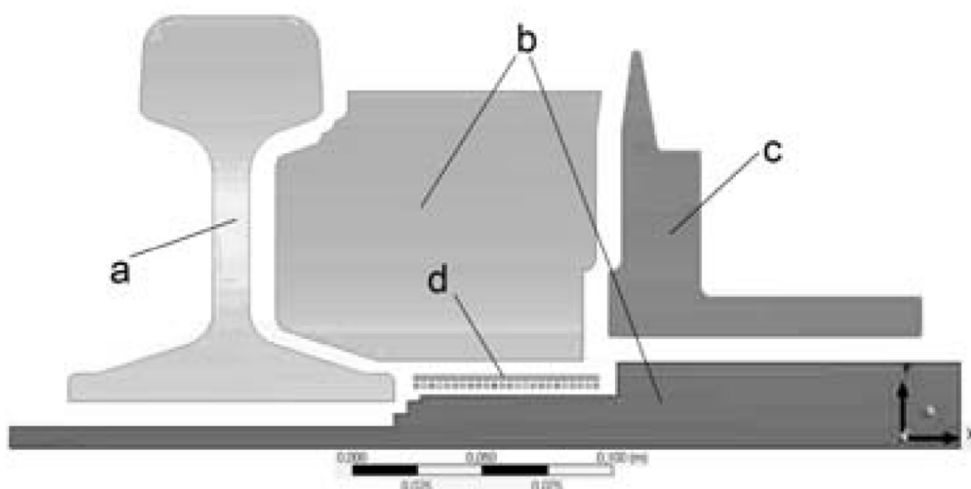
Rys. 2.8. Grzejnik indukcyjny montowany na szyjce opornicy. Źródło [37]

Oprócz indukcyjnych grzejników montowanych na opornicy i generujących bezpośrednio w niej prądy wirowe zaproponowano także ogrzewanie indukcyjne siodełek, na których spoczywa iglica - rys. 2.9. Ma to na celu zapobieganie przymarzaniu iglicy do siodełek. Do prac tych należą [12,36], a także patent [44] z 2018 roku. Przedstawiono w nich specjalnie skonstruowaną płytę ślizgową, pod którą zamontowane jest indukcyjne urządzenie grzewcze. W pracy [36] dokonano analizy pracy tego urządzenia w różnych temperaturach w komorze klimatycznej i badano dynamikę temperatury w wybranych punktach rozjazdu. Potwierdzono, że urządzenie indukcyjne pozwala na znacznie szybszą reakcję na zmienne warunki pogodowe. Do wad ogrzewania indukcyjnego siodełek należy jednak zaliczyć trudności w ewentualnej wymianie uszkodzonego modułu.



Rys. 2.9. Grzejnik indukcyjny montowany w siodełku. Źródło: [12]

Jeszcze inna koncepcja wykorzystania ogrzewania indukcyjnego pojawiła się w pracy [27], w której rozpatrywano umieszczenie urządzenia indukcyjnego w przestrzeni roboczej rozjazdu między siodełkami - rys. 2.10. Urządzenie takie składa się z cewki zamkniętej w metalowej obudowie, w której indukują się prądy wirowe, a więc inaczej niż w opisanych wcześniej pracach [3,32,33,34,35,36]. Do obudowy przytwierdzony jest radiator. Tak usytuowane urządzenie powoduje, że uzyskuje się zwiększenie przekazywania energii cieplnej w stosunku do stosowanego układu EOR. Badania nad tego rodzaju urządzeniem IOR podjęto także w tej rozprawie oraz zaprezentowano w pracach [20,45].



Rys. 2.10. Grzejnik indukcyjny montowany między iglicą a opornicą (a - opornica, b - lód, c - iglica, d – radiator IOR). Źródło [27]

Innym kierunkiem badań jest ulepszanie części energoelektronicznej zasilającej grzejnik indukcyjny. Przykładem może być praca [46], w której skupiono się na zmniejszeniu zakłóceń wprowadzanych do sieci zasilającej.

We wszystkich przedstawionych wyżej rozwiązaniach pojedynczy grzejnik lub ich niewielka liczba zasilana jest z osobnych inwerterów, co zwiększa koszt samego urządzenia IOR. Odmienne podejście rozpatrywano w Rosji. Zaproponowano tam zbiorcze zasilanie urządzeń indukcyjnych jednym inwerterem o większej mocy [47]. Wymaga to jednak zastosowania długich kabli przeznaczonych do dużych częstotliwości, co także nie jest pozbawione wad.

Podsumowując, można stwierdzić, że w ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania w zakresie wykorzystania zjawiska indukcji elektromagnetycznej do ogrzewania rozjazdów kolejowych, zwłaszcza w Polsce i Korei Południowej. Wynikać to może ze specyficznych uwarunkowań klimatycznych oraz chęci modernizacji infrastruktury kolejowej zgodnie ze współczesnymi dyrektywami w zakresie promowania technologii energooszczędnych. Urządzenia elektrycznego ogrzewania rozjazdów są energochłonne, więc wdrożenie nowego urządzenia, które spowoduje zmniejszenie zużycia energii elektrycznej, przyniesie znaczne korzyści. Będą to nie tylko korzyści finansowe poprzez zmniejszenie zużycia energii elektrycznej, ale również ekologiczne [48], a są to aspekty, które obecnie są bardzo pożądane [49].

W pracy skupiono się na analizie prototypowego urządzenia IOR zastosowanego do ogrzewania przestrzeni pomiędzy iglicą a opornicą rozjazdu. Układ taki został zabudowany na terenie PKP PLK S.A. w celu jego testowania (rys. 2.11, 2.12). Równoległe prototypowe urządzenie (IOR) zostało poddane szczegółowym badaniom laboratoryjnym na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej.

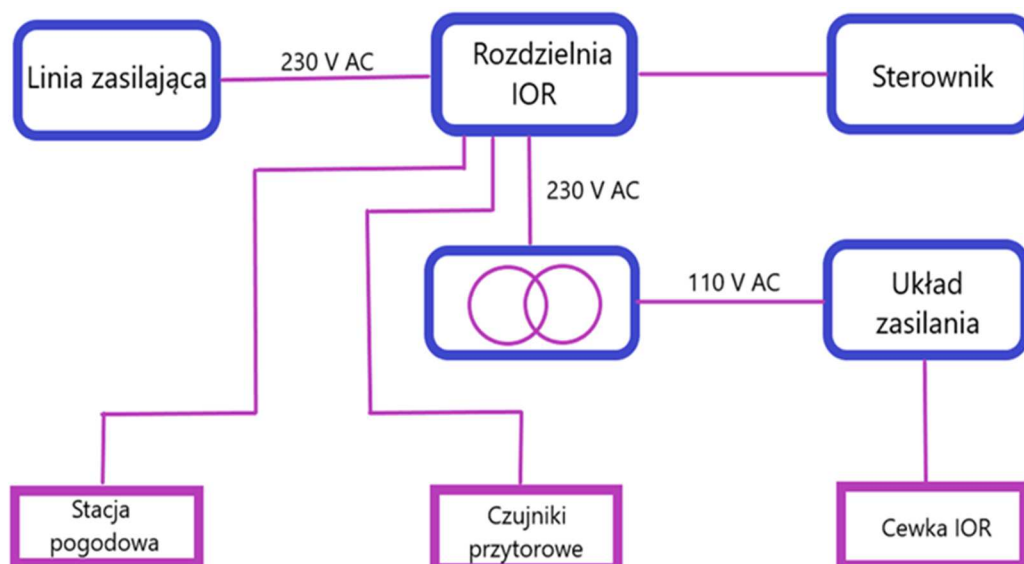


Rys. 2.11. Zabudowane elementy elektrycznego indukcyjnego ogrzewania rozjazdów – radiatory z układami zasilania i sterwania. Źródło: opracowanie własne.



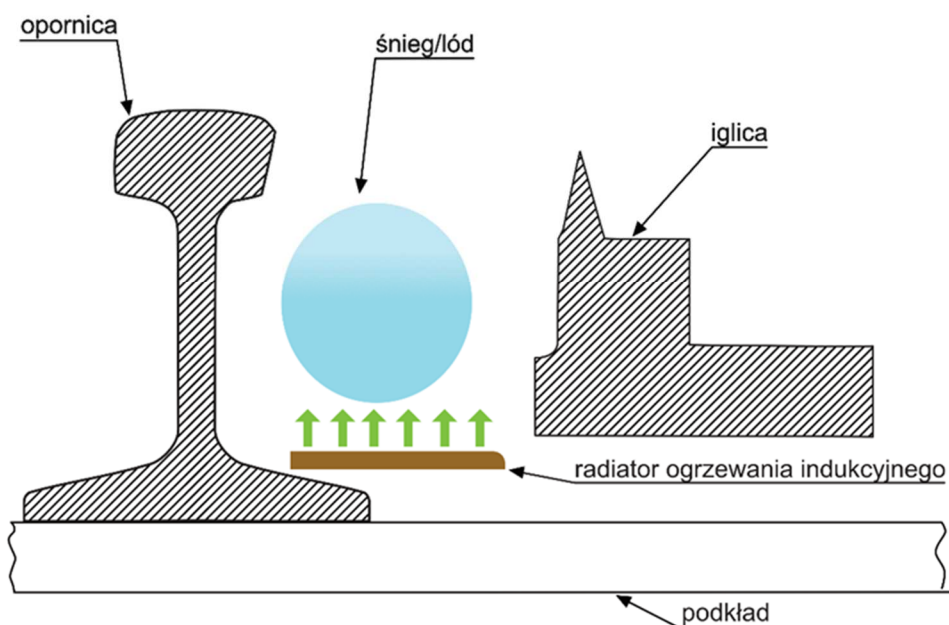
Rys. 2.12. Radiator IOR pomiędzy iglicą a opornicą. Źródło: opracowanie własne.

Podobnie jak urządzenie EOR, także i urządzenie IOR zasilane jest poprzez transformatory separacyjne z układem zasilania i sterowania (rys. 2.13). Różnicą jest to, że układ zasilania przetwarza prąd o częstotliwości 50 Hz na znacznie większą częstotliwość rzędu dziesiątek kHz, który następnie zasila grzejnik indukcyjny pokazany na rysunku 2.12.



Rys. 2.13. Schemat blokowy układu IOR. Źródło: opracowanie własne.

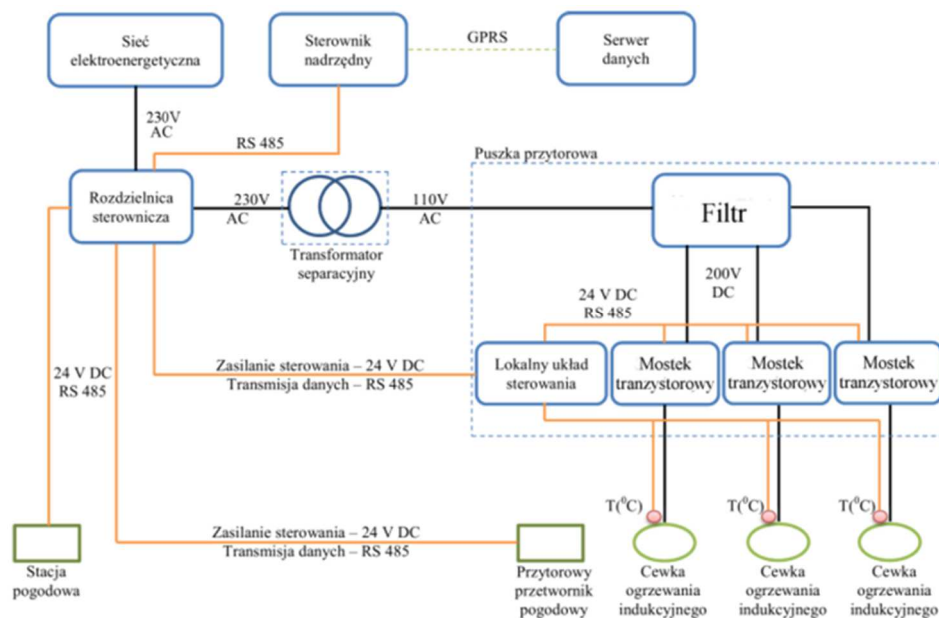
Nowatorskie rozwiązanie indukcyjnego ogrzewania rozjazdów przede wszystkim wprowadza ideę zastosowania ogrzewania przestrzeni pomiędzy iglicą a opornicą ze zmianą dystrybutora ciepła, który jest oddalony od stopki szyny (rys. 2.14).



Rys. 2.14. Dystrybucja ciepła pomiędzy iglicą a opornicą rozjazdu dla układu indukcyjnego. Źródło: opracowanie własne

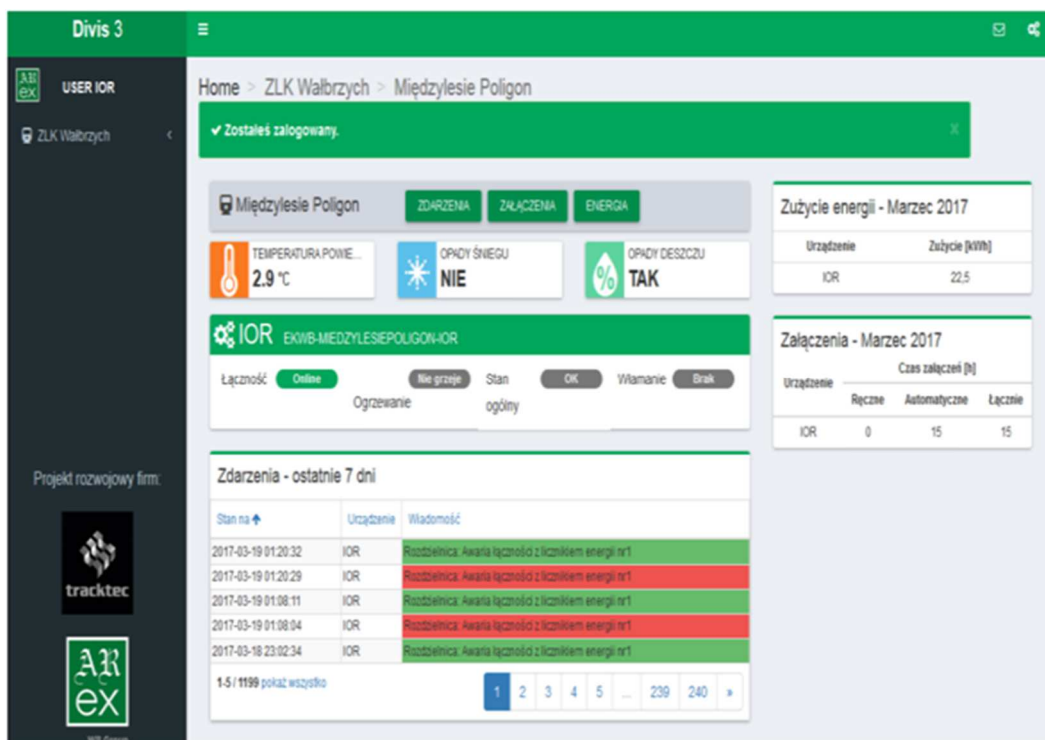
System z odizolowanym elementem grzejmym od stopki szyny powoduje zmianę dystrybucji ciepła w procesie wytapiania śniegu lub lodu, powodując wykorzystanie wytworzonego ciepła w sposób bardziej skuteczny (bezpośrednio w miejsca zalegania śniegu lub lodu pomiędzy iglicą a opornicą).

Schemat blokowy układu IOR przedstawiono na rysunku 2.15. Układ IOR umożliwia odczyt danych ze sterownika nadrzędnego, które są przekazywane do serwera danych. Serwer danych umożliwia zdalny nadzór oraz zmianę ustawień układu IOR poprzez połączenie internetowe z jednostką lokalną oraz dedykowaną aplikacją (rys. 2.16). Aplikacja pozwala m.in. na odczyt warunków pogodowych, załączenie/wyłączenie ogrzewania rozjazdów, obsługę sytuacji alarmowych oraz odczyt innych danych (rys. 2.17).

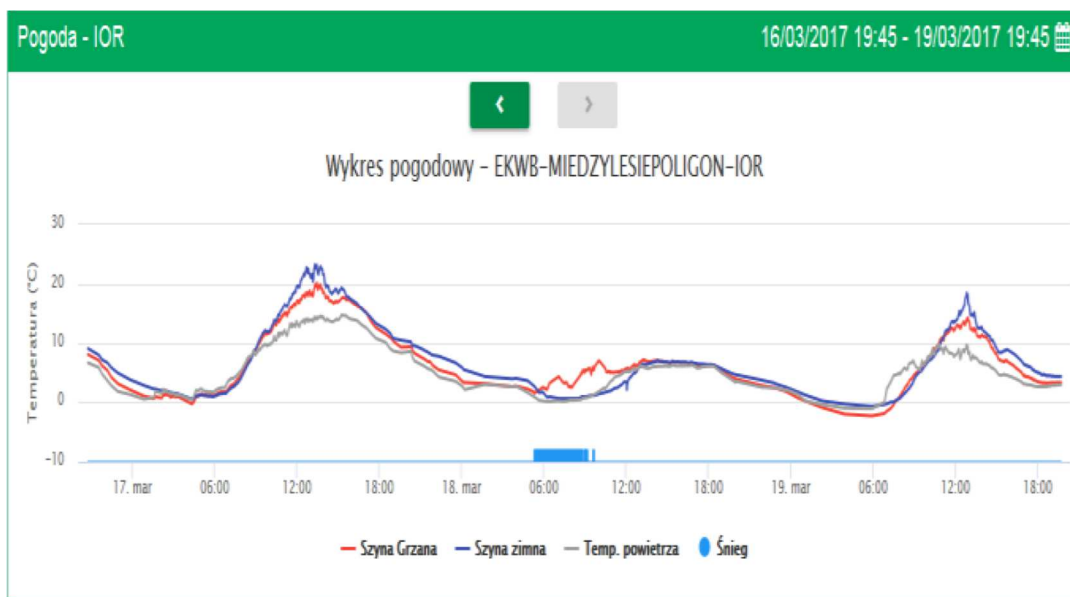


Rys. 2.15. Schemat blokowy układu IOR. Źródło: [12]

Układ IOR umożliwia odczyt danych ze sterownika nadrzędnego, które są przekazywane do serwera danych. Serwer danych umożliwia poprzez połączenie internetowe z jednostką lokalną oraz dedykowane aplikacje (rys. 2.16) zdalny nadzór oraz zmianę ustawień układu IOR. Aplikacja umożliwia m.in. odczyt warunków pogodowych, załączenie/wyłączenie ogrzewania rozjazdów, obsługę sytuacji alarmowych oraz odczyt innych danych (rys. 2.17).



Rys. 2.16. Widok strony głównej dedykowanej aplikacji układu IOR. Źródło: [12]



Rys. 2.17. Odczytane parametry temperatury oraz warunków atmosferycznych z aplikacji układu IOR. Źródło: [12]

Radiatory prototypowego układu IOR zabudowane pomiędzy iglicą a opornicą zostały przedstawione na rysunku 2.18. W testowanym rozjeździe zabudowano 18 sztuk radiatorów IOR. Układ zasilania i sterowania został zabudowany przy radiatorze IOR, który został zamocowany do stopki szyny od strony zewnętrznej rozjazdu.



Rys. 2.18. Zabudowane radiatory układu IOR pomiędzy iglicą a opornicą z układem zasilania i sterowania (1 - układ zasilania i sterowania, 2 - siodełko, 3 - radiator IOR). Źródło: opracowanie własne

3. SYMULACJE NUMERYCZNE DOTYCZĄCE WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNYCH GRZEJNIKA IOR

3.1. Rozważania jakościowe

Urządzenie indukcyjnego ogrzewania rozjazdów (IOR) opisane w rozdziale 2 będące przedmiotem badań poddano rozważaniom w zakresie poprawy efektywności energetycznej. Urządzenie to posiada cewkę, która została zabudowana w metalowej obudowie połączonej z aluminiowym radiatorem. Z obwodowego punktu widzenia cewka wraz z jej obudową i radiatorem stanowi dla prądu sinusoidalnego impedancję $\underline{Z} = R + jX$. Jeżeli cewka pracuje w stanie skompensowania reaktancji poprzez zastosowanie odpowiednio dobranego kondensatora, moc czynna pobierana przez urządzenie wynosi

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3.1)$$

gdzie U jest wartością skuteczną napięcia zasilania. Rezystancja jest proporcjonalna do długości drogi prądu, a więc do liczby zwojów i rozmiarów urządzenia, a odwrotnie proporcjonalna do konduktywności elektrycznej γ elementów urządzenia i efektywnego przekroju poprzecznego. Jeśli przyjąć, że cewka nawinięta jest przewodem typu lica, to wzrost rezystancji uzwojeń z tytułu zjawiska naskórkowości oraz zjawiska zbliżenia można w rozważaniach jakościowych pominąć. Wtedy istotny wkład do rezystancji wnosi obudowa urządzenia, w której indukują się prądy wirowe. Pole wnika do obudowy na głębokość

$$\delta_o = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_o \mu_{r_o} \gamma_o}} \quad (3.2)$$

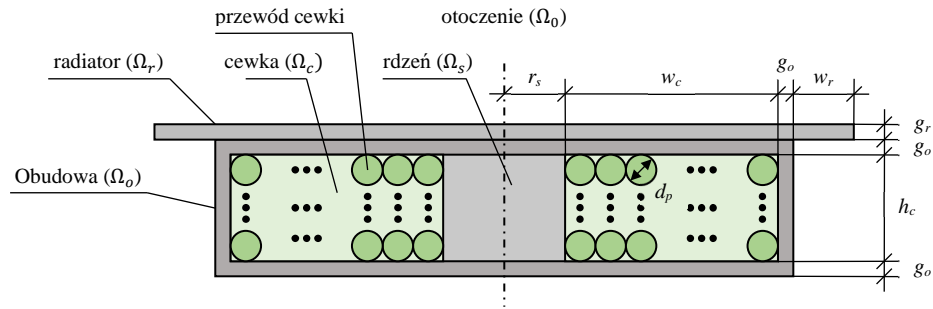
gdzie f jest częstotliwością, μ_{r_o} jest przenikalnością magnetyczną względną obudowy, a γ_o - konduktywnością elektryczną obudowy. Przybliżając obudowę jako kołową płytę o średnim promieniu r_o , można pokusić się o oszacowanie rezystancji stawianej prądom wirowym:

$$R_o \approx \frac{2\pi r_o}{\gamma_o \delta_o 2r_o} \sim \frac{1}{\gamma_o \delta_o} \sim \sqrt{\frac{f \mu_o \mu_{r_o}}{\gamma_o}} \quad (3.3)$$

Należy zatem oczekiwać, że rezystancja rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości i przenikalności magnetycznej obudowy, a maleje wraz ze wzrostem konduktywności obudowy. W warunkach zasilania napięciem o stałej wartości skutecznej oznacza to, że moc czynna pobierana przez urządzenie maleje ze wzrostem częstotliwości i przenikalności magnetycznej, a rośnie wraz ze wzrostem konduktywności obudowy.

3.2. Model obliczeniowy

W celu uzyskania dokładniejszych wyników należy rozważyć model połowy urządzenia IOR. W tym rozdziale skupiono się na właściwym elemencie grzewczym - jego przekrój poprzeczny przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Geometria modelu grzejnika indukcyjnego.
Źródło: opracowanie własne.

Do celów obliczeniowych przyjęto następujące założenia konstrukcyjne:

- toroidalna cewka nawinięta jest przewodem miedzianym o średnicy d_p w n_h warstwach w kierunku osiowym oraz n_w warstwach w kierunku radialnym;
- promień wewnętrzny cewki wynosi r_s , natomiast promień zewnętrzny wynika z liczby warstw n_w oraz średnicy przewodu: $r_z = r_s + n_w d_p$;
- wysokość cewki wynika z liczby warstw w kierunku osiowym i średnicy przewodu: $h_c = n_h d_p$;
- obudowa ma grubość g_o ;
- radiator ma grubość g_r , a jego nawis poza obudowę wynosi w_r ;
- radiator wykonany jest z aluminium;
- obudowa wykonana jest z materiału przewodzącego o stałych parametrach: przewodności elektrycznej γ_o oraz przenikalności magnetycznej względnej μ_{ro} ;
- cewka wiezie prąd sinusoidalny o częstotliwości f z przedziału od 10 do 100 kHz;
- parametry materiałowe są niezależne od pól;
- konstrukcja umieszczona jest w powietrzu z dala od innych elementów przewodzących (z uwagi na duże ekranowanie pola przez przewodzącą obudowę założenie to nie ma istotnego wpływu na wyniki obliczeń).

Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych. W rzeczywistym grzejniku IOR toroidalna cewka umieszczona jest w podłużnej obudowie, do której przytwierdzony jest radiator. Wykonanie obliczeń symulacyjnych w tego rodzaju geometrii wymaga zastosowania modelu trójwymiarowego, co z kolei skutkowałoby bardzo czasochłonnymi obliczeniami. Należy bowiem zauważyć, że rozmiar elementu skończonego musi być mniejszy niż głębokość wnikania fali, która dla rozpatrywanych częstotliwości i wartości parametrów

materiałowych obudowy jest rzędu 0,1 mm. Dlatego zdecydowano się na dwa następujące uproszczenia prowadzące do znacznego zmniejszenia liczby elementów skończonych i do istotnego przyspieszenia obliczeń numerycznych:

- z uwagi na toroidalny kształt cewki założono, że cała konstrukcja ma symetrię osiową - założenie to oznacza pominięcie prądów wirowych indukowanych w częściach obudowy znacznie oddalonych od cewki, ale pozwala na wykonanie obliczeń w osiowosymetrycznym układzie 2D (r, z);
- cewkę modelowano jako blok typu *stranded*, to znaczy jej zwoje były modelowane w sposób zastępczy, a nie oddzielnie - jest to usprawiedliwione tym, że przy założeniu nawinięcia cewki przewodem typu lica wpływ zjawiska wypierania i zbliżenia jest zminimalizowany.

Dalsze założenia upraszczające są następujące:

- pomija się prądy przesunięcia z uwagi na to, że w zakresie częstotliwości do 100 kHz długość fali w powietrzu (otoczeniu konstrukcji) wynosi ponad 3 km, co pozwala na pominięcie zjawisk falowych w otoczeniu grzejnika;
- zakłada się także, że brak jest ładunku nadmiarowego (urządzenie nie jest naładowane elektrycznie);
- pomija się wpływ sprzężenia temperaturowego (parametry niezależne od temperatury) - wynika to z tego, że w tych symulacjach skupiono się na wpływie różnych parametrów konstrukcyjnych na impedancję grzejnika, natomiast symulacje dotyczące rozkładu temperatury znajdują się w rozdziale 4.

Przyjęte wyżej założenia pozwalają sformułować równania Maxwella [50,51] w postaci zespolonej:

$$\nabla \times \underline{\mathbf{H}} = \underline{\mathbf{J}} \quad (3.4)$$

$$\nabla \times \underline{\mathbf{E}} = -j\omega \underline{\mathbf{B}} \quad (3.5)$$

$$\nabla \cdot \underline{\mathbf{B}} = 0 \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot \underline{\mathbf{D}} = 0 \quad (3.7)$$

gdzie $\underline{\mathbf{H}}$ - wektor natężenia pola magnetycznego, $\underline{\mathbf{B}}$ - wektor indukcji elektrycznej, $\underline{\mathbf{E}}$ - wektor natężenia pola elektrycznego, $\underline{\mathbf{D}}$ - wektor indukcji elektrycznej, $\underline{\mathbf{J}}$ - wektor gęstości prądów przewodzenia, $\omega = 2\pi f$ - pulsacja, j - jednostka urojona, a podkreślenie oznacza fazor zespolony danej wielkości. Równania te uzupełniają się o związki materiałowe:

$$\underline{\mathbf{B}} = \mu \underline{\mathbf{H}} \quad (3.8)$$

$$\underline{\mathbf{D}} = \epsilon \underline{\mathbf{E}} \quad (3.9)$$

$$\underline{\mathbf{J}} = \gamma \underline{\mathbf{E}} \quad (3.10)$$

gdzie μ - przenikalność magnetyczna ośrodka, ϵ - przenikalność elektryczna ośrodka, γ - przewodność elektryczna ośrodka. Równania (3.6) i (3.5) pozwalają na wyrażenie pól $\underline{\mathbf{B}}$ i $\underline{\mathbf{E}}$ za pomocą pary potencjałów $\underline{\mathbf{A}}$ - $\underline{\mathbf{V}}$ w następujący sposób

$$\underline{\mathbf{B}} = \nabla \times \underline{\mathbf{A}} \quad (3.11)$$

$$\underline{\mathbf{E}} = -j\omega\underline{\mathbf{A}} - \nabla V \quad (3.12)$$

Po wstawieniu uwzględnieniu tych wyrażeń oraz wykorzystaniu zależności (3.8) i (3.10) we wzorach (3.4) i (3.7) otrzymuje się

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \underline{\mathbf{A}} \right) = -j\omega\gamma\underline{\mathbf{A}} - \gamma\nabla V \quad (3.13)$$

$$\nabla \cdot (-j\omega\epsilon\underline{\mathbf{A}} - \epsilon\nabla V) = 0 \quad (3.14)$$

Uwzględnienie warunku stałości μ , ϵ i γ , a także tożsamości wektorowej

$$\nabla \times (\nabla \times \underline{\mathbf{A}}) = \nabla(\nabla \cdot \underline{\mathbf{A}}) - \nabla^2 \underline{\mathbf{A}} \quad (3.15)$$

pozwała na zapisanie równań (3.13) i (3.14) w postaci

$$\nabla^2 \underline{\mathbf{A}} - j\omega\mu\gamma\underline{\mathbf{A}} = \nabla(\nabla \cdot \underline{\mathbf{A}} + \mu\gamma V) \quad (3.16)$$

$$\nabla^2 V = j\omega\nabla \cdot \underline{\mathbf{A}} \quad (3.17)$$

Z uwagi na przyjętą symetrię osiową pole $\underline{\mathbf{A}}$ będzie mieć tylko składową kątową \underline{A}_θ zależną od współrzędnych r i z . Ponieważ w układzie cylindrycznym

$$\nabla \cdot \underline{\mathbf{A}} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \underline{A}_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial \underline{A}_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \underline{A}_z}{\partial z} \quad (3.18)$$

to z powyższego wynika, że $\nabla \cdot \underline{\mathbf{A}} = 0$. Zatem równania (3.16) i (3.17) przyjmują postać

$$\nabla^2 \underline{\mathbf{A}} - j\omega\mu\gamma\underline{\mathbf{A}} = \mu\gamma\nabla V \quad (3.19)$$

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3.20)$$

Ponieważ założono nawinięcie cewki przewodem typu lica, to można przyjąć, iż gęstość prądu w przewodach cewki jest stała i wynosi \underline{J}_{c0} , a wtedy z równań (3.10) i (3.12) otrzymuje się

$$\gamma_c \nabla V_c = -j\omega\gamma_c \underline{\mathbf{A}}_c - \underline{J}_{c0} \quad (3.21)$$

co pozwala przekształcić równanie (3.46) w obszarze cewki do postaci quasistatycznej:

$$\nabla^2 \underline{\mathbf{A}} = -\mu_c \underline{J}_{c0} \quad (3.22)$$

W obszarze poza cewką mogą istnieć jedynie indukowane prądy wirowe, których gęstość określona jest wzorem

$$\underline{J}_w = -j\omega\gamma \underline{\mathbf{A}} \quad (3.23)$$

dlatego też należy jest przyjąć, że potencjał skalarny V jest tam stały. Końcowe równania w poszczególnych obszarach mają postać:

- w obszarze cewki (indeks c):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \underline{A}_{c\theta}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \underline{A}_{c\theta}}{\partial z^2} - \frac{\underline{A}_{c\theta}}{r^2} = -\mu_c \underline{J}_{c0} \quad (3.24)$$

- w obszarze rdzenia cewki (indeks s):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \underline{A}_{s\theta}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \underline{A}_{s\theta}}{\partial z^2} - \frac{\underline{A}_{s\theta}}{r^2} - \Gamma_s^2 \underline{A}_{s\theta} = 0 \quad (3.25)$$

- w obszarze obudowy (indeks o):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \underline{A}_{o\theta}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \underline{A}_{o\theta}}{\partial z^2} - \frac{\underline{A}_{o\theta}}{r^2} - \Gamma_o^2 \underline{A}_{o\theta} = 0 \quad (3.26)$$

- w obszarze radiatora (indeks r):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \underline{A}_{r\theta}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \underline{A}_{r\theta}}{\partial z^2} - \frac{\underline{A}_{r\theta}}{r^2} - \Gamma_r^2 \underline{A}_{r\theta} = 0 \quad (3.27)$$

- w otoczeniu (indeks 0):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \underline{A}_{0\theta}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \underline{A}_{0\theta}}{\partial z^2} - \frac{\underline{A}_{0\theta}}{r^2} = 0 \quad (3.28)$$

W równaniach tych wprowadzono oznaczenia

$$\Gamma_o^2 = j\omega\mu_o\gamma_o \quad (3.29)$$

$$\Gamma_r^2 = j\omega\mu_r\gamma_r \quad (3.30)$$

$$\Gamma_s^2 = j\omega\mu_s\gamma_s \quad (3.31)$$

Równania (3.24)-(3.28) należy uzupełnić o warunki ciągłości pola oraz o warunki w nieskończoności. Ciągłość pola magnetycznego na granicy dwóch obszarów wymaga równości składowych stycznych natężenia magnetycznego i składowych normalnych indukcji magnetycznej. Ciągłość składowych stycznych pola magnetycznego na granicy obszar k -tego i l -tego prowadzi do następującej zależności na tej powierzchni granicznej:

$$\frac{1}{\mu_k} \frac{\partial \underline{A}_{\theta k}}{\partial n} = \frac{1}{\mu_l} \frac{\partial \underline{A}_{\theta l}}{\partial n}, \quad k, l \in \{c, s, o, r, 0\} \quad (3.32)$$

gdzie μ_k i μ_l są przenikalnościami magnetycznymi tych obszarów, zaś $\frac{\partial}{\partial n}$ oznacza różniczkowanie w kierunku prostopadłym do brzegu. Ciągłość składowej normalnej indukcji magnetycznej wymaga z kolei, aby

$$\underline{A}_{\theta k} = \underline{A}_{\theta l} + \underline{C}_{kl}, \quad k, l \in \{c, s, o, r, 0\} \quad (3.33)$$

gdzie w rozpatrywanym przypadku stała \underline{C}_{kl} może być przyjęta jako zero. Ponadto w nieskończoności należy przyjąć, że pole zanika, czyli

$$\underline{A}_{0\theta}(\infty) = 0 \quad (3.34)$$

Po rozwiązaniu równań (3.24)-(3.34) można wyznaczyć impedancję układu. Napięcie na cewce można wyznaczyć korzystając z wyrażenia (3.21) podzielonego przez γ_c . W rozpatrywanych warunkach upraszczających napięcie występujące na zwoju cewki leżącym na współrzędnych (r, z) wynosi

$$\begin{aligned} \underline{U}_{r,z} &= \int_0^{2\pi} \left(-\nabla_{\underline{V}_c}(r, z) \right)_{\theta} r d\theta = \int_0^{2\pi} j\omega \underline{A}_{c\theta}(r, z) r d\theta + \int_0^{2\pi} \frac{J_{c0}}{\gamma_c} r d\theta \\ &= j\omega \underline{A}_{c\theta}(r, z) r 2\pi + \frac{J_{c0}}{\gamma_c} r 2\pi \end{aligned} \quad (3.35)$$

natomiast całkowite napięcie na cewce równa się sumie napięć na poszczególnych zwojach, czyli

$$\underline{U}_c = \sum_{i=1}^N \underline{U}_{r_i, z_i} \quad (3.36)$$

gdzie $N = n_h n_w$ jest liczbą zwojów cewki. Mając założony prąd cewki \underline{I}_c , można obliczyć impedancję całego układu

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}_c}{\underline{I}_c} \quad (3.37)$$

Znajomość pól pozwala także znaleźć energię cieplną wydzielaną w jednostce czasu w poszczególnych elementach konstrukcyjnych. Dla obudowy otrzymuje się

$$P_o = \iiint_{\Omega_0} \frac{\underline{J}_o \cdot \underline{J}_o^*}{\gamma_o} d\Omega = \frac{2\pi}{\gamma_o} \iint_{S_o} |\underline{J}_o|^2 r dr dz \quad (3.38)$$

gdzie

$$\underline{J}_o = -j\omega\gamma_o \underline{A}_{c\theta} \quad (3.39)$$

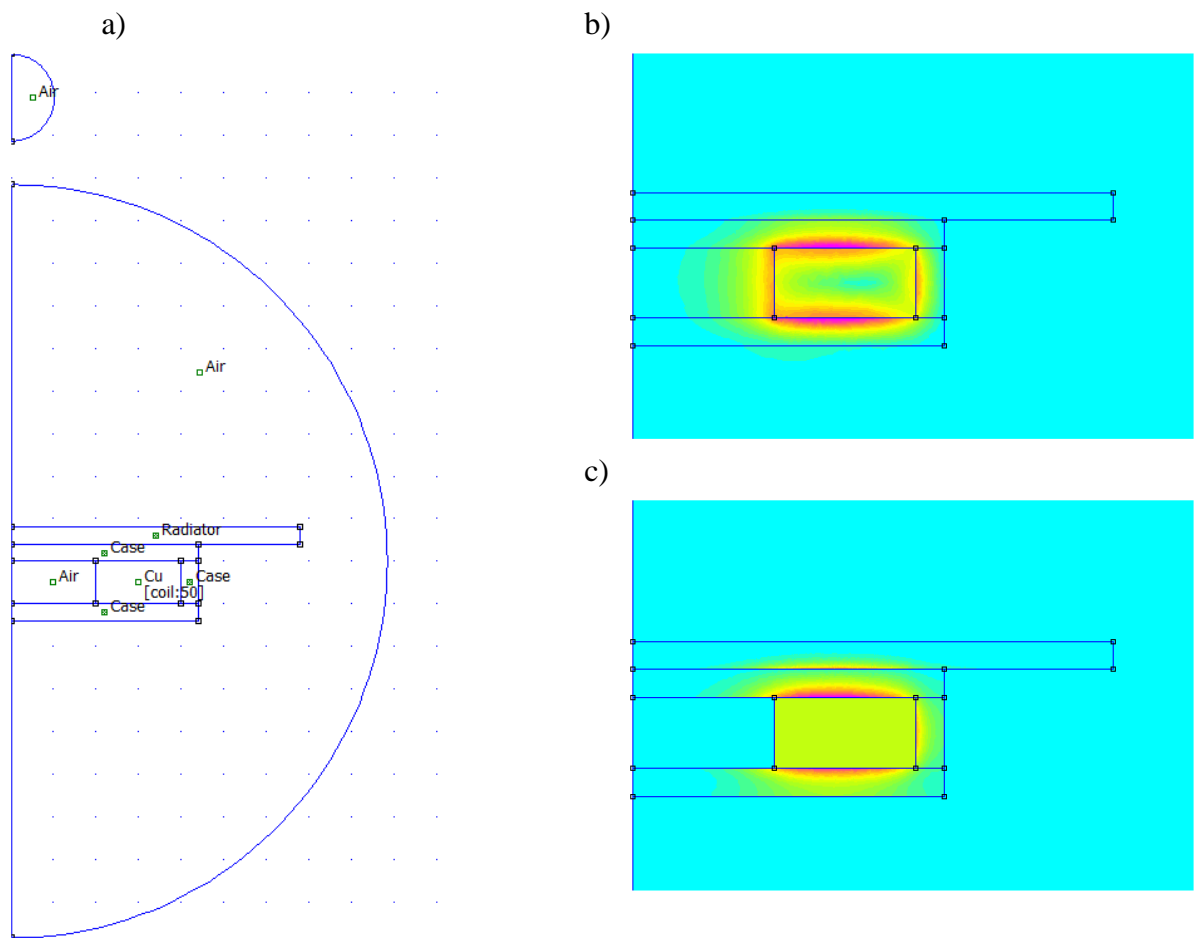
jest składową kątową gęstości prądów wirowych w obudowie.

3.3. Wyniki symulacji numerycznych

3.3.1. Implementacja modelu

Powyższy model obliczeniowy został zaimplementowany w darmowym programie FEMM 4.2, który wykorzystuje metodę elementów skończonych. Zaletą programu jest jego stosunkowa prostota, możliwość automatyzacji obliczeń dla różnych wariantów, szybkość działania i brak ograniczeń spotykanych często w różnych darmowych programach. W celu zautomatyzowania obliczeń napisano skrypt obliczeniowy w języku Lua, który pozwala w sposób programowy łatwo budować konfigurację obliczeniową, wykonać obliczenia dla wielu wariantów obliczeniowych i zapisać wyniki obliczeń do pliku. Rysunek 3.2a przedstawia widok przykładowej konfiguracji obliczeniowej, natomiast rysunki 3.2b i 3.2c przedstawiają odpowiadający obraz pola magnetycznego oraz obraz pola gęstości prądu.

Wykonano szereg symulacji numerycznych mających na celu zbadanie wpływu różnych parametrów modelu na impedancję, a zwłaszcza na rezystancję, której wartość zgodnie ze wzorem (3.28) determinuje energię cieplną wydzielaną w grzejniku. Badano wpływ liczby warstw n_h i n_w , grubości obudowy g_0 , materiału obudowy oraz częstotliwości. Początkowe symulacje uwzględniały obecność radiatora, jednak wartość wydzielanej w nim energii była tak znikoma, że w dalszych symulacjach zrezygnowano z jego obecności w celu zredukowania nakładu obliczeń. Uproszczenie takie jest uzasadnione tym, że skutek ekranowania pola przez obudowę prądy wirowe indukowane w radiatorze są w praktyce pomijalnie małe, a więc jego wpływ na impedancję jest bardzo nieznaczny. Jest to zgodne z przeznaczeniem radiatora - jego zadaniem jest odbiór ciepła z obudowy i jego rozpraszanie.



Rys. 3.2. Widok z programu FEMM: a) konfiguracja obliczeniowa, b) wartość maksymalna indukcji magnetycznej (kolor czerwony odpowiada wartości największej), c) wartość maksymalna gęstości prądu (kolor czerwony odpowiada wartości największej). Źródło: opracowanie własne.

3.3.2. Wpływ liczby i ułożenia zwojów na impedancję cewki

Wykonano symulacje dla liczby warstw $n_h = 1, 2, \dots, 10$ oraz $n_w = 5, 10, 15, 20, 25, 30$ dla częstotliwości $f = 40$ kHz oraz konfiguracji materiałowych obudowy podanych w tabeli 3.1. Parametry te obrano tak, że konfiguracje M1 oraz M4 odpowiadają obudowie aluminiowej, M2 oraz M5 - obudowie stalowej niemagnetycznej, a M3 i M6 - obudowie stalowej i magnetycznej. Ponadto w wersjach M1, M2 i M3 rdzeń cewki wypełniony jest materiałem dielektrycznym, zaś w przypadku M4, M5 i M6 - rdzeń jest materiałem przewodzącym o parametrach materiałowych takich jak obudowa. Pozostałe parametry były stałe i równe: $r_s = 10$ mm, $g_o = 2$ mm, $d_p = 1$ mm, radiator nieuwzględniony.

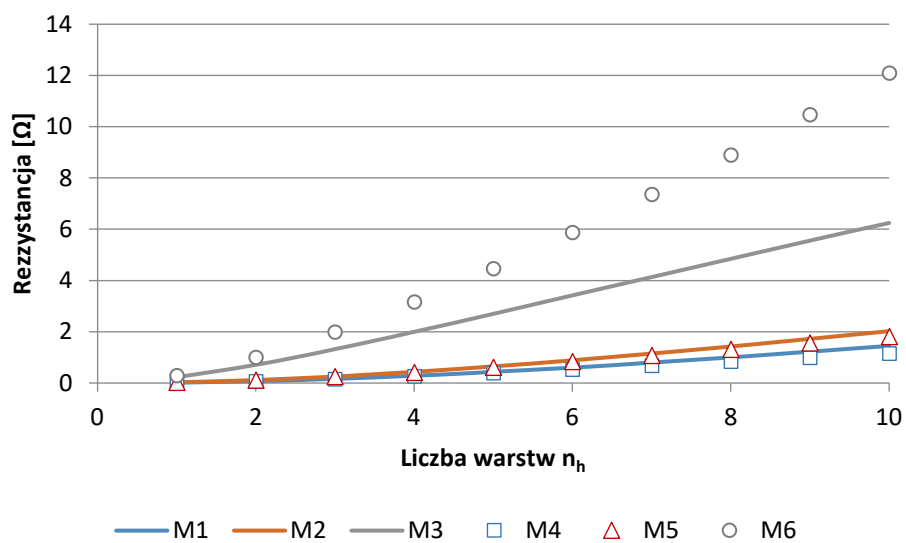
Tabela 3.1. Warianty materiałowe obudowy. Źródło: opracowanie własne.

Oznaczenie	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Konduktywność γ_0 , MS/m	37	5	5	37	5	5
Przenikalność względna, μ_{r0}	1	1	100	1	1	100
Rdzeń	= powietrze	= powietrze	= powietrze	= obudowa	= obudowa	= obudowa

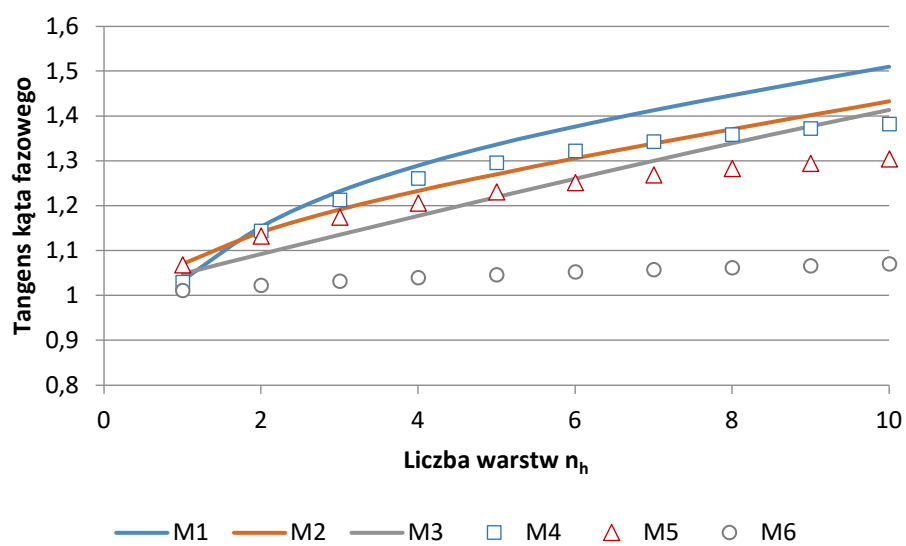
Rysunek 3.3a przedstawia rezystancję, a rysunek 3.3b tangens kąta fazowego impedancji w funkcji n_h dla $n_w = 15$ oraz $f = 40$ kHz. Zgodnie z oczekiwaniem rezystancja rośnie wraz ze wzrostem liczby zwojów. Konfiguracje materiałowe M1 i M4 dają praktycznie taką samą rezystancję, choć ta dla M4 jest nieco mniejsza. Podobnie konfiguracje materiałowe M2 i M5. Z kolei M3 i M6 dają podobne wartości rezystancji, ale wyraźnie ta dla M6 jest większa niż ta dla M3. Oznacza to, że obecność rdzenia przewodzącego, lecz nieferromagnetycznego daje praktycznie taką samą rezystancję, jak rdzeń nieprzewodzący, natomiast rdzeń ferromagnetyczny i przewodzący (M6) powoduje wyraźnie zwiększenie rezystancji. Tangens kąta fazowego wynosi nieco ponad 1, a więc wartość reaktancji jest nieznacznie większa niż wartość rezystancji. Warto zauważyć, że obecność rdzenia przewodzącego powoduje zmniejszenie tangensa kąta impedancji, a więc i reaktancji, w stosunku do przypadku, gdy rdzeń jest nieprzewodzący.

Na rysunku 3.4a pokazano wartość rezystancji, a na rysunku 3.4b - wartość tangensa kąta fazowego w zależności od liczby zwojów $N = n_w n_h$ dla $f = 40$ kHz. Poszczególne linie tego samego koloru odpowiadają wartościom dla różnej liczby warstw n_w . Potwierdzenie znajdują obserwacje poczynione na podstawie rysunku 3.3. Ponadto rysunek 3.4 pozwala przeanalizować wpływ sposobu uwarstwienia cewki na rezystancję i tangens kąta fazowego. Na rysunku 3.4a linie odpowiadające różnej liczbie warstw n_w - w przybliżeniu się pokrywają, a więc dla rzeczywistego urządzenia ważna jest raczej tylko wypadkowa liczba zwojów N niż sposób ich rozdzielania na warstwy poziome i pionowe. Sytuacja jest odmienna w przypadku kąta fazowego, zwłaszcza dla konfiguracji M1, M2, M3. Rodziny linii odpowiadające różnej liczbie warstw n_w są wyraźnie rozdzielone. Mała liczba warstw n_w skutkuje znacznie większym kątem fazowym n_w . Aby ograniczyć reaktancję zachowując w przybliżeniu rezystancję na tym samym poziomie, korzystniej jest zastosować cewkę z większą liczbą warstw w kierunku radialnym n_w , a mniejszą w kierunku osiowym n_h przy stałym iloczynie n_h, n_w .

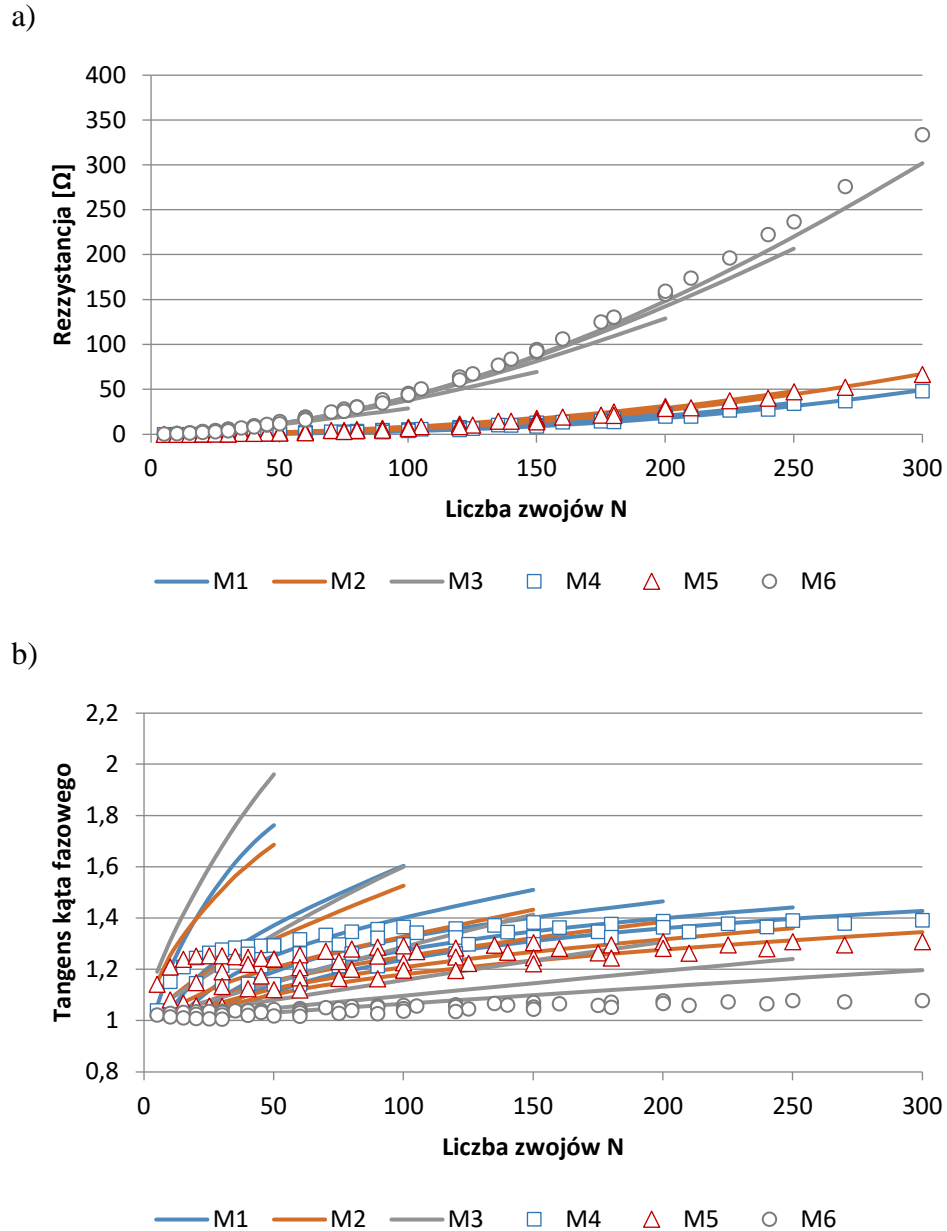
a)



b)



Rys. 3.3. Wartość rezystancji (a) oraz tangensa kąta fazowego impedancji (b) dla $n_w = 15$ oraz $f = 40$ kHz. Źródło: opracowanie własne.

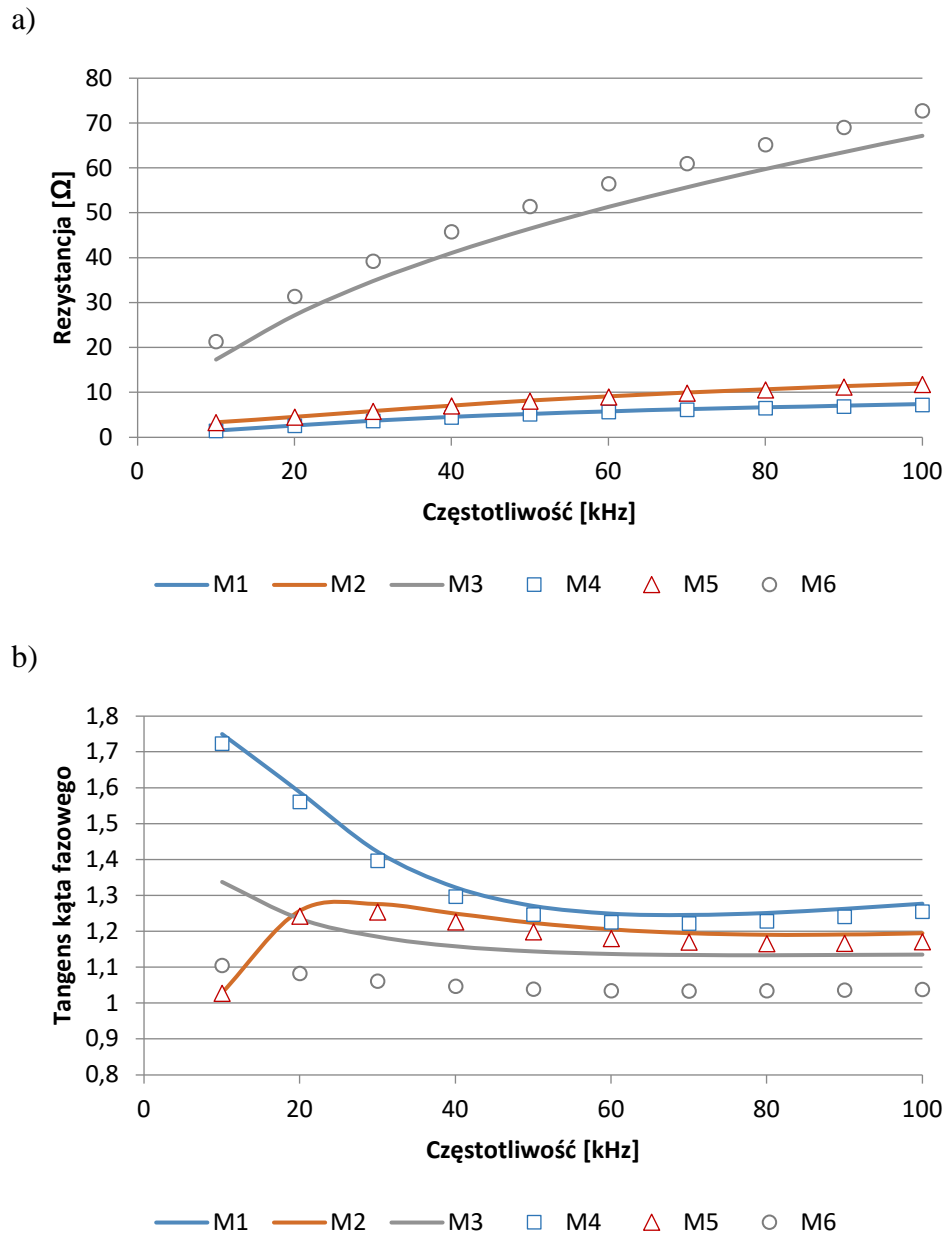


Rys. 3.4. Wartość rezystancji (a) oraz tangensa kąta fazowego impedancji (b) dla $f = 40$ kHz i liczby warstw $n_h = 1, 2, \dots, 10$ oraz $n_w = 5, 10, \dots, 30$. Źródło: opracowanie własne.

3.3.3. Wpływ częstotliwości pracy na impedancję cewki

Obliczenia wartości rezystancji oraz tangensa kąta fazowego impedancji wykonano dla częstotliwości $f = 10, 20, \dots, 100$ kHz. Rozpatrywano zestawy materiałowe podane w tabeli 3.1. Pozostałe parametry były stałe i równe: $n_h = 5$, $n_w = 20$, $r_s = 10$ mm, $g_o = 2$ mm, $d_p = 1$ mm, radiator nieuwzględniony. Rysunek 3.5 przedstawia wartość rezystancji (rys. 3.5a) i tangensa kąta fazowego (rys. 3.5b) w funkcji częstotliwości dla różnych materiałów. Zgodnie z przewidywaniami rezystancja rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości. Warianty M1 i M4

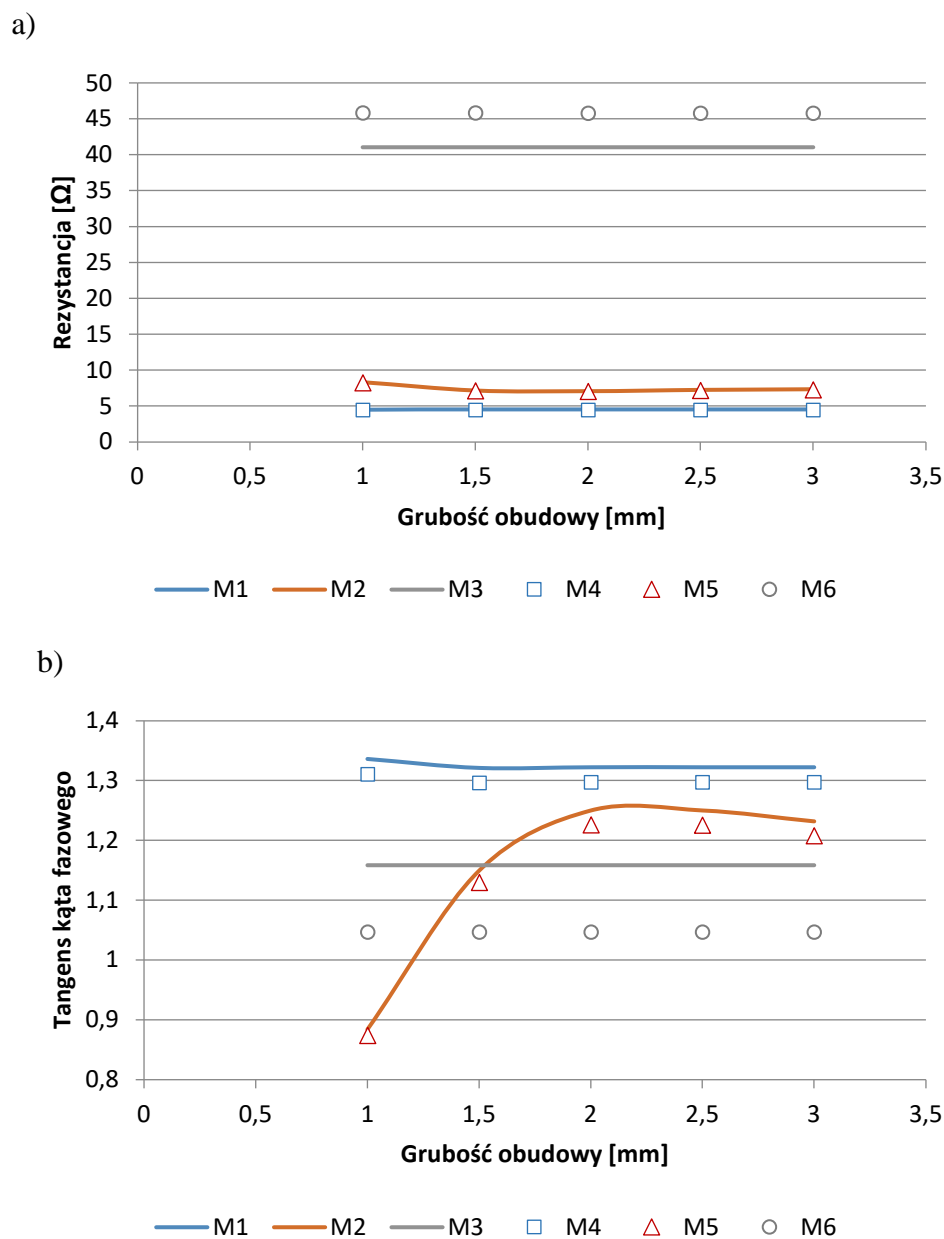
oraz M2 i M5 dają zbliżone wartości rezystancji. Wariant M6 daje rezystancję wyraźnie większą niż wariant M3.



Rys. 3.5. Wartość rezystancji (a) oraz tangensa kąta fazowego impedancji (b) w funkcji częstotliwości dla $n_h = 5$, $n_w = 20$, $r_s = 10$ mm, $g_o = 2$ mm. Źródło: opracowanie własne.

3.3.4. Wpływ grubości obudowy na impedancję cewki

Obliczenia wykonano dla grubości obudowy $g_o = 1, 1.5, 2, 2.5, 3$ mm dla częstotliwości $f = 40$ kHz i wariantów materiałowych podanych w tabeli 3.1. Pozostałe parametry były stałe i równe: $n_h = 5$, $n_w = 20$, $r_s = 10$ mm, $d_p = 1$ mm, radiator nieuwzględniony. Wyniki przedstawiono na rysunku 3.6.

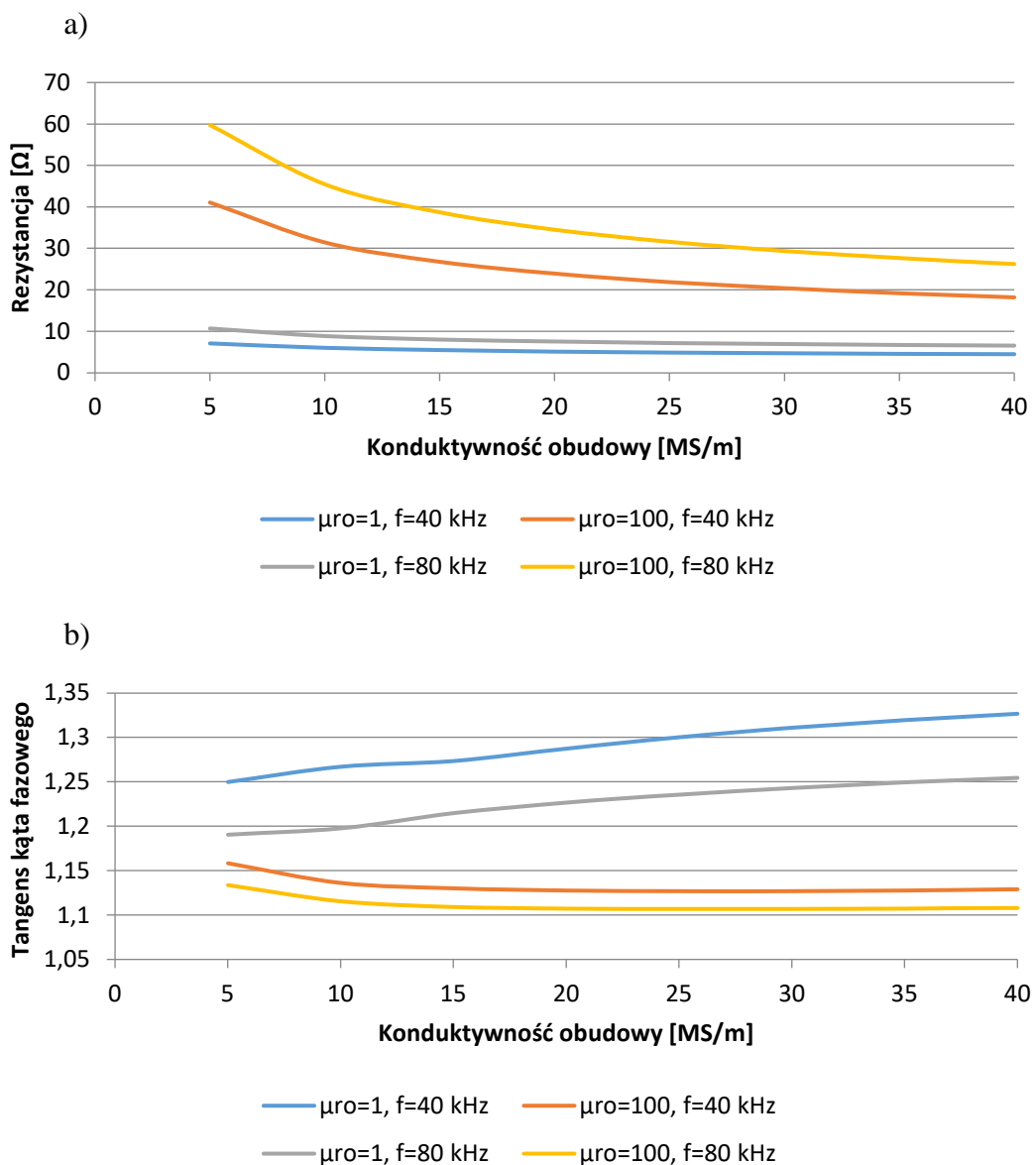


Rys. 3.6. Wartość rezystancji (a) oraz tangensa kąta fazowego impedancji (b) w funkcji grubości obudowy dla $n_h = 5$, $n_w = 20$, $r_s = 10$ mm, $f = 40$ kHz. Źródło: opracowanie własne.

Grubość obudowy ma niewielki wpływ na impedancję urządzenia. Wynika to z tego, że przy rozpatrywanych częstotliwościach i wartościach parametrów materiałowych głębokość wnikania pola do obudowy jest znacznie mniejsza niż grubość samej obudowy. Zatem prądy wirowe indukują się w obudowie tylko w cienkiej przypowierzchniowej warstwie wewnętrznej i zwiększanie grubości obudowy nie powoduje zwiększenia przekroju czynnego dla prądów wirowych.

3.3.5. Wpływ konduktywności obudowy na impedancję cewki

Obliczenia wykonano dla konduktywności obudowy $\gamma_o = 5, 10, \dots, 40$ MS/m dla przypadku obudowy nieferromagnetycznej ($\mu_{ro} = 1$) oraz ferromagnetycznej ($\mu_{ro} = 100$), dla $n_h = 5$, $n_w = 20$ oraz dla częstotliwości $f = 40, 80$ kHz. Pozostałe parametry były stałe i równe: $r_s = 10$ mm, $d_p = 1$ mm, $g_o = 2$ mm, radiator nieuwzględniony, rdzeń dielektryczny. Wyniki przedstawiono na rysunku 3.7. Zgodnie z oczekiwaniami wzrost konduktywności obudowy powoduje spadek rezystancji urządzenia. Jeżeli obudowa jest nieferromagnetyczna, to w rozpatrywanych warunkach wzrost jej konduktywności powoduje także wzrost tangensa kąta fazowego. Odwrotny trend daje się zauważyć dla obudowy ferromagnetycznej.



Rys. 3.7. Wartość rezystancji (a) oraz tangensa kąta fazowego impedancji (b) w funkcji konduktywności elektrycznej obudowy dla $n_h = 5$, $n_w = 20$, $r_s = 10$ mm, $g_o = 2$ mm. Źródło: opracowanie własne.

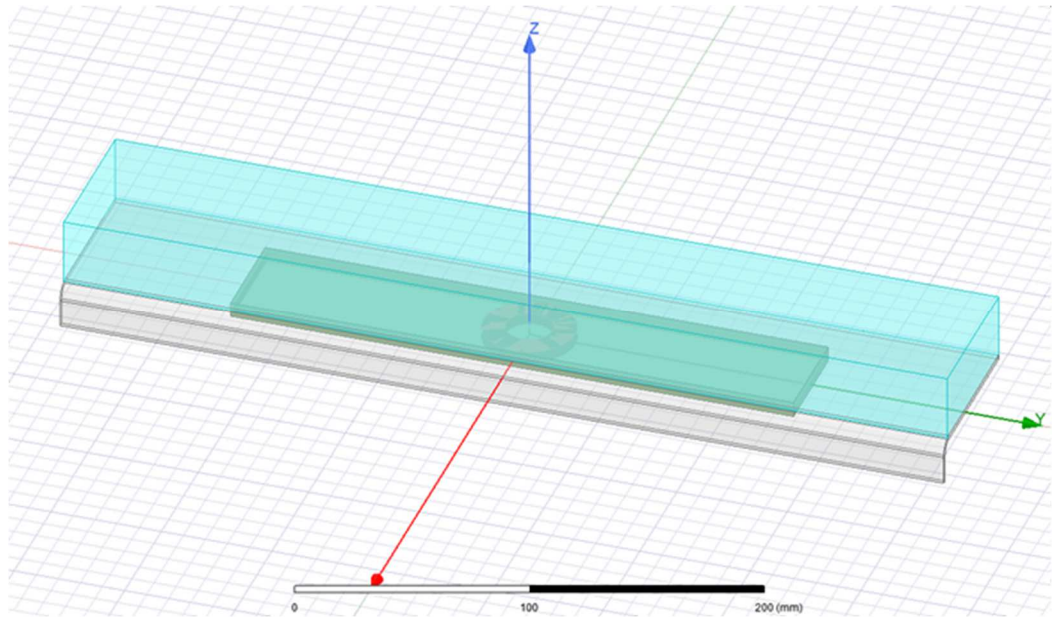
4. SYMULACJE NUMERYCZNE DOTYCZĄCE ROZPŁYWU CIEPŁA

4.1. Uwagi wstępne

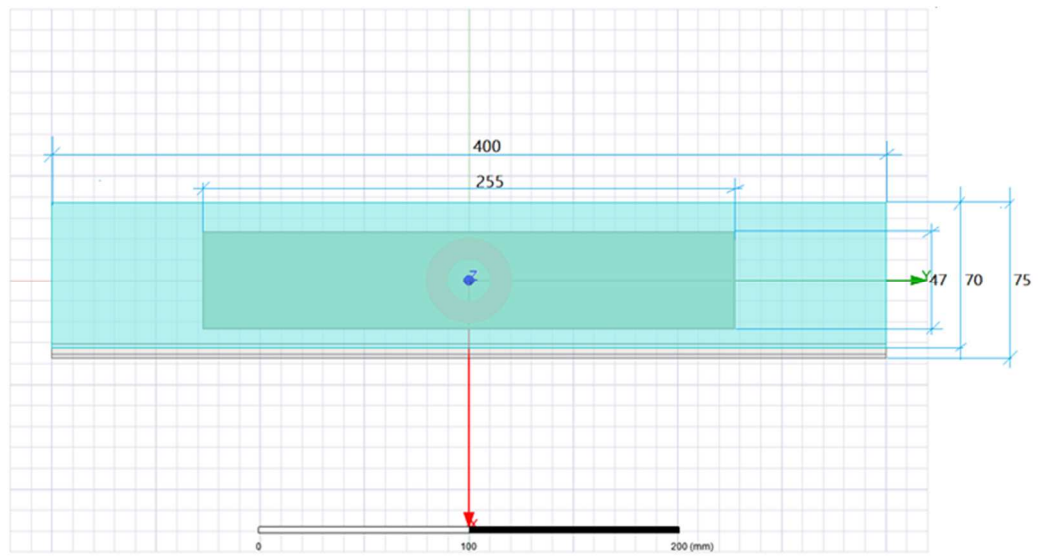
Rozpatrywane zagadnienie charakteryzuje się sprzężeniem elektromagnetyczno-termicznym. Pole elektromagnetyczne generowane przez prąd płynący w cewce wywołuje prądy wirowe, głównie w obszarze obudowy, które stanowią źródło ciepła. Ponadto prądy płynące w cewce same również stanowią źródło ciepła. Ciepło to następnie propagowane jest do radiatora głównie wskutek przewodnictwa cieplnego. Jeśli na radiatorze zalega śnieg lub lód, to propagacja ciepła następuje dalej głównie wskutek przewodnictwa cieplnego, ale także częściowo promieniowania. Ponadto ciepło przekazywane jest do powietrza otaczającego układ, głównie wskutek konwekcji. Zmiana temperatury wywołuje zmiany parametrów materiałowych, co w pewien sposób przekłada się na zmiany w rozkładzie pola elektromagnetycznego, a to z kolei rzutuje na zmiany w dystrybucji ciepła. Teoretycznie uwzględnienie wielu czynników mających wpływ na wymianę ciepła jest w symulacjach numerycznych możliwe, jednakże z uwagi na dużą niepewność do wartości niektórych parametrów, związanych zwłaszcza z konwekcją, a także promieniowaniem, rozpatrywanie zbyt skomplikowanego modelu niekoniecznie prowadziłyby do istotnej poprawy jakości wyników i ich zgodności z doświadczeniem. Należy też podkreślić, że niebagatelne znaczenie ma czas obliczeń z uwagi na to, że geometria zagadnienia wymaga wykonania obliczeń temperaturowych 3D. Dlatego w pracy zdecydowano się na znaczne uproszczenie modelu obliczeniowego. Pominięto m.in. przemiany fazowe oraz obecność szyn w pobliżu urządzenia IOR. Dlatego też obliczenia mają charakter szacunkowy.

4.2. Założenia modelu obliczeniowego

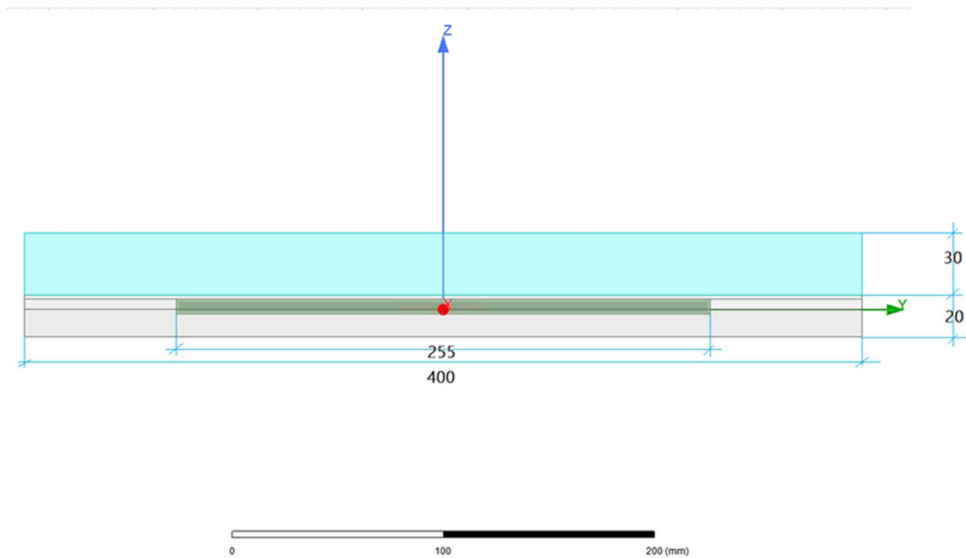
Na potrzeby symulacji numerycznych związanych z wymianą ciepła skonstruowano uproszczony model obliczeniowy. Cewka (obszar Ω_c) urządzenia IOR zamknięta jest w metalowej obudowie (Ω_{ob}), w której indukują się prądy wirowe. Przestrzeń (Ω_w) pomiędzy cewką, a obudową wypełniona jest materiałem PCV na którym jest nawinięta cewka. W celu poprawy dystrybucji ciepła do górnej powierzchni obudowy przymocowany jest radiator (Ω_r). Do celów symulacyjnych przyjęto, że na powierzchni radiatora może zalegać śnieg lub lód (Ω_s), a cała konstrukcja znajduje się w powietrzu (Ω_0). Przyjętą geometrię przedstawiono na rysunkach 4.1-4.4 otrzymanych z programu Ansys Electronic Desktop 2021 R1, który zastosowano do przeprowadzenia obliczeń numerycznych. W modelu nie uwzględniono obecności szyn. Parametry materiałowe poszczególnych obszarów prezentuje tabela 4.1.



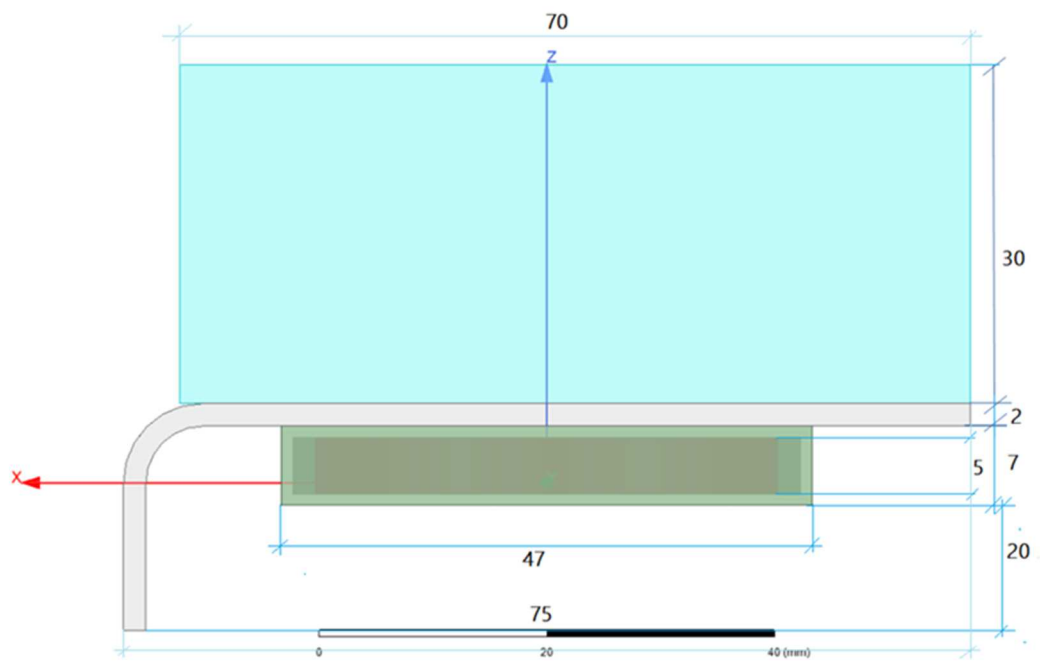
Rys. 4.1. Geometria modelu IOR – widok trymetryczny. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.2. Geometria modelu IOR – widok z góry. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.3. Geometria modelu IOR – widok z przodu. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.4. Geometria modelu IOR – widok z boku. Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4.1. Parametry materiałowe w obliczeniach wymiany ciepła. Dane z programu Ice Pak.
Źródło: opracowanie własne.

	<i>Cewka</i>	<i>Wypełnienie</i>	<i>Obudowa</i>	<i>Radiator</i>	<i>Śnieg</i>	<i>Otoczenie</i>
Materiał	Miedź	PCV	Stal	Aluminium	Śnieg	Powietrze
Konduktywność elektryczna, MS/m	55	0	4,03	33	0,01	
Przenikalność magnetyczna względna	0,999991	2,7	400	1,0000021	0,999991	
Przenikalność elektryczna względna		1			81	
Tangens kąta stratności		0,007				
Gęstość, kg/m ³	8933	1200	7872	2689	100	1,1614
Przewodność cieplna, W/(m K)	400	0,23	45	237,5	0,2	0,0261
Ciepło właściwe, J/(kg K)	385	1050	481	951	2010	1005

Numeryczną analizę pola temperatury wokół urządzenia indukcyjnego przeprowadzono w programie Ice Pak należącym do pakietu obliczeniowego Ansys Electronic Desktop 2021 R1. Równania wymiany ciepła obejmują trzy mechanizmy: przewodnictwo cieplne, konwekcję i promieniowanie. W przypadku przewodnictwa strumień ciepła q jest proporcjonalny do gradientu temperatury T [52,53,54]:

$$q = -\lambda \nabla T \quad (4.1)$$

gdzie λ jest przewodnością cieplną. Zgodnie z równaniem Fouriera-Kirchhoffa w obszarze przewodzącym o konduktywności γ w których istnieją prądy o gęstości J płynące wskutek przyłożonego napięcia lub też wskutek indukcji elektromagnetycznej, równanie wymiany ciepła ma postać [52,53,54]:

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -q_v \quad (4.2)$$

gdzie c - ciepło właściwe, ρ - gęstość materiału, natomiast q_v jest gęstością objętościową mocy źródeł ciepła. W rozpatrywanym przypadku wydzielana energia pochodzi od przepływającego prądu:

$$q_v = \frac{J \cdot J}{2\gamma} \quad (4.3)$$

Z uwagi na to, że częstotliwość prądu jest rzędu kilkudziesięciu kHz, natomiast widoczne zmiany temperatury zachodzą w czasie rzędu kilku sekund, składnik oscylacyjny w wynikający z przemnożenia wielkości sinusoidalnych w czasie można pominąć, uwzględniając jedynie składnik średniokresowy odpowiedzialny z moc czynną.

Na granicy styczności dwóch obszarów Ω_i i Ω_j reprezentujących ciała stałe zakłada się styk idealny, co prowadzi do równań

$$T_i = T_j \quad (4.4)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial n} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial n} \quad (4.5)$$

Na granicach ciała stałego z powietrzem wymiana ciepła odbywa się wg prawa Newtona

$$-\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = \alpha(T_s - T_p) \quad (4.6)$$

gdzie T_s - temperatura powierzchni ciała stałego, T_p - temperatura powietrza opływającego ciało stałe, α - współczynnik wymiany ciepła. Współczynnik ten jest zależny od wielu czynników i w wielu przypadkach jego wartość obarczona jest znaczną niepewnością, co skutkuje dużymi różnicami w wartościach temperatury uzyskanymi w drodze eksperymentu i symulacji numerycznych.

W obszarze powietrza ciepło rozprzestrzenia się przede wszystkim wskutek konwekcji (z uwagi na przyjętą geometrię jest to konwekcja swobodna), ale w pewnym zakresie także wskutek przewodzenia oraz promieniowania. Uwzględnienie konwekcji wymaga sformułowania i rozwiązania równań określających bilans masy, energii oraz pędu. Równania te mają różną postać dla przepływu laminarnego oraz turbulentnego. Rodzaj ruchu w przypadku konwekcji swobodnej można określić na podstawie tzw. liczby Grashofa Gr , wyrażającej stosunek siły wyporu do sił lepkości danego płynu. W przypadku ruchu laminarnego liczba Gr jest mniejsza od wartości krytycznej, a równanie bilansu masy przyjmuje postać [52,53]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (4.7)$$

gdzie ρ jest gęstością płynu, a \mathbf{v} - polem prędkości przemieszczania się cząstek płynu. Równanie to wyraża fakt, że chwilowa zmiana gęstości płynu wynika z ubytku lub przyrostu masy wskutek ruchu cząstek płynu.

Równanie bilansu pędu ma postać [52,53]

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad (4.8)$$

gdzie \mathbf{g} jest wektorem przyspieszenia ziemskiego, p - ciśnieniem, a μ - współczynnikiem lepkości dynamicznej. Równanie to wyraża fakt, że zmiana pędu powodowana jest przez siłę grawitacji, gradient ciśnienia oraz lepkość.

Równanie bilansu energii ma postać [52,53]

$$\frac{\partial(S_u\rho)}{\partial t} = -\nabla \cdot (S_u\rho\mathbf{v}) - \nabla \cdot \mathbf{q} - p\nabla \cdot \mathbf{v} + q_v \quad (4.9)$$

gdzie S_u jest energią wewnętrzną na jednostkę masy. Równanie formalizuje fakt, że zmiana energii wewnętrznej wynika kolejno z konwekcji, przewodzenia, zmiany objętości oraz istnienia źródeł ciepła o wydajności q_v . Z tego ostatniego równania przy dodatkowych założeniach wynika równanie dla pola temperatury w postaci

$$\nabla \cdot (\lambda\nabla T) - \rho c_p \frac{dT}{dt} = -\frac{dp}{dt} - q_v \quad (4.10)$$

gdzie c_p jest ciepłem właściwym przy stałym ciśnieniu. Równania (4.7), (4.8) i (4.10) zawierają niewiadome ρ , \mathbf{v} , p i T . Konieczne jest jeszcze zadanie ciśnienia lub też określenie równania stanu wiążącego ciśnienie z innymi wielkościami. W rozpatrywanych warunkach można przyjąć, że ciśnienie jest stałe.

W przypadku ruchu turbulentnego równania istotnie się komplikują i wymagają dodatkowo przyjęcia modelu turbulencji.

Oprócz konwekcyjnego przekazywania ciepła w powietrzu jest ono także w pewnym stopniu przekazywane wskutek przewodności cieplnej oraz promieniowania. Ilość ciepła przekazywanego wskutek konwekcji w stosunku do ilości ciepła przekazywanego wskutek przewodności określa tzw. liczba Nusselta

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (4.11)$$

gdzie α jest współczynnikiem wymiany ciepła, a l - tzw. wymiarem charakterystycznym.

Powierzchniową gęstość strumienia energii emitowanej w formie promieniowania w jednostce czasu przez ciało o temperaturze T [K] określa prawo Stefana-Boltzmana [52,53,54]

$$e_c = \epsilon\sigma T^4 \quad (4.12)$$

gdzie $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ jest stałą Boltzmana, a ϵ jest emisyjnością powierzchni ciała.

4.3. Wyniki symulacji numerycznych

4.3.1. Założenia symulacyjne

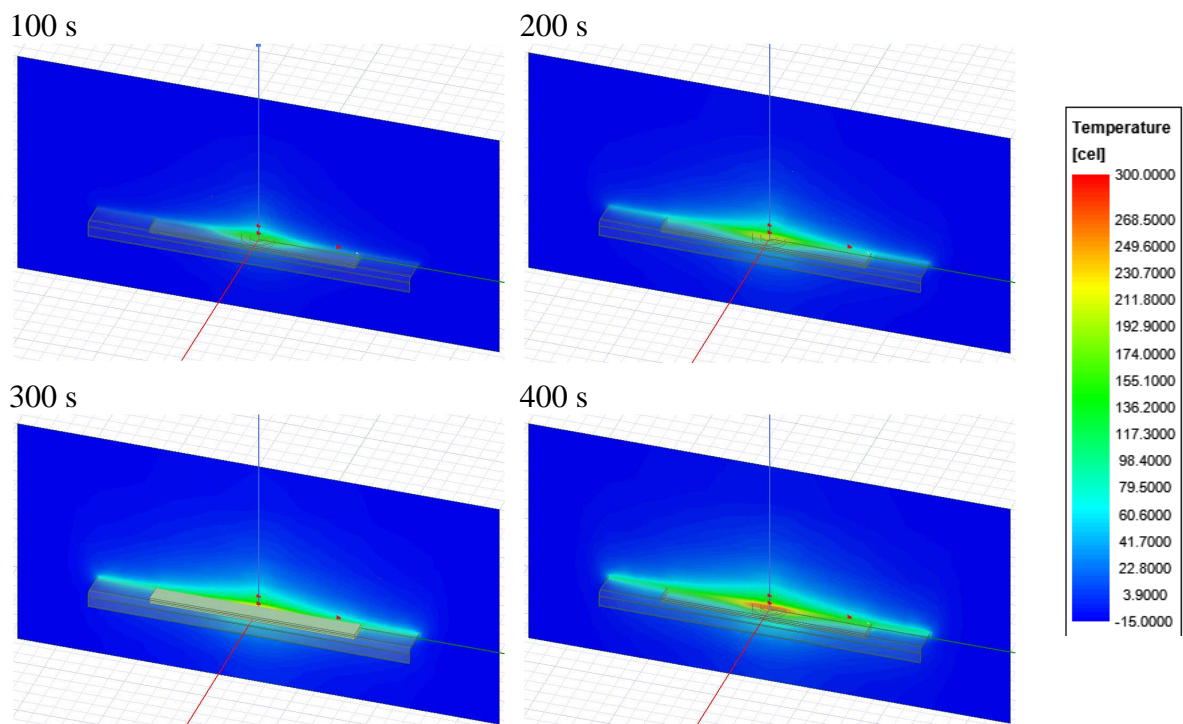
Symulacje wykonano dla częstotliwości pracy równej 40 kHz, 70 kHz oraz 90 kHz dla temperatury otoczenia -10 °C. Prąd cewki był tak dobrany, aby pobierana moc czynna była zgodna z wartościami uzyskanymi w drodze pomiarów. Postąpiono tak z uwagi na to, że szczegóły konstrukcyjne badanego urządzenia nie były znane. Wartości pobieranych mocy czynnych zestawiono w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Straty w stalowej obudowie pod wpływem indukowania się prądów wirowych.
Źródło: opracowanie własne.

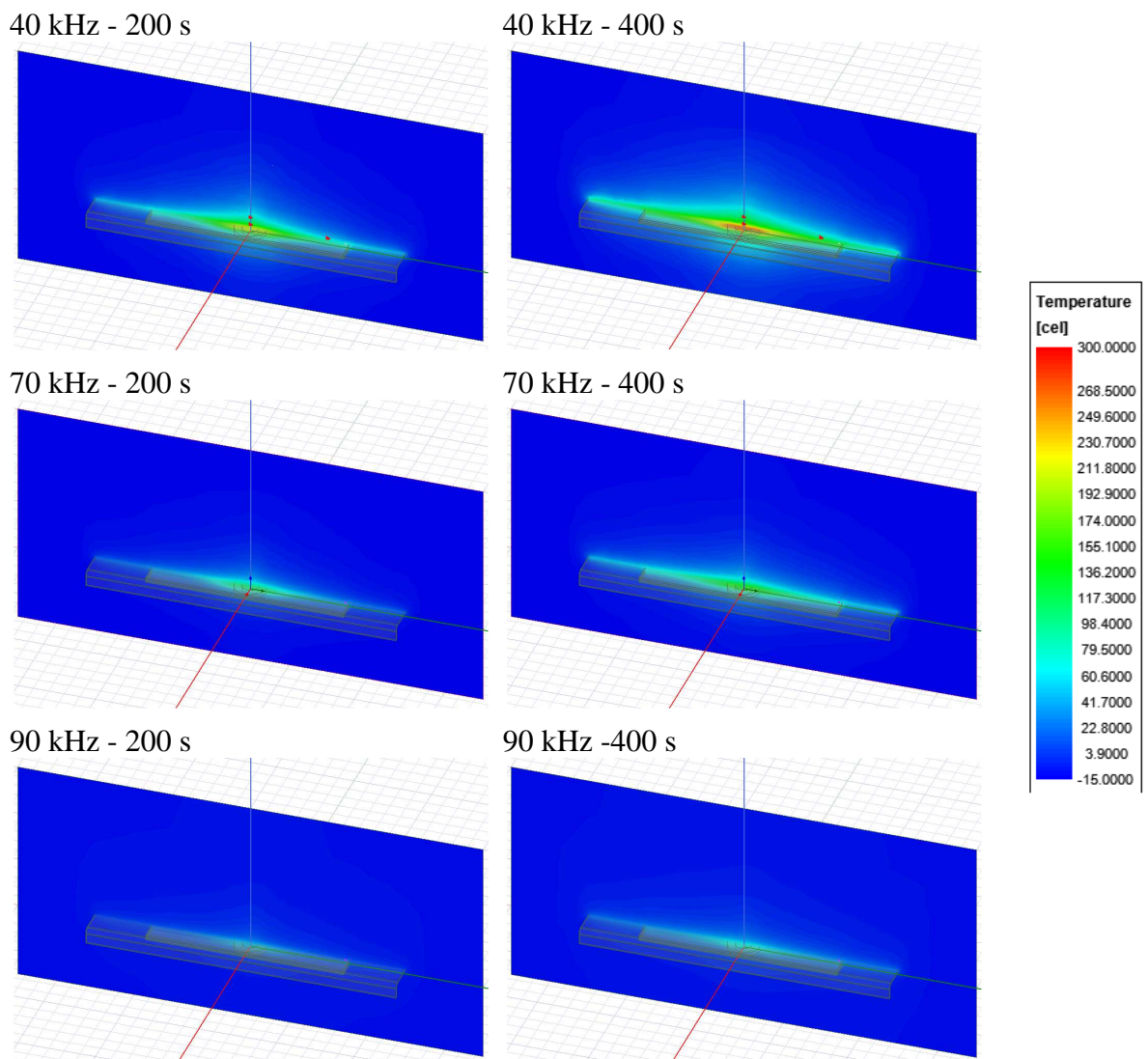
Częstotliwość	Straty
kHz	W
40	180
70	91
90	43

4.3.2. Badania symulacyjne bez obecności śniegu

Na rysunku 4.5 pokazano obraz pola temperatury w wybranych chwilach w przekroju wzdłużnym układu dla częstotliwości 40 kHz, a na rysunku 4.6 - porównanie rozkładu temperatury w wybranych chwilach dla częstotliwości 40 kHz, 70 kHz oraz 90 kHz.

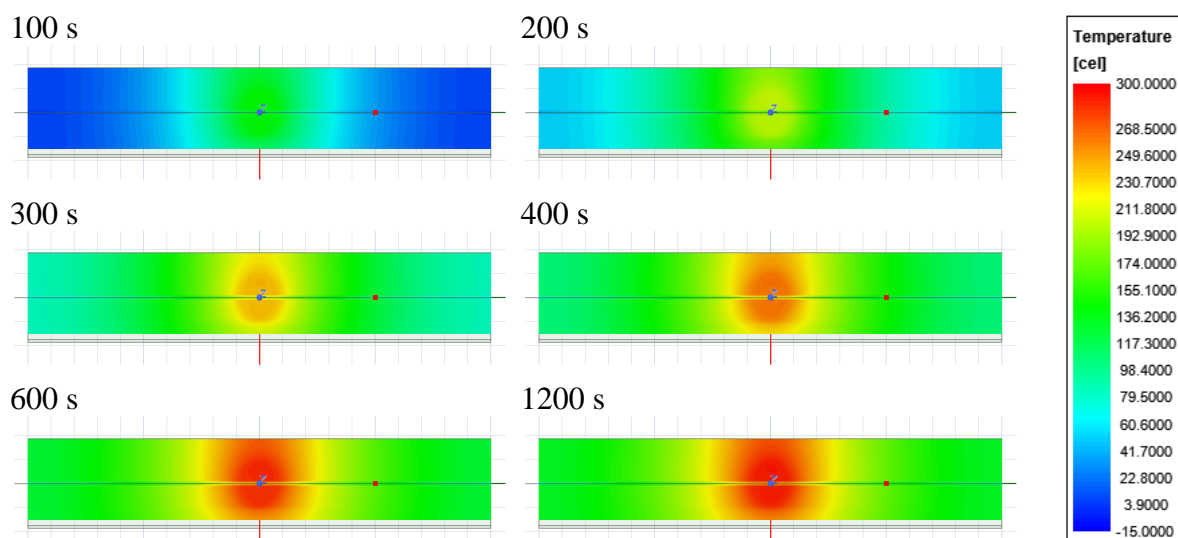


Rys. 4.5. Rozkład temperatury w przekroju wzdłużnym radiatora IOR dla wybranych czasów od chwili rozpoczęcia nagrzewania dla częstotliwości 40 kHz przy temperaturze początkowej -10 °C. Źródło: opracowanie własne.

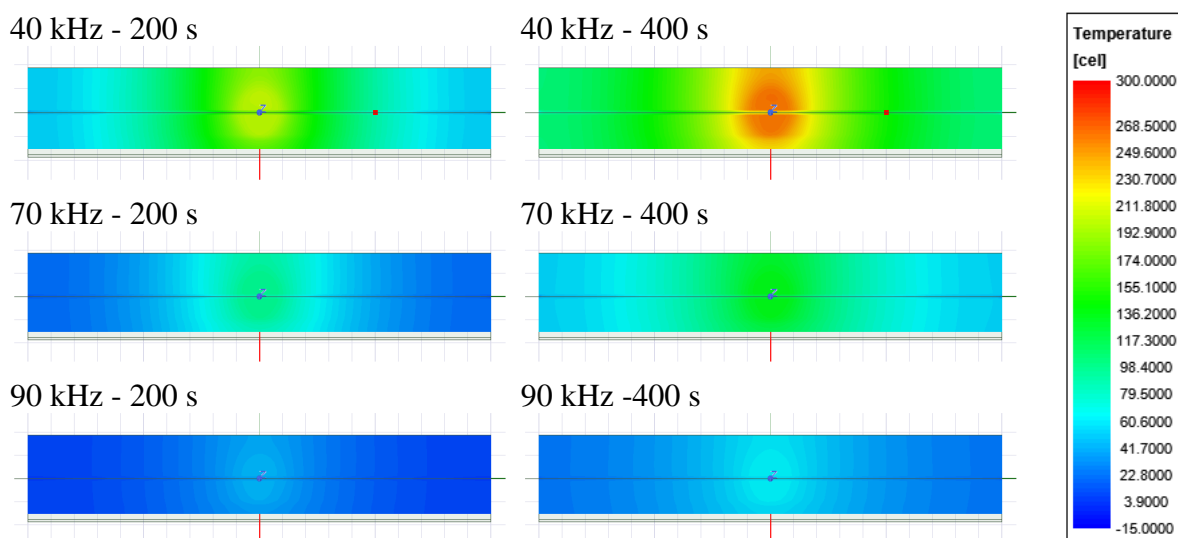


Rys. 4.6. Rozkład temperatury w przekroju wzdłużnym radiatora IOR dla wybranych czasów od chwili rozpoczęcia nagrzewania dla częstotliwości 40 kHz, 70 kHz i 90 kHz przy temperaturze początkowej $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Źródło: opracowanie własne.

Przedstawione wyżej rozkłady służą jedynie do oceny temperatury w otoczeniu układu, zwłaszcza w przestrzeni nad radiatorem. Na rysunku 4.7 pokazano rozkład temperatury na powierzchni radiatora dla częstotliwości 40 kHz dla wybranych czasów od chwili rozpoczęcia nagrzewania dla częstotliwości 40 kHz przy temperaturze początkowej $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Już po 200 sekundach temperatura powierzchni radiatora w najchłodniejszych miejscach sięga około $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po około 600 sekundach temperatura ustala się. Na rysunku 4.8 przedstawiono porównanie rozkładu temperatury na powierzchni radiatora w tych samych chwilach czasowych dla różnych częstotliwości.

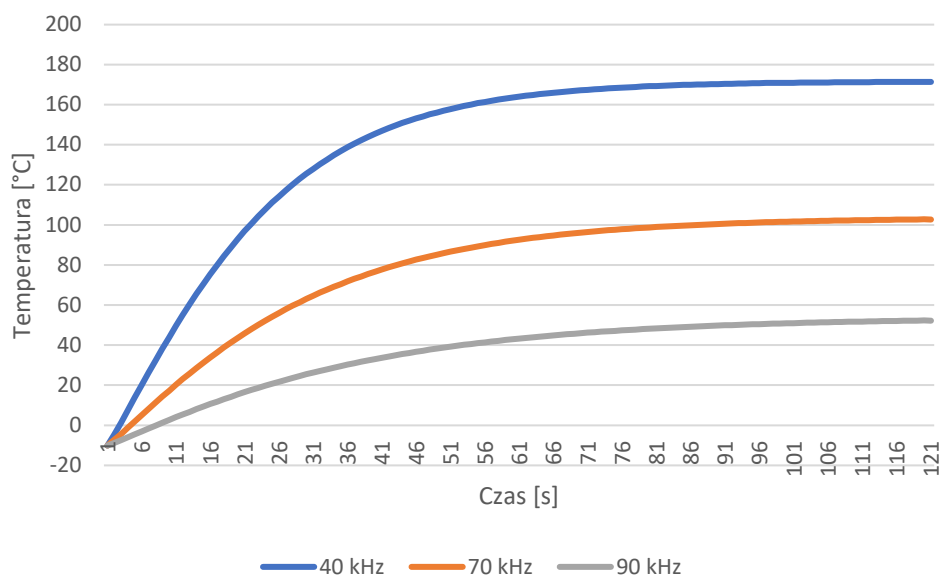


Rys. 4.7. Rozkład temperatury na powierzchni radiatora dla wybranych czasów od chwili rozpoczęcia nagrzewania dla częstotliwości 40 kHz przy temperaturze początkowej $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Źródło: opracowanie własne.



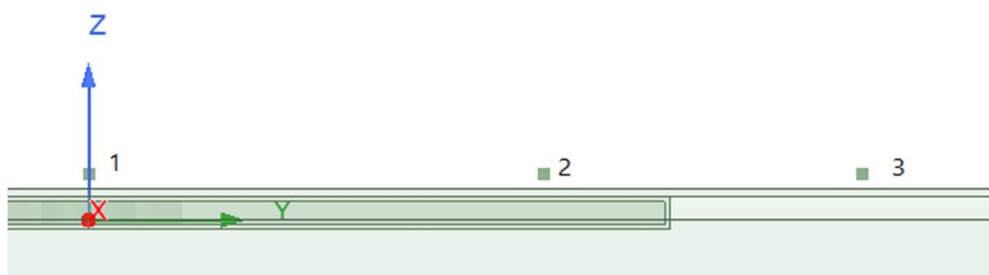
Rys. 4.8. Rozkład temperatury na powierzchni radiatora dla wybranych czasów od chwili rozpoczęcia nagrzewania dla częstotliwości 40 kHz, 70 kHz i 90 kHz przy temperaturze początkowej $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 4.9 przedstawiono przebieg czasowy temperatury uśrednionej na powierzchni radiatora układu dla badanych częstotliwości pracy. Dla częstotliwości 40 kHz temperatura ustalona wynosi około $170\text{ }^{\circ}\text{C}$, dla częstotliwości 70 kHz - około $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, a dla częstotliwości 90 kHz - około $52\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jest to zgodne z oczekiwaniami, że największa temperatura uzyskiwana jest przy niższych częstotliwościach z uwagi na większy pobór mocy. Również dynamika zmian temperatury jest największa dla niższych częstotliwości.



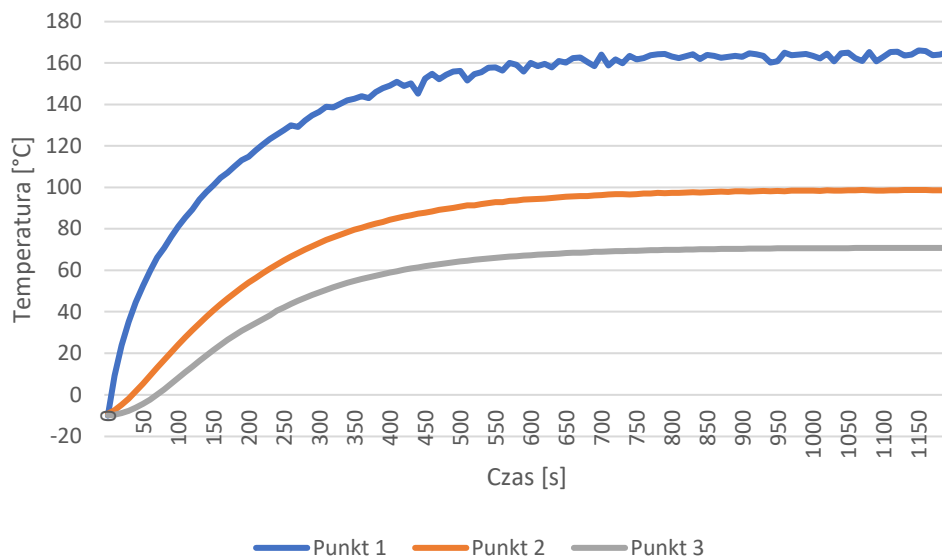
Rys. 4.9. Temperatura uśredniona na powierzchni radiatora IOR dla częstotliwości 40, 70 i 90 kHz dla temperatury początkowej $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Źródło: opracowanie własne.

W dalszej kolejności zbadano przebieg temperatury w wybranych punktach znajdujących się przy powierzchni radiatora. Rozmieszczenie punktów kontrolnych przedstawiono na rysunku 4.10.



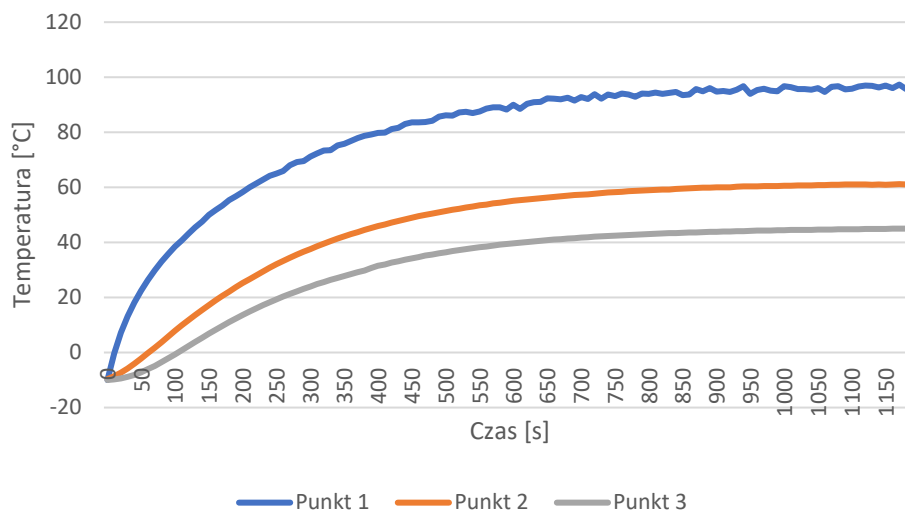
Rys. 4.10. Umieszczenie punktów pomiarowych na radiatorze układu IOR. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 4.11 przedstawiono temperaturę na powierzchni radiatora układu IOR w punktach kontrolnych 1, 2 i 3. Dla częstotliwości 40 kHz temperatura ustalona punktu nr 1 wynosi około $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, punktu nr 2 - około $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, a punktu nr 3 - około $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.



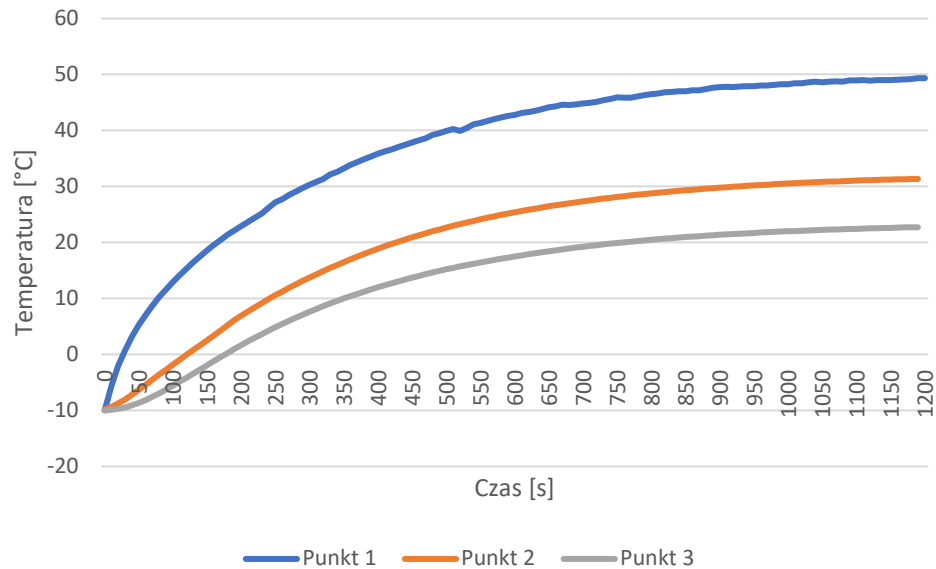
Rys. 4.11. Temperatura w punkcie nr 1, 2 i 3 układu IOR dla częstotliwości 40 kHz. Temperatura początkowa -10 °C. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 4.12 przedstawiono przebieg temperatury na powierzchni radiatora układu IOR dla punktów pomiarowych 1, 2 i 3 (rys. 4.10) dla modelu bez śniegu dla częstotliwości 70 kHz. Temperatura dla punktu nr 1 wynosi około 95 °C, dla punktu nr 2 temperatura wynosi około 60 °C, a dla punktu nr 3 temperatura wynosi około 45 °C.



Rys. 4.12. Temperatura w punkcie nr 1, 2 i 3 układu IOR dla częstotliwości 70 kHz. Temperatura początkowa -10 °C. Źródło: opracowanie własne.

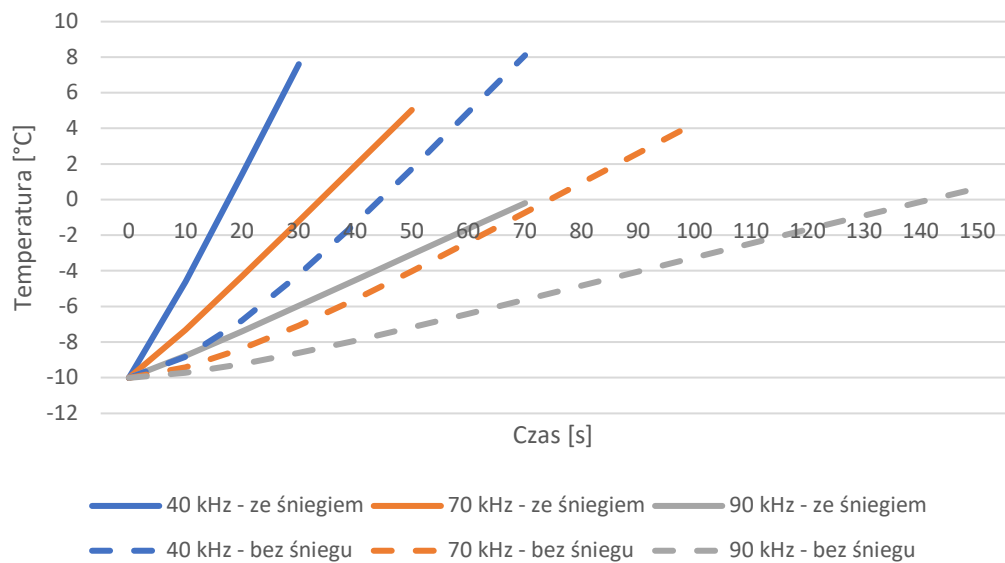
Na rysunku 4.13 przedstawiono pomiar temperatury na powierzchni radiatora układu IOR dla punktów pomiarowych 1, 2 i 3 (rys. 4.10) dla modelu bez śniegu dla częstotliwości 90 kHz. Temperatura w punkcie nr 1 wynosi około 55 °C, dla punktu nr 2 temperatura wynosi około 30 °C, a dla punktu nr 3 temperatura wynosi około 25 °C.



Rys. 4.13. Temperatura w punkcie nr 1, 2 i 3 układu IOR dla częstotliwości 90 kHz. Temperatura początkowa -10 °C. Źródło: opracowanie własne.

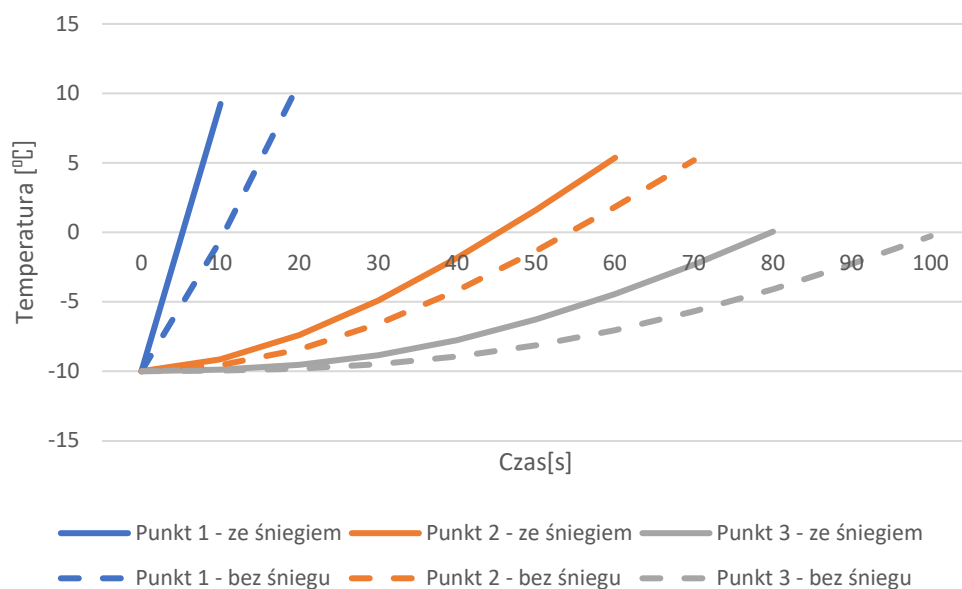
4.3.3. Badania symulacyjne dla modelu ze śniegiem

Na rysunku 4.14 przedstawiono uśrednioną temperaturę na powierzchni radiatora układu IOR dla częstotliwości 40 kHz, 70 kHz i 90 kHz w przypadku zalegania śniegu na powierzchni radiatora. Z uwagi na to, że symulacje numeryczne przeprowadzono bez uwzględnienia przejść fazowych przebiegi temperatury mają charakter szacunkowy - na wykresach pokazano jedynie początek przebiegu temperatury, kiedy przemiana fazowa jeszcze się nie rozpoczęła lub też dopiero się rozpoczęła. Linią ciągłą oznaczono temperaturę uśrednioną na powierzchni radiatora w trakcie procesu roztapiania śniegu, a linią przerywaną oznaczono proces nagrzewania radiatora bez obecności śniegu.

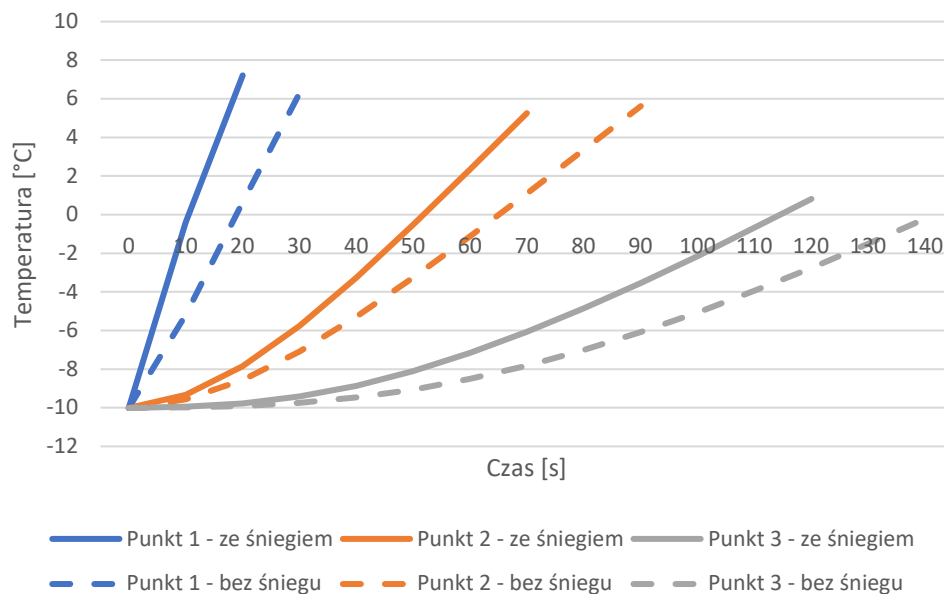


Rys. 4.14. Temperatura uśredniona na powierzchni radiatora IOR dla częstotliwości 40, 70 i 90 kHz. Temperatura początkowa -10 °C. Źródło: opracowanie własne.

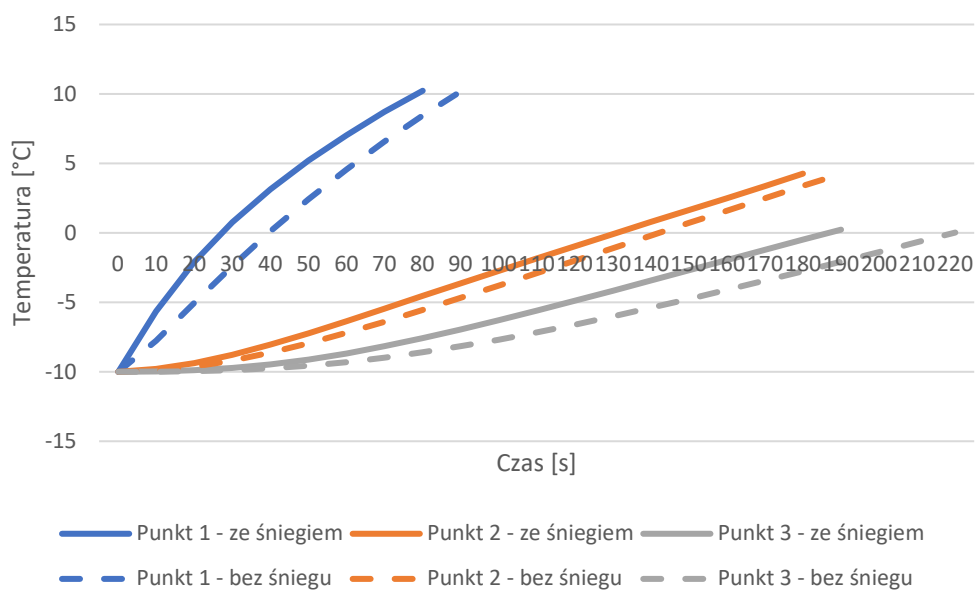
Na rysunkach 4.15, 4.16 i 4.17 przedstawiono temperaturę na powierzchni radiatora układu IOR dla punktów kontrolnych 1, 2 i 3 (rys. 4.10). Wykresy temperatury radiatora układu IOR opracowano dla częstotliwości 40 kHz, 70 kHz i 90 kHz. Dla częstotliwości większych stwierdzono, że czas wytapiania śniegu wydłuża się.



Rys. 4.15. Temperatura w punkcie nr 1, 2 i 3 układu IOR dla częstotliwości 40 kHz. Temperatura początkowa -10 °C. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.16. Temperatura w punkcie nr 1, 2 i 3 układu IOR dla częstotliwości 70 kHz. Temperatura początkowa -10 °C. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.17. Temperatura w punkcie nr 1, 2 i 3 układu IOR dla częstotliwości 90 kHz. Temperatura początkowa -10 °C. Źródło: opracowanie własne.

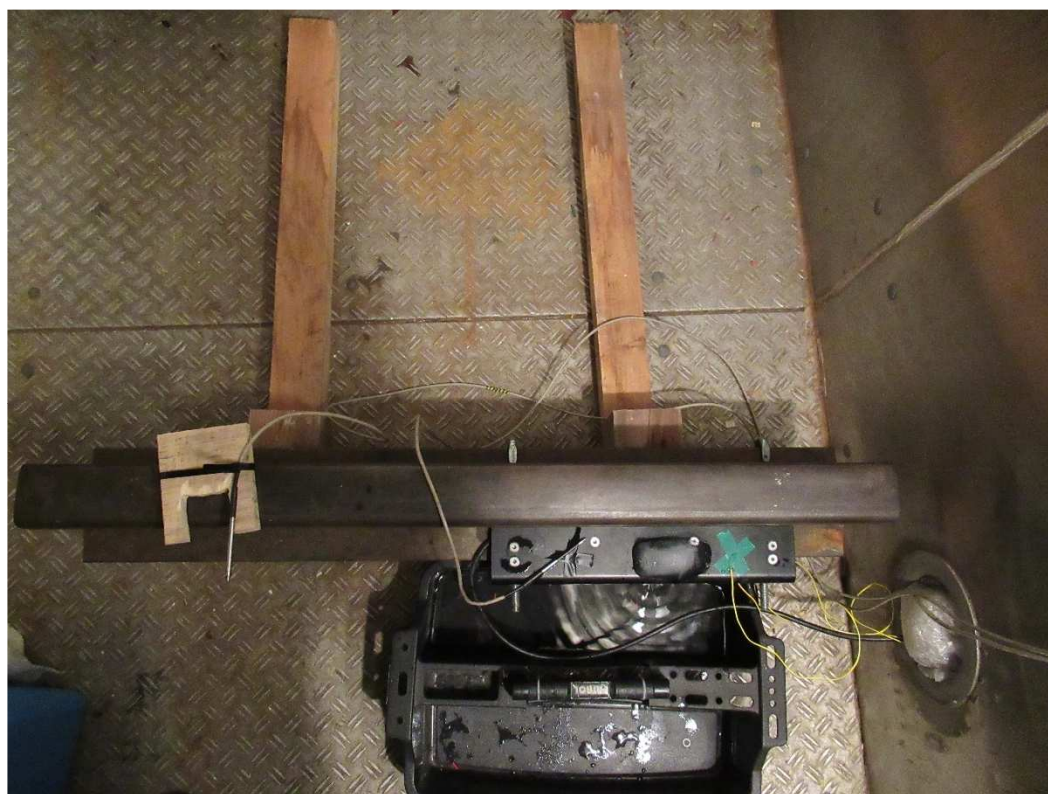
Na podstawie przeprowadzonych symulacji można stwierdzić, że temperatura ustalona radiatora może sięgać od kilkudziesięciu do nawet kilkuset stopni Celsjusza - wydaje się zasadne, aby mniejsze częstotliwości stosować jedynie w początkowej fazie nagrzewania, jeśli wymagają tego warunki środowiskowe (np. wskutek nagłych opadów śniegu), a w dalszej fazie stosować wyższą częstotliwość, dla której temperatura radiatora będzie znacznie mniejsza (bezpieczniejsza), ale wystarczająco duża do wytopienia śniegu. Ponadto punkty znajdujące się na brzegu radiatora mają znacznie niższą temperaturę niż punkty w rejonie centralnym. Ponieważ jednak temperatura radiatora w punktach brzegowych jest w stanie ustalonym znacznie powyżej 0 °C (np. 20 °C dla 90 kHz przy temperaturze otoczenia -10 °C), nie powinno powodować to problemów z wytapianiem śniegu lub lodu. Można jednak rozważyć umieszczenie dwóch cewek w jednym urządzeniu, co spowodowałoby większą równomierność w temperaturze radiatora. Interesujący wydaje się fakt, że wartości temperatury w badanych punktach są większe w przypadku zalegania śniegu niż wtedy, gdy go brak. Proces ten prawdopodobnie jest spowodowany tym, że śnieg stanowi pewnego rodzaju barierę przed konwekcyjnym chłodzeniem radiatora przez otaczające powietrze. Jednocześnie przekaz energii cieplnej do śniegu jest stosunkowo powolny, przynajmniej w początkowej fazie nagrzewania.

5. ANALIZA PRACY RZECZYWISTYCH URZĄDZEŃ IOR i EOR

5.1. Badania laboratoryjne wytapiania lodu

5.1.1. Badania laboratoryjne wytapiania lodu przez urządzenie IOR

Badania zostały przeprowadzone w taki sposób, że na radiatorze IOR umieszczano jednakowe bryłki lodu (rys. 5.1), które podlegały roztopieniu pod wpływem pracującego w różnych warunkach urządzenia IOR, tj. dla różnych częstotliwości w układzie sterowania IOR oraz temperatury otoczenia. Zmniejszenie częstotliwości pracy układu powodowało wzrost poboru prądu przez urządzenie IOR, co skutkowało nadmiernym grzaniem układu zasilania i sterowania. W przypadku zwiększenia częstotliwości układu obserwowano zmniejszenie intensywności nagrzewania radiatora. Pomiary wykonywano w komorze klimatycznej. Komora pozwalała uzyskać warunki temperatury otoczenia porównywalne z warunkami panującymi w terenie. Bryła lodu została uformowana w taki sposób, że woda w pojemniku o objętości 200 ml została schłodzona, przez co uzyskano takie same bryły lodu.



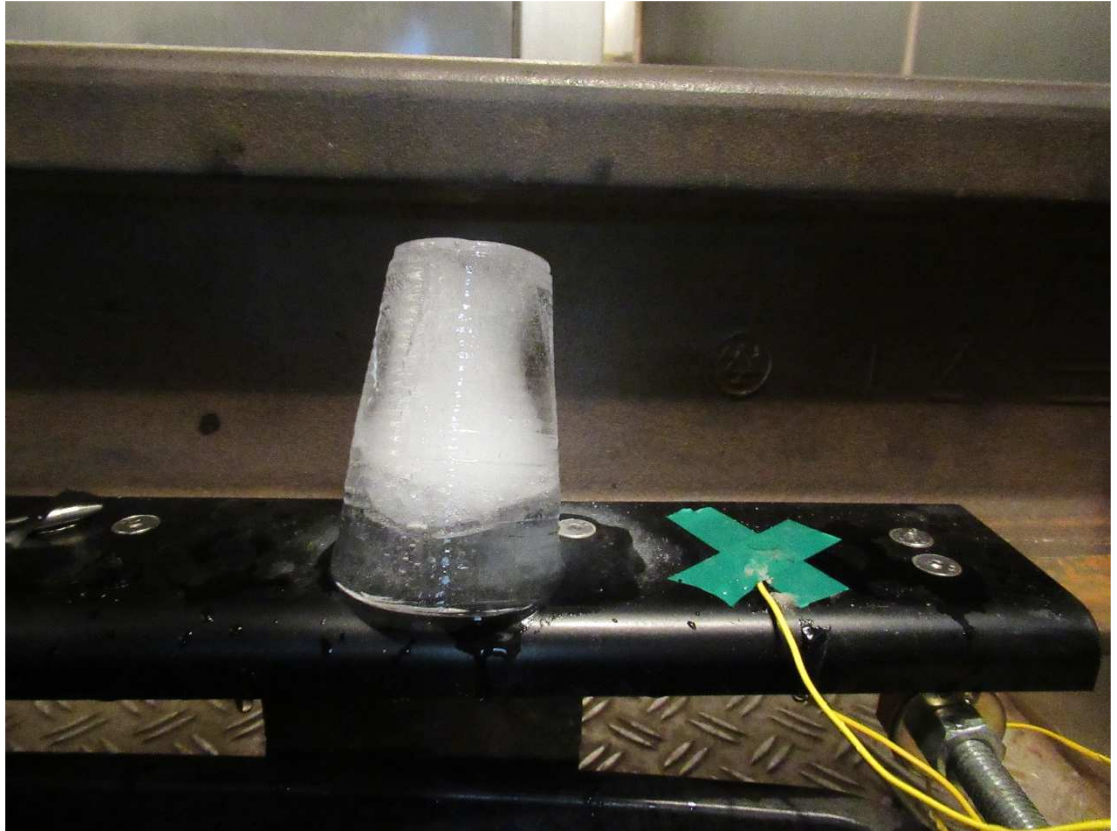
Rys. 5.1. Urządzenie IOR w komorze klimatycznej w trakcie wytapiania bryły lodu. Źródło: opracowanie własne.

W wybranych punktach zamontowano czujniki temperatury, które pozwalały odczytywać temperaturę w trakcie procesu topnienia brył lodu (rys. 5.2). Odczytano również czas potrzebny do całkowitego roztopienia lodu oraz moc pobieraną przez urządzenie IOR.



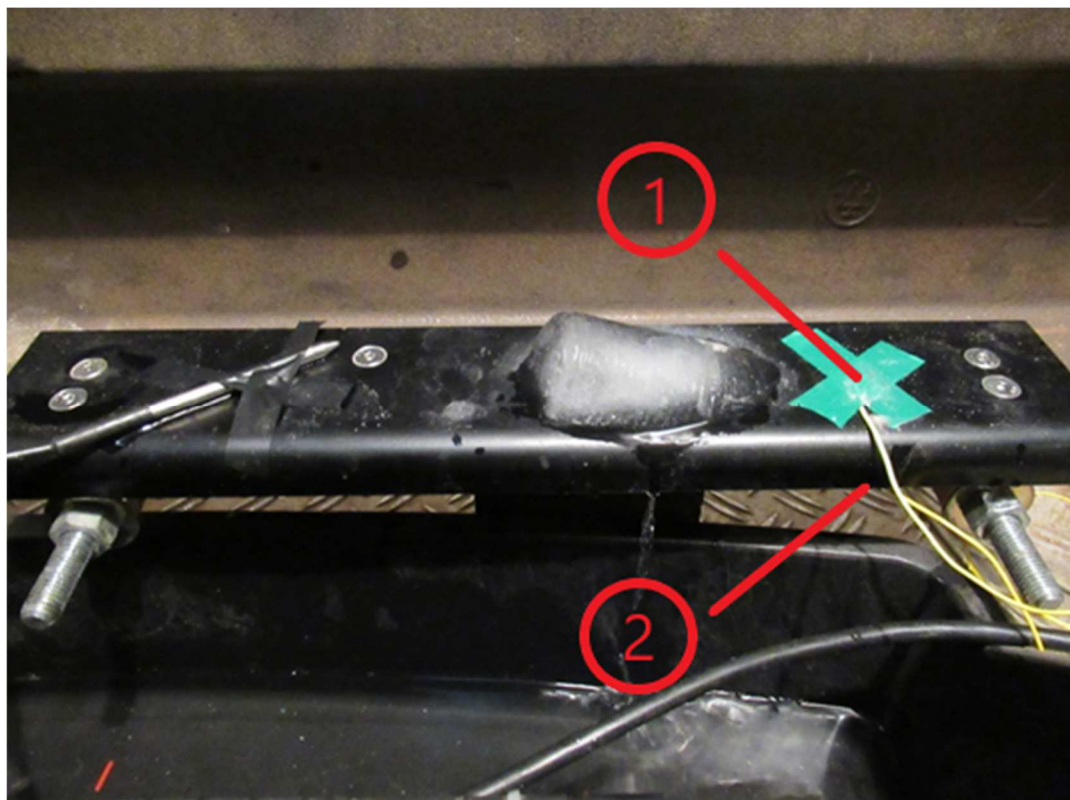
Rys. 5.2. Opomiarowanie urządzenia IOR w trakcie badań w komorze klimatycznej. Źródło: opracowanie własne.

Badania urządzenia indukcyjnego ogrzewania rozjazdów kolejowych w komorze klimatycznej zostały wykonane w celu określenia szybkości topnienia lodu w zadanych warunkach środowiskowych. Blokowanie rozjazdów może zachodzić już temperaturze 0 °C, dlatego badania wykonywano w temperaturze otoczenia 0 °C, a ponadto w temperaturze -10 °C. Badania przeprowadzono dla różnych zadanych częstotliwości pracy układu IOR i dokonywano pomiarów temperatury w poszczególnych miejscach wskazanych na rysunkach 5.3 i 5.4. Na rysunku 5.3 przedstawiono kostkę lodu, która jest w początkowej fazie topnienia.



Rys. 5.3. Bryła lodu w początkowej fazie topnienia dla częstotliwości 40 kHz. Źródło: opracowanie własne.

Równoległe w trakcie topnienia odczytywano, m. in. temperaturę oraz pobór mocy. Rysunek 5.4 przedstawia końcowy moment wytapiania kostki lodu. Układ indukcyjnego ogrzewania rozjazdów został zamontowany do stopki szyny poprzez uchwyty umożliwiające stabilne usytuowanie radiatora w taki sposób, że jest on oddalony od stopki szyny. Zamocowanie radiatora w pewnej odległości od stopki szyny zostało wykonane tak, aby energia cieplna była możliwie w pełni wykorzystana do wytapiania śniegu lub lodu, bez pasożytniczego poboru energii cieplnej przez szynę kolejową, która bezpośrednio nie powoduje wytapiania śniegu lub lodu. Nagrzewanie się szyny może spowodować zwiększenie przyczepności pojazdów kolejowych do powierzchni tocznej gółki szyny, co w minimalny sposób może zwiększyć bezpieczeństwo prowadzenia ruchu pociągów. Pojazdy kolejowe w celu zwiększenia przyczepności, np. podczas ruszania lub hamowania z dużym ładunkiem, posiadają piasecznicę, która powoduje podanie suchego piasku bezpośrednio przed koła napędowe pojazdu szynowego. Pod radiatorem umieszczono pojemnik, do którego roztopiona woda z lodu została zbierana.

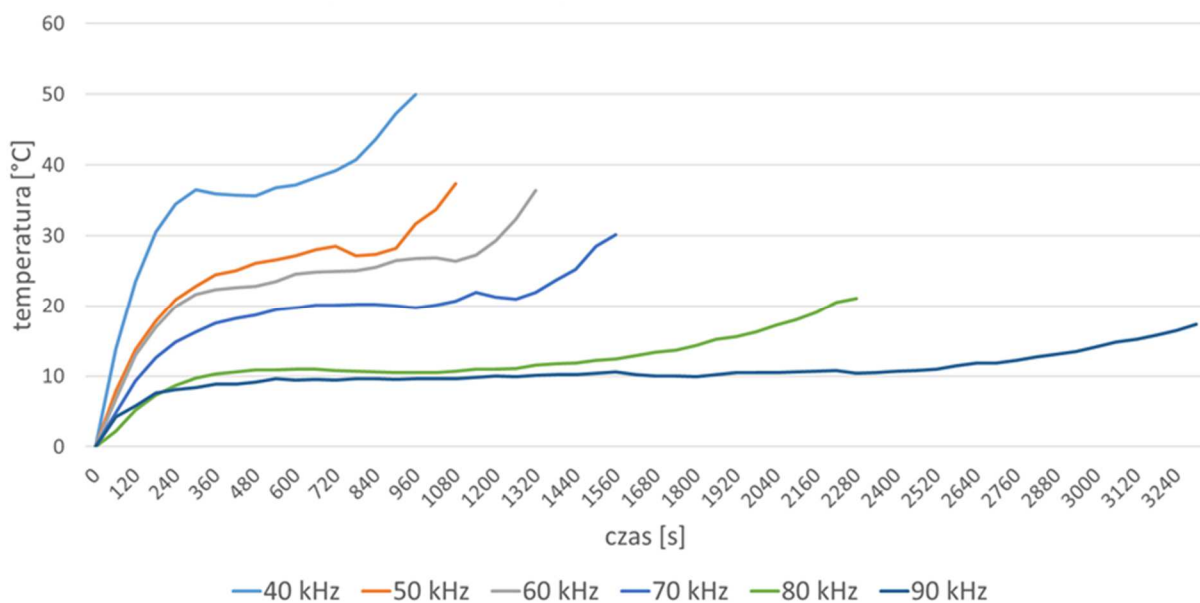


Rys. 5.4. Bryła lodu w końcowej fazie topnienia dla częstotliwości 40 kHz. Czujniki temperatury 1 i 2. Źródło: opracowanie własne.

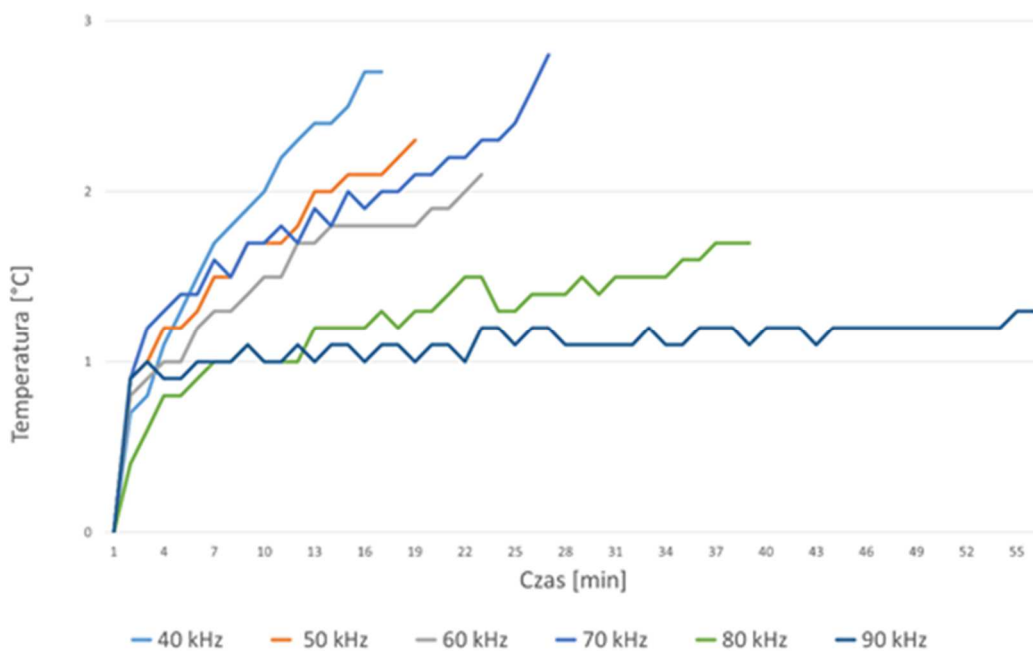
Badania laboratoryjne w komorze klimatycznej pozwoliły odwzorować warunki środowiskowe w temperaturze otoczenia 0 °C i -10 °C, zapewniając przy tym stałość temperatury otoczenia. Czujniki temperatury (rys 5.4), z których dokonywano odczytów, zostały zamontowane na radiatorze IOR (czujnik 1) oraz na stopce szyny (czujnik 2).

Na rysunku 5.5 przedstawiono wykresy czasu wytapiania brył lodu dla różnych częstotliwości układu IOR. Dla częstotliwości od 40 do 70 kHz czas wytapiania wynosi do pół godziny, a dla częstotliwości 80 i 90 kHz jest znacznie wydłużony.

Na rysunku 5.6 przedstawiono wykresy temperatury stopki szyny w trakcie wytapiania brył lodu dla różnych częstotliwości układu IOR. Temperatura radiatora IOR w trakcie wytapiania brył lodu dla częstotliwości układu od 40 do 90 kHz nie wpływa znacząco na podgrzanie stopki szyny [45]. Temperatura stopki szyny w żadnym z przypadków nie zwiększyła się powyżej 3 °C. Badania wykazały, że taki mały wzrost temperatury stopki szyny jest wystarczający do wytapiania ewentualnego śniegu z szyny i nie pozwala na powstawanie lodu z roztopionego śniegu.

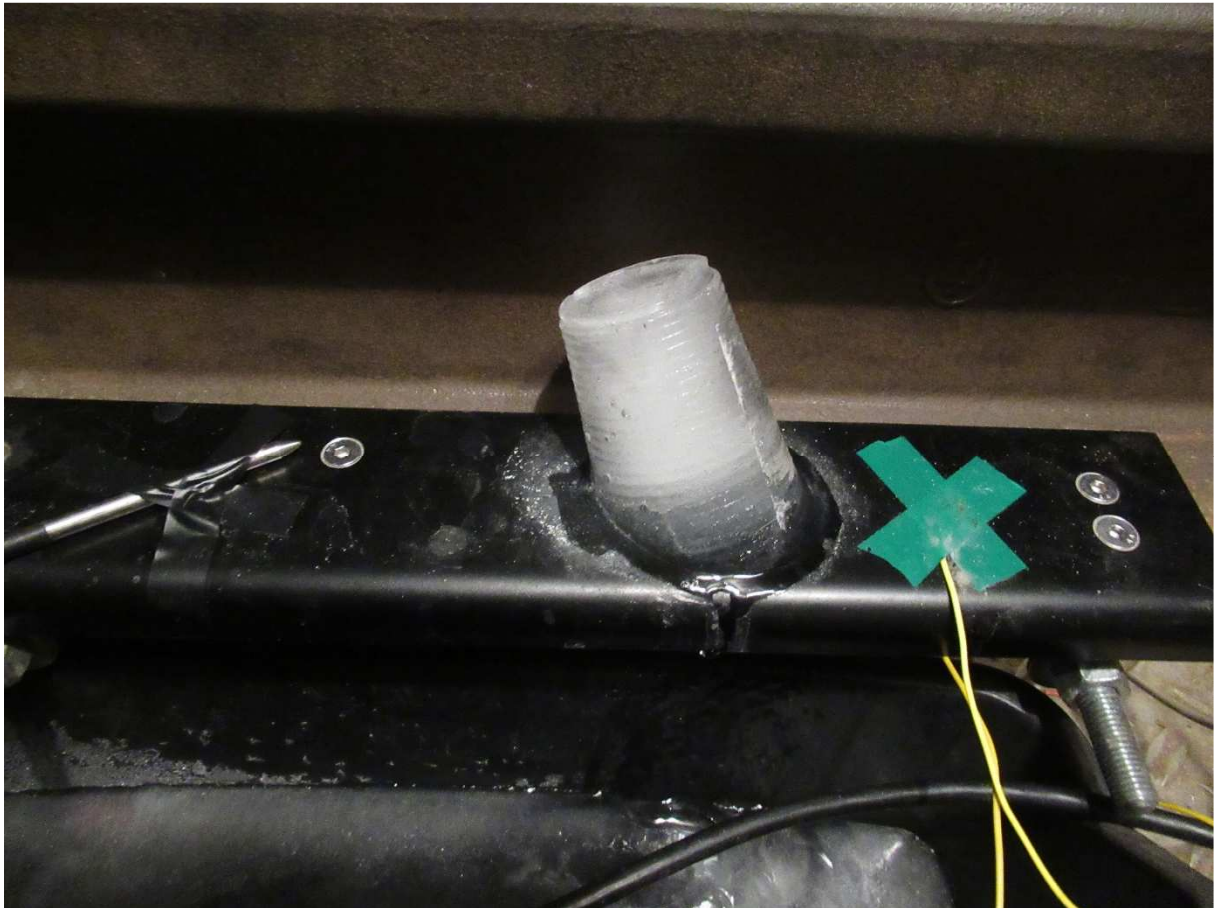


Rys. 5.5. Temperatura radiatora urządzenia IOR podczas topnienia bryły lodu dla częstotliwości od 40 do 90 kHz przy temperaturze początkowej 0 °C. Źródło: [45]



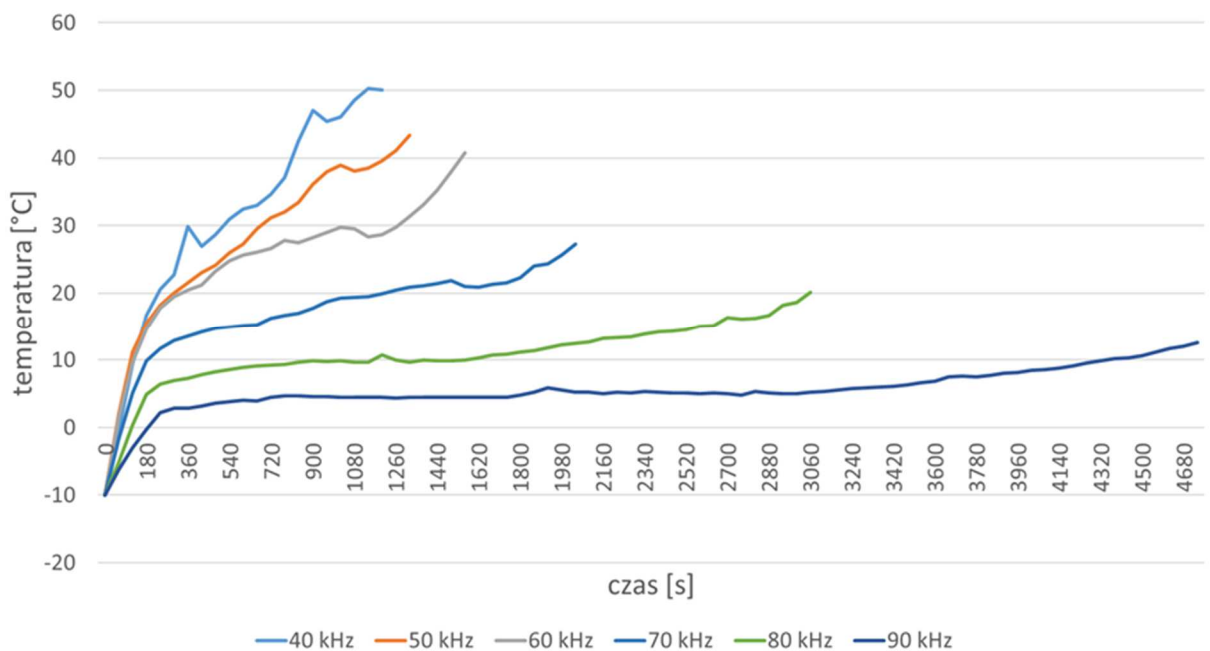
Rys. 5.6. Temperatura stopki szyny podczas topnienia bryły lodu dla układu IOR przy częstotliwościach pracy od 40 do 90 kHz przy temperaturze początkowej 0 °C (skokowe zmiany temperatury wynikają z rozdzielczości układu pomiarowego). Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 5.7 przedstawia bryłkę lodu w trakcie topnienia dla temperatury otoczenia -10°C . Woda po roztopieniu bryłki lodu ulega zamarznięciu ze względu na ujemną temperaturę otoczenia. Czas wytapiania w stosunku do temperatury otoczenia w okolicach 0°C uległ wydłużeniu, co jest naturalnym zjawiskiem wynikającym z warunków panujących w komorze klimatycznej.



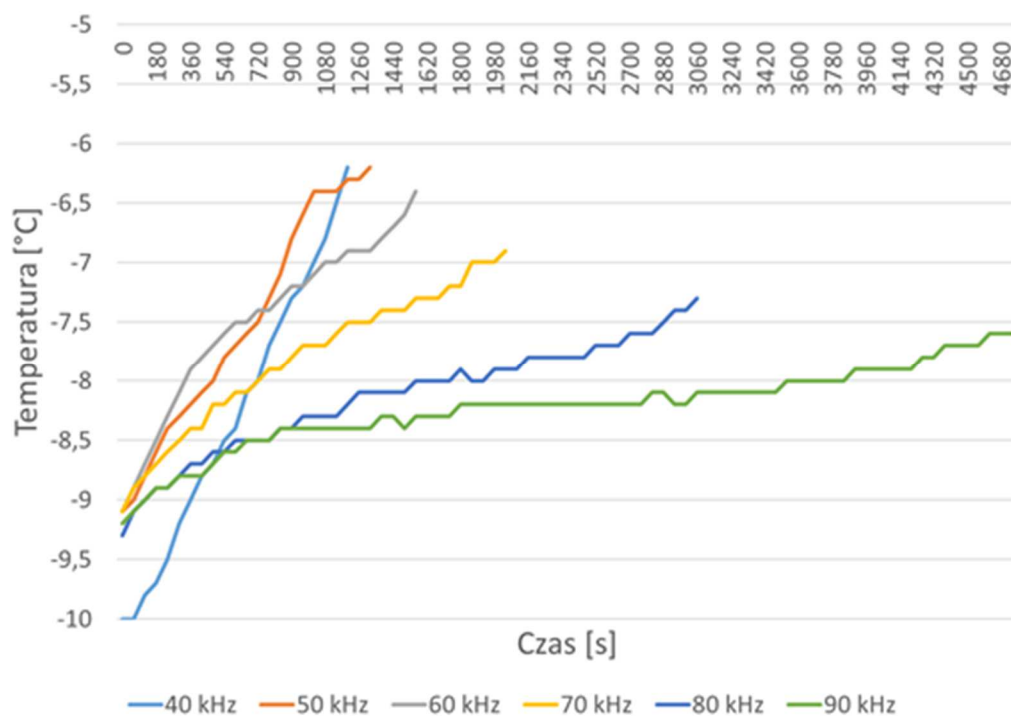
Rys. 5.7. Bryła lodu w trakcie topnienia dla częstotliwości 40 kHz. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 5.8 przedstawiono wykresy czasu wytapiania brył lodu dla różnych częstotliwości układu IOR. Dla częstotliwości od 40 do 70 kHz czas wytapiania wynosił od 1200 s do 2040 s, a dla częstotliwości 80 i 90 kHz jest znacznie wydłużony i wynosi od 3060 s do 4740 s.



Rys. 5.8. Temperatura radiatora urządzenia IOR podczas topnienia brył lodu dla częstotliwości od 40 do 90 kHz przy temperaturze początkowej $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Źródło: [45]

Na rysunku 5.9 przedstawiono wykresy temperatury stopki szyny w trakcie wytapiania brył lodu dla różnych częstotliwości układu IOR. Temperatury początkowe nie są równie dokładne $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ z powodu trudności uzyskania jednocześnie temperatury $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ dla radiatora oraz stopki szyny. Pojemność cieplna szyny znacznie to utrudniała. Różnica w zakresie do $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ w stosunku do temperatury radiatora IOR jest przyjęta w zakresie badania jako błąd pomiaru. W przypadku temperatury stopki szyny w badaniach celem było określenie temperatury w stosunku do temperatury początkowej. Temperatura radiatora IOR w trakcie wytapiania brył lodu dla częstotliwości układu od 40 do 90 kHz nie wpływa znacząco na podgrzanie stopki szyny. Temperatura stopki szyny w żadnym z przypadków nie zwiększyła się powyżej $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ od temperatury początkowej. Po wykonanych pomiarach stwierdzono, że wzrost temperatury stopki szyny dla temperatury otoczenia $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ nie wpływa znacząco na wytapianie ewentualnego śniegu lub lodu z szyny. Jedynym czynnikiem mającym wpływ na wytapianie lodu lub śniegu jest zabudowanie radiatora IOR w danej lokalizacji rozjazdu. Dodatkowo zabudowanie proponowanego dalej rozwiązania dla układu hybrydowego ze specjalnym grzejnikiem w okolicy siodełka jest w stanie zagwarantować optymalną pracę rozjazdów.



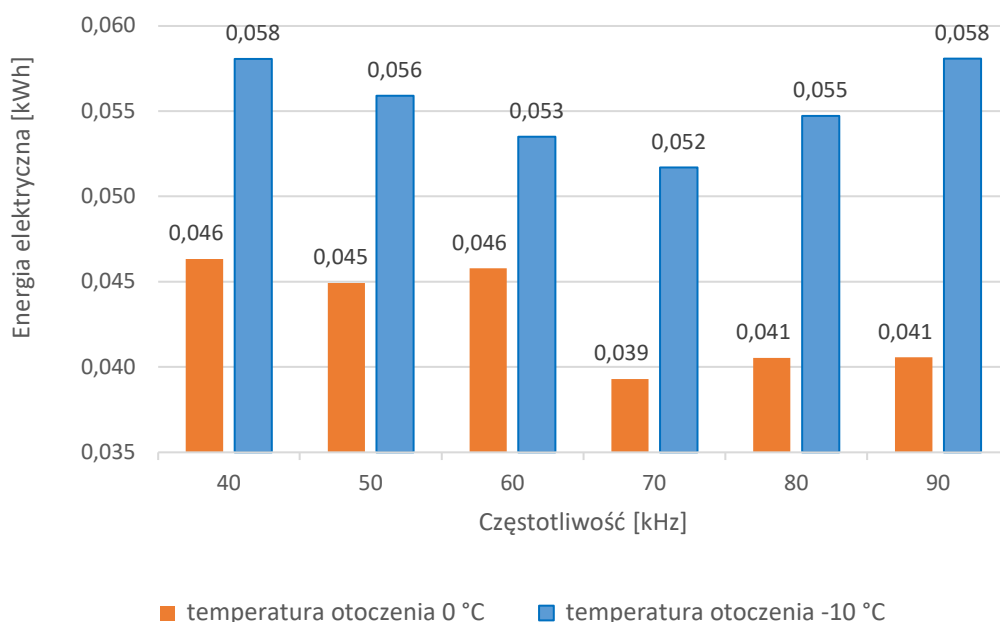
Rys. 5.9. Temperatura stopki szyny podczas topnienia brył lodu dla układu IOR przy częstotliwościach pracy od 40 do 90 kHz przy temperaturze początkowej -10 °C. Źródło: opracowanie własne.

W tabeli 5.1 przedstawiono czasy potrzebne do całkowitego wytopienia brył lodu, moc układu oraz zużycie energii elektrycznej przy różnych częstotliwości układu IOR dla temperatury otoczenia 0 °C i -10 °C.

Tabela 5.1. Wartości maksymalnego czasu wytopiania brył lodu w zależności od częstotliwości układu sterowania dla temperatury otoczenia 0 °C i -10 °C. Źródło: opracowanie własne.

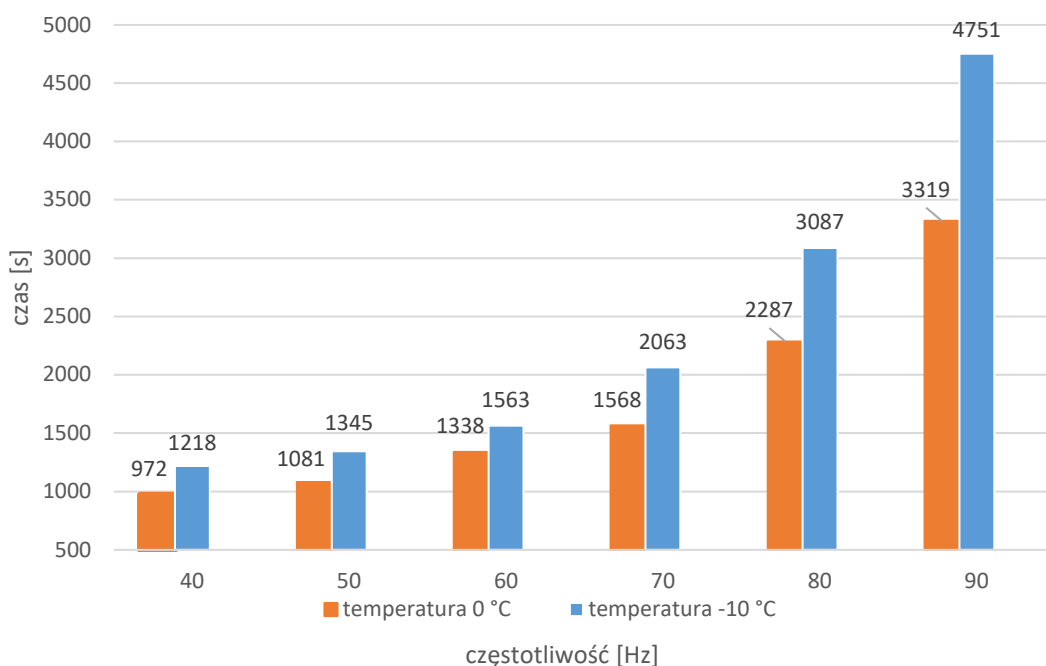
f [kHz]	Czas [s]		Moc [W]		Energia [kWh]	
	0 °C	-10 °C	0 °C	-10 °C	0 °C	-10 °C
40	972	1218	172	172	0,046	0,058
50	1081	1345	150	150	0,045	0,056
60	1338	1563	123	123	0,046	0,053
70	1568	2063	90	90	0,039	0,052
80	2287	3087	64	64	0,041	0,055
90	3319	4751	44	44	0,041	0,058

Na rysunku 5.10 przedstawiono wykres zużycia energii elektrycznej w trakcie wytapiania brył lodu dla różnych częstotliwości układu IOR. Najmniejsze zużycie energii elektrycznej wystąpiło dla częstotliwości pracy 70 kHz. Zużycie energii elektrycznej dla częstotliwości pracy układu od 40 do 70 kHz zmniejszało się wraz ze wzrostem częstotliwości pracy. Zależność ta wynikała prawdopodobnie z tego, że dla wysokiej temperatury radiatora przy 40 kHz roztapianie kostki lodu nie następowało zbyt szybko w stosunku do temperatury radiatora. Dla częstotliwości układu od 70 do 90 kHz czas roztapiania kostki lodu wraz ze wzrostem częstotliwości wydłużał się najprawdopodobniej z powodu oddziaływania czynników zewnętrznych (temperatury otoczenia). Warunki środowiskowe w komorze klimatycznej w zakresie temperatury otoczenia (0 °C i -10 °C) powodują schładzanie brył lodu, a radiator ze względu na jego niewielką temperaturę (około 10-20 °C) nie powoduje efektu szybkiego roztapiania kostki lodu.



Rys. 5.10. Energia elektryczna pobrana przez układ IOR przy częstotliwościach pracy od 40 do 90 kHz przy temperaturze otoczenia 0 °C i -10 °C. Źródło: opracowanie własne.

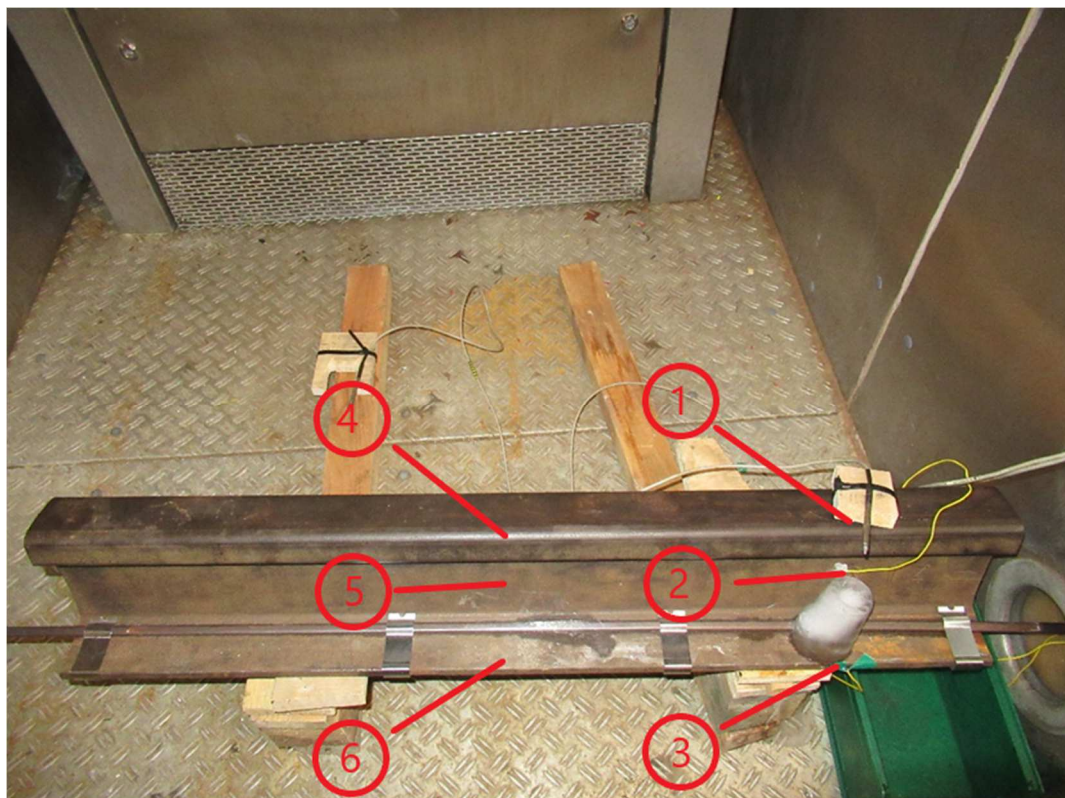
Na rysunku 5.11 przedstawiono wykres czasu wytapiania brył lodu dla różnych częstotliwości układu IOR. Pomiary zostały wykonane w komorze klimatycznej w zakresie temperatury otoczenia (0 °C i -10 °C). Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem częstotliwości pracy układu czas wytapiania brył lodu znacznie ulegał wydłużeniu.



Rys. 5.11. Czas wytapiania bryły lodu przez układ IOR przy częstotliwościach pracy od 40 do 90 kHz. Źródło: opracowanie własne.

5.1.2. Badania laboratoryjne wytapiania lodu dla urządzeń EOR

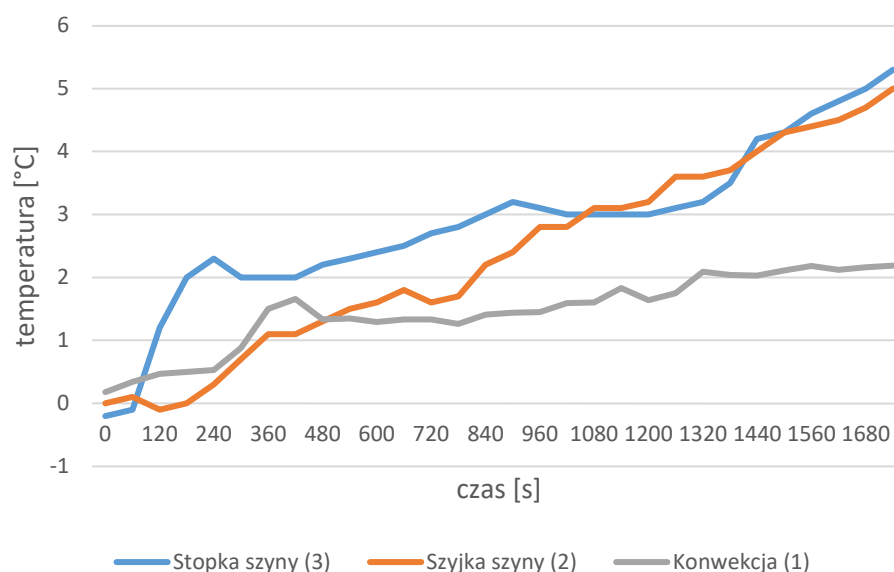
Badania zostały przeprowadzone w taki sposób, że na szynie kolejowej typu 60E1 zamontowano grzejnik tradycyjnego ogrzewania rozjazdów o standardowej mocy 900 W za pomocą standardowych uchwytów mocujących grzejnik do szyn. Taki zestaw elementów umieszczono w komorze klimatycznej (rys. 5.12) celem wykonania pomiarów dla temperatury otoczenia 0 °C oraz -10 °C. W celu wykonywania pomiarów temperatury zamontowano czujniki na stopce szyny, na szyjce szyny oraz nad grzejnikiem na poziomie główki szyny w punktach pokazanych na rysunku 5.13. Pomiary wykonywano w trzech układach. W pierwszym układzie bryła lodu umieszczona była na stopce szyny w pobliżu czujników. W drugim układzie bryła lodu była oddalona od czujników i umieszczona na środku szyny, gdzie umieszczono czujnik temperatury nad kostką lodu na poziomie główki szyny. W trzecim układzie bryła lodu była oddalona od czujników i umieszczona na środku szyny, gdzie czujnik temperatury nad kostką lodu na poziomie główki szyny również jest umieszczony w okolicy pozostałych czujników. Dla wykonywania badań na stopce szyny na grzejniku umieszczano jednakowe kostki lodu, które podlegały roztopieniu pod wpływem pracującego w różnych warunkach, układu, tj. zmiana dotyczyła temperatury otoczenia, miejsca umieszczenia kostki lodu oraz lokalizacji czujników temperatury.



Rys. 5.13. Bryła lodu w komorze klimatycznej w trakcie topnienia dla układu EOR. Czujniki temperatury dla trzech układów pomiarowych znajdowały się w punktach 1, 2, 3, 4, 5 i 6. Źródło: opracowanie własne.

W komorze klimatycznej umieszczono elementy tradycyjnego ogrzewania rozjazdów kolejowych EOR. Podczas wytapiania brył lodu wykonywano pomiary czasu wytapiania lodu oraz mocy pobieranej przez układ. Pomiary wykonywane dla trzech układów pomiarowych polegały na wykorzystaniu czujnika 1 lub 4 (pomiar temperatury konwekcji), czujnika 2 lub 5 (pomiar temperatury szyjki szyny) oraz czujnika 3 i 6 (pomiar temperatury stopki szyny). Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresach 5.14, 5.15 i 5.16.

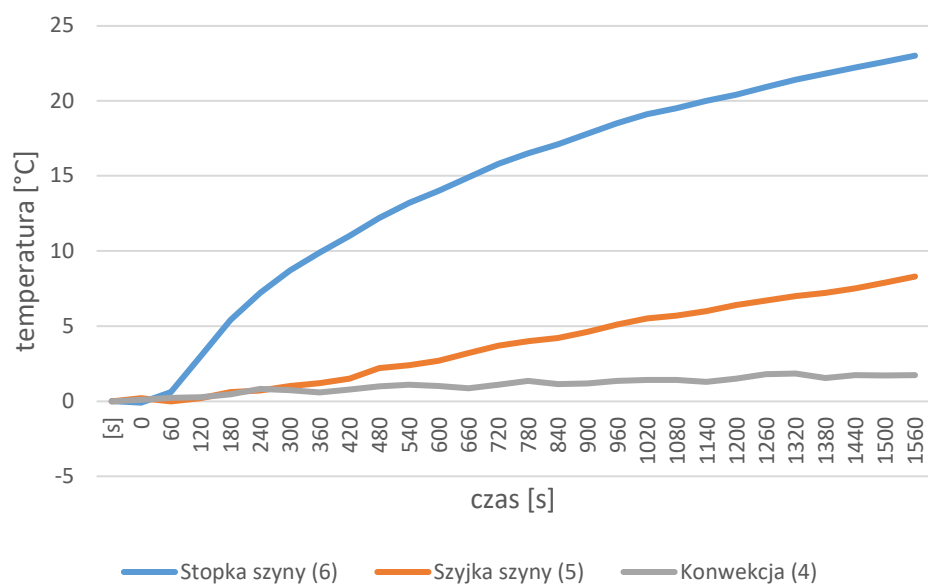
Na rysunku 5.14 przedstawiono wykresy w układzie pomiarowym pierwszym opisanym powyżej, gdzie wyniki zostały odczytane podczas badania tradycyjnego ogrzewania rozjazdów kolejowych dla temperatury otoczenia 0 °C (czujniki w punktach 1, 2 i 3).



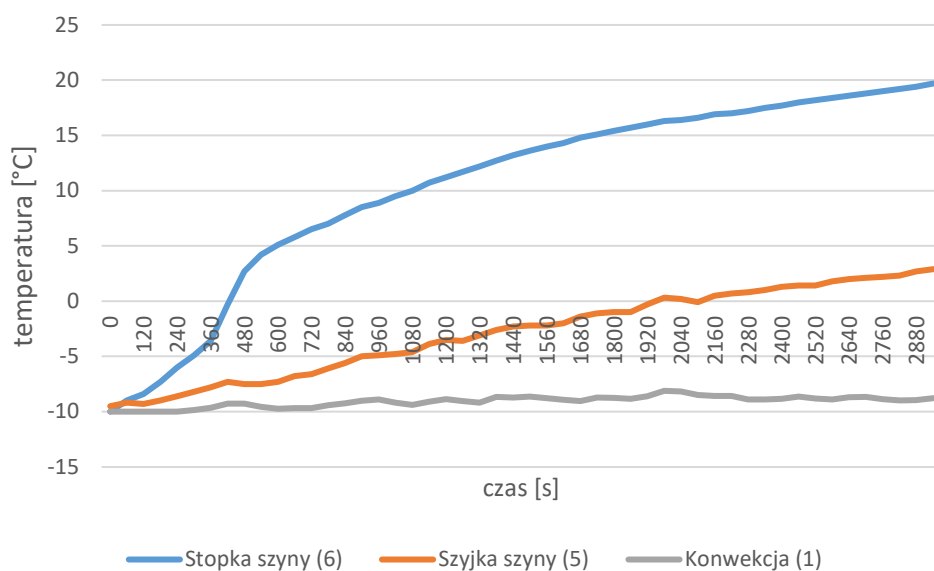
Rys. 5.14. Temperatura stopki, szyjki szyny oraz otoczenia nad powierzchnią kostki lodu podczas topnienia (konwekcja). Bryła lodu na czujnikach temperatury szyny przy temperaturze początkowej 0 °C, pomiary temperatury w punktach 1, 2 i 3 (rys. 5.13). Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 5.15 przedstawiono wykresy w układzie pomiarowym drugim opisanym powyżej, gdzie wyniki zostały odczytane podczas badania tradycyjnego ogrzewania rozjazdów kolejowych dla temperatury otoczenia 0 °C (czujniki w punktach 4, 5 i 6). Bryła lodu była usytuowana w odległości 40 cm od czujników.

Na rysunku 5.16 przedstawiono wykresy w układzie pomiarowym trzecim opisanym powyżej, gdzie wyniki zostały odczytane podczas badania tradycyjnego ogrzewania rozjazdów kolejowych dla temperatury otoczenia -10°C (czujniki w punktach 1, 5 i 6). Bryła lodu była usytuowana w odległości 40 cm od czujników.

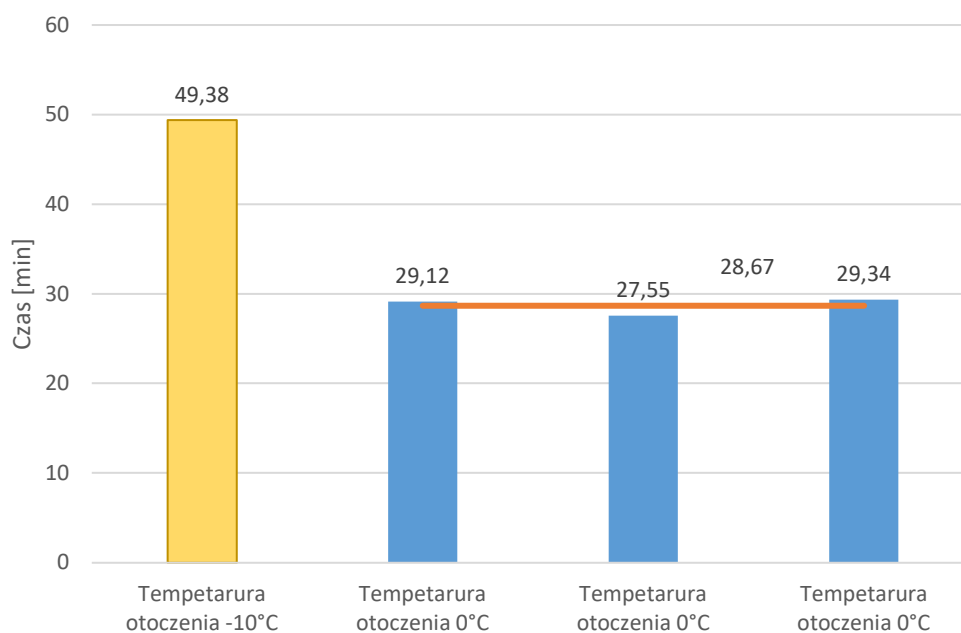


Rys. 5.15. Temperatura stopki, szyjki szyny oraz otoczenia nad powierzchnią kostki lodu podczas topnienia (konwekcja). Bryła lodu na środku szyny przy temperaturze początkowej 0 °C, pomiary temperatury w punktach 4, 5 i 6 (rys. 5.13). Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.16. Temperatura stopki, szyjki szyny oraz otoczenia nad powierzchnią kostki lodu podczas topnienia (konwekcja). Bryła lodu na środku szyny przy temperaturze początkowej -10 °C, pomiary temperatury w punktach 1, 5 i 6 (rys. 5.13). Źródło: opracowanie własne.

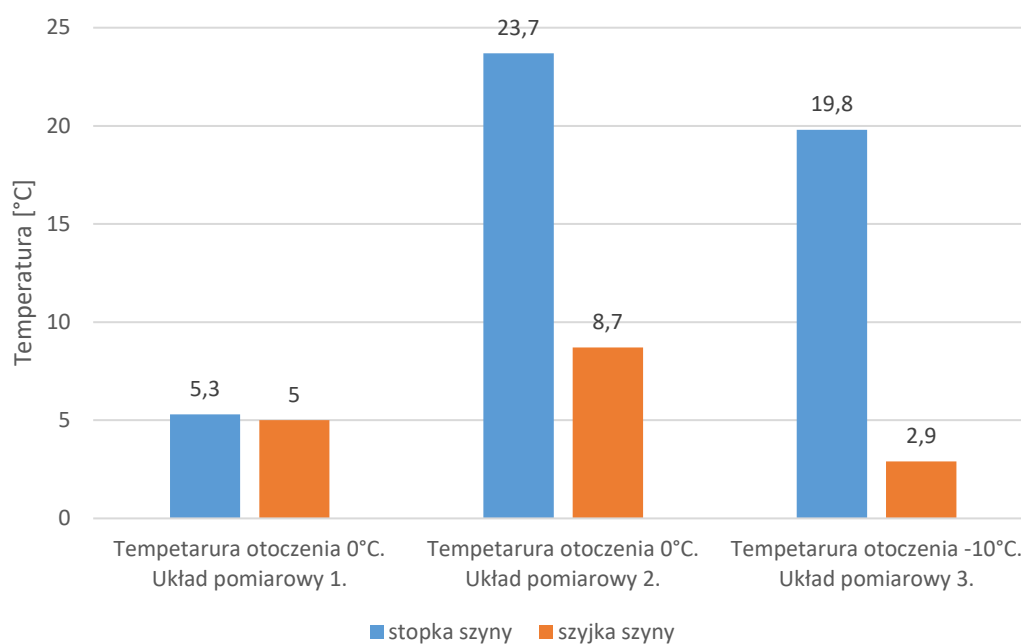
Na rysunku 5.17 przedstawiono czas, w którym nastąpiło roztopienie kostki lodu. Dla temperatury otoczenia $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ czas ten wynosił prawie 50 minut. Dla temperatury otoczenia $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ średni czas z trzech pomiarów wynosił prawie 29 minut. Dla temperatury otoczenia $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ czas wytopiania jest znacznie dłuższy z powodu pobierania bardzo dużej energii cieplnej z grzejnika do szyny w celu jej ogrzania, a tym samym niewykorzystywanie energii cieplnej w celu wytopiania kostki lodu. Ogrzewanie szyny przez grzejnik bezpośrednio nie wpływa na wytopienie kostki lodu, lecz jest to działanie pasożytnicze.



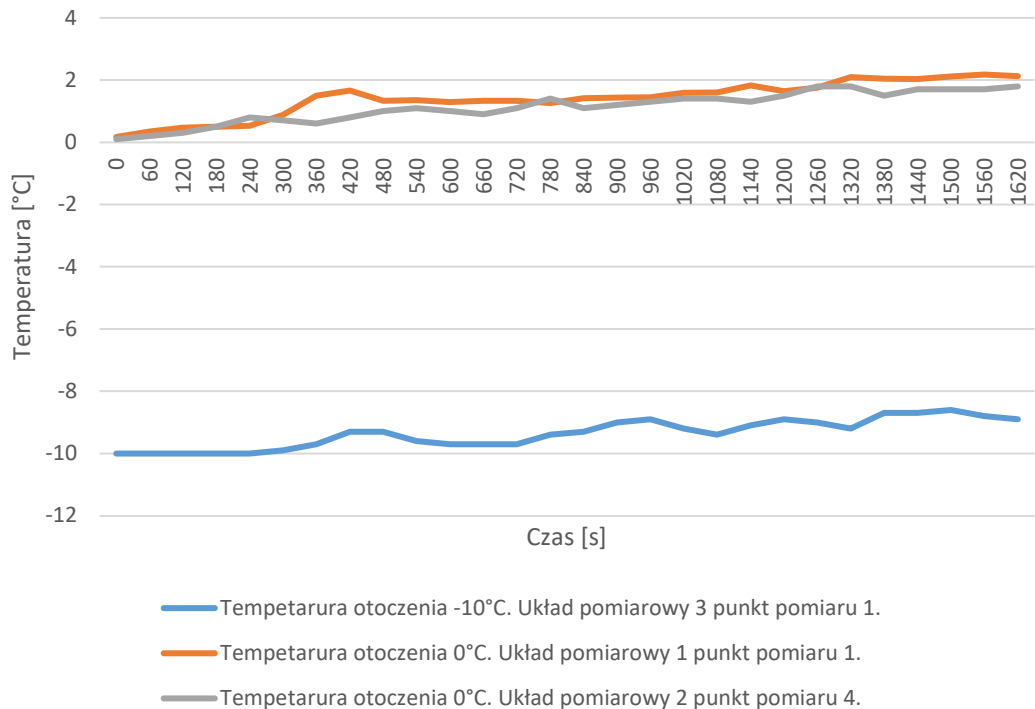
Rys. 5.17. Czas wytopiania bryły lodu dla tradycyjnego urządzenia EOR.
Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 5.18 przedstawiono temperaturę stopki oraz szyjki szyny w trakcie wytopiania kostki lodu dla tradycyjnego urządzenia EOR w różnych temperaturach otoczenia. Pomiarzy temperatury stopki i szyjki szyny dla temperatury otoczenia $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ wykazują bardzo dużą różnicę. Temperatura stopki szyny po wytopieniu kostki lodu w czasie prawie 50 minut wynosi $19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, natomiast temperatura szyjki szyny w tym samym czasie osiągnęła wartość $5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. W związku z tym, że bryła lodu w tym czasie była oddalona od czujników temperatury, energia cieplna wytworzona przez grzejnik w bardzo dużej części poprzez przewodzenie ciepła przedostała się do szyny, która pracowała jako radiator dla źródła ciepła powstającego w grzejniku. Pomiarzy wykonywane dla temperatury otoczenia $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ wykazały, że w przypadku kiedy bryła lodu jest umieszczona w pobliżu czujników temperatury, temperatura stopki szyny po upływie czasu około 29 minut nie wykazywała znacznego wzrostu powyżej temperatury szyjki szyny. Fakt ten świadczy o tym, że energia cieplna w dużej części jest wykorzystywana do wytopienia kostki lodu, ale jej część na skutek przewodnictwa ciepła jest wykorzystywana do podgrzewania szyny.

W przypadku pomiarów wykonywanych dla kostki lodu umieszczonej w oddaleniu od czujników temperatury, po czasie, kiedy nastąpiło wytopienie lodu, temperatura stopki szyny była 23,7 °C, co wskazuje jednoznacznie na bardzo duży przepływ energii cieplnej do szyny. Energia cieplna przekazana do szyny w małym stopniu będzie wykorzystywana do wytopienia śniegu lub lodu pomiędzy iglicą a opornicą rozjazdu. Energia cieplna z opornicy zostanie przekazana do otoczenia od strony zewnętrznej rozjazdu, co jest stratą energii dla takiego układu. Temperatura otoczenia na poziomie główki szyny poprzez konwekcję ciepła z 0 °C zmieniła się do około 2 °C (rys. 5.19 i 5.20). Zwiększenie temperatury o około 2 °C jest spowodowane dużym odbiorem ciepła przez schłodzone powietrze w komorze klimatycznej do 0 °C oraz małą konwekcją w takich warunkach klimatycznych dla czasu około 29 minut, przy początkowym znacznym nagrzewaniu szyny przez grzejnik.

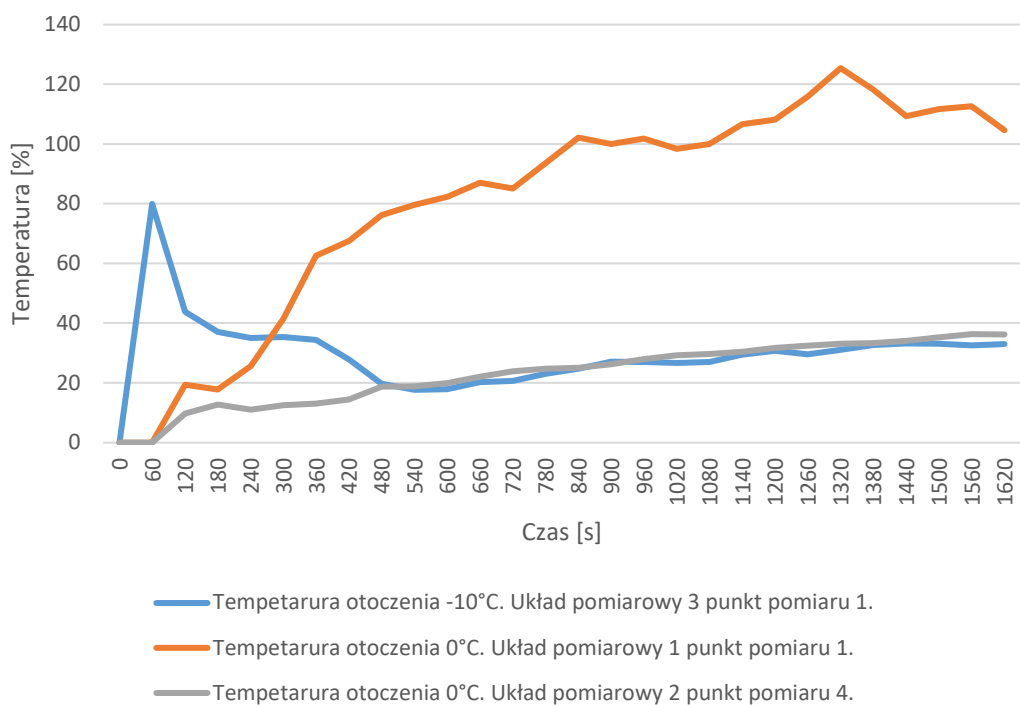


Rys. 5.18. Temperatura stopki i szyjki szyny urządzenia EOR po wytopieniu kostki lodu. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.19. Temperatura otoczenia na poziomie główki szyny mierzona nad grzejnikiem EOR. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 5.20 przedstawiono temperaturę szyjki szyny w stosunku do temperatury stopki szyny wyrażoną w procentach. Największa procentowa różnica temperatury występuje dla przypadku wytapiania kostki lodu w temperaturze otoczenia 0 °C, gdzie bryła lodu była umieszczona w okolicy czujników temperatury. Fakt ten świadczy o tym, że znaczna część energii cieplnej została wykorzystywana do wytopienia lodu w okolicach stopki szyny, ale niestety przez przewodnictwo ciepła od grzejnika do szyny energia cieplna również nagrzewała szynę, w tym szyjkę szyny. Dla przypadków, kiedy bryła lodu była umieszczona w odadaleniu od czujników temperatury, niezależnie od temperatury otoczenia zwiększenie temperatury szyjki oraz stopki szyny było na podobnym poziomie. Duży pik widoczny w początkowym okresie (kolor niebieski) wynika z bardzo małych wartości temperatury.



Rys. 5.20. Temperatura szynki szyny w stosunku do temperatury stopki szyny.
 Źródło: opracowanie własne.

W trakcie wykonanych pomiarów moc grzejnika urządzenia EOR wynosiła $P = 869 \text{ W}$, a średnie napięcie zasilające z wykonanych pomiarów było 214 V . Napięcie 214 V , pomimo mniejszych wartości od standardowego poziomu napięcia 230 V , jest napięciem odwzorowującym faktyczne napięcie w warunkach pracy urządzeń EOR podczas normalnej pracy. Rozdzielnie urządzeń EOR o mocy zainstalowanej około 100 kW pracują w odległościach przeważnie około od 250 do 500 m od przyłącza i zasilane są przeważnie linią kablową YAKXS $4 \times 240 \text{ mm}^2$. Powoduje to spadek napięcia na podobnym poziomie jak w warunkach pomiarów laboratoryjnych w porównaniu do urządzeń końcowych EOR. Jest to napięcie mniejsze od standardowej wartości 230 V o około 7% . Wartość ta pozostaje w zakresie dopuszczalnej tolerancji napięcia zasilającego odbiory elektrycznego ogrzewania rozjazdów. Mniejsza wartość napięcia zasilającego w komorze klimatycznej jest bardzo zbliżona do warunków panujących w terenie, co znacznie wpływa na pobór energii elektrycznej, w tym na czas wytapiania śniegu lub lodu.

5.1.3. Podsumowanie badań laboratoryjnych wytapiania lodu

Dla urządzenia IOR temperatura radiatora w miejscu przymocowania czujnika osiągnęła od około 20 do 50 °C , natomiast temperatura szyny osiągnęła wartości od 1 do 3 °C po zakończeniu procesu wytapiania brył lodu. W porównaniu do urządzeń tradycyjnego ogrzewania rozjazdów kolejowych EOR można zauważyć znaczne zmniejszenie intensywności nagrzewania szyny kolejowej ze względu na odseparowanie źródła ciepła (radiatora) od stopki

szyny. Wzrost temperatury stopki szyny o kilka stopni Celsjusza powoduje pozytywne efekty w postaci wytapiania śniegu lub lodu nagromadzonego w okolicach stopki lub szyjki szyny. Odseparowanie radiatora IOR od stopki szyny znacznie poprawia efektywność wytapiania lodu lub śniegu, ze względu na mniejsze przekazywanie energii cieplnej do szyny. Analiza czasu wytapiania brył lodu oraz zużytej energii elektrycznej dla różnych częstotliwości pracy układu IOR pokazała, że optymalna częstotliwość pracy układu wynosi około 70 kHz. Wartość ta umożliwia osiągnięcie bardzo dobrego efektu wytapiania śniegu lub lodu przy relatywnie niskim zużyciu energii elektrycznej w porównaniu do klasycznego urządzenia EOR.

5.2. Badania terenowe wytapiania śniegu

5.2.1. Wyniki pomiarów przy różnych częstotliwościach układu IOR

Urządzenia indukcyjnego ogrzewania rozjazdów poddano badaniu w terenie po wcześniejszych opadach śniegu. Przestrzeń roboczą rozjazdu kolejowego odwzorowano z uwzględnieniem lokalizacji urządzenia pomiędzy iglicą a opornicą. Dla wykonywania badań uformowano jednakowe warstwy śniegu o wymiarach 20 cm x 12 cm x 5 cm (rys. 5.21).



Rys. 5.21. Uformowana warstwa śniegu w formie prostopadłościanu.
Źródło: opracowanie własne.

Pomiary urządzenia IOR w terenie wykonywano dla temperatury otoczenia $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Częstotliwość pracy układu była ustawiana od 40 kHz do 80 kHz dla takich samych warstw śniegu, które ulegały wytapianiu. Warstwę śniegu w trakcie wytapiania pokazano na rysunku 5.22, a efekt wytapiania w końcowej fazie pokazano na rysunku 5.23.

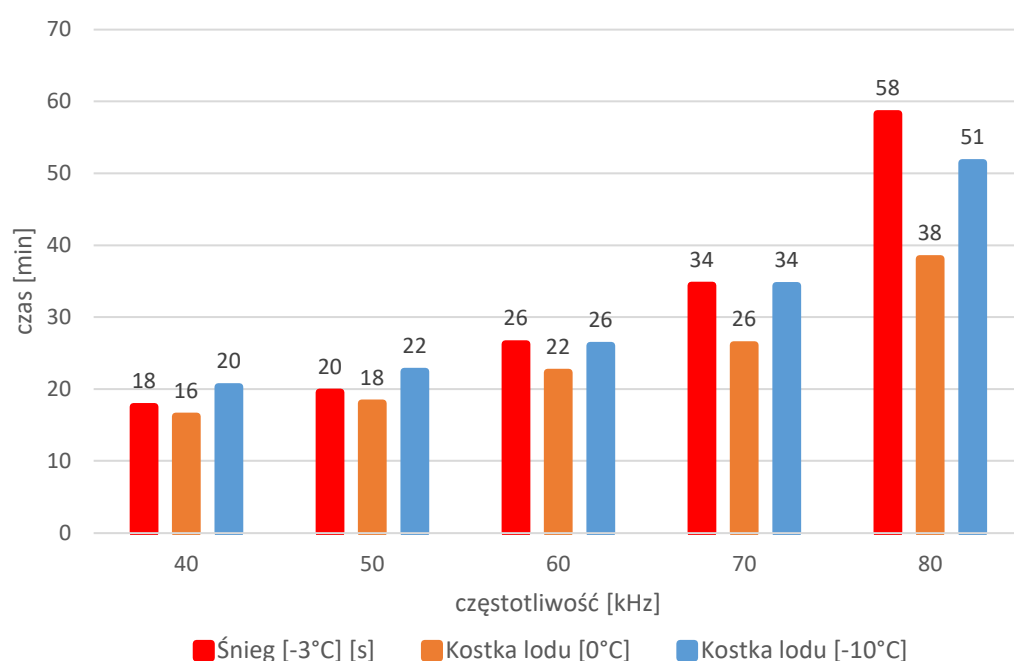


Rys. 5.22. Wytapiana warstwa śniegu po czasie 12 minut. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.23. Wytapianie śniegu po czasie 17 minut. Warstwa śniegu w końcowej fazie wytapiania. Źródło: opracowanie własne.

Czas wytapiania śniegu w zależności od częstotliwości zilustrowano na wykresie 5.24. Pokazano na nim także czasy dotyczące topnienia lodu z podrozdziału 5.1. Z wykresu wytapiania warstw śniegu przez układ IOR wynika, że wpływ częstotliwości pracy jest większy niż w przypadku występowania lodu. Zwiększenie częstotliwości powoduje relatywnie większe wydłużenie czasu wytapiania śniegu niż lodu. Zjawisko to jest spowodowane dużą powierzchnią warstw śniegu, która dla niższych częstotliwości pracy układu jest szybciej wytapiana, a dla częstotliwości wyższych czynniki zewnętrzne bardziej wpływają na ochłodzenie warstwy śniegu. Radiator IOR przy wyższych częstotliwościach mniej się nagrzewa, a temperatura otoczenia znacznie spowalnia proces topnienia śniegu.



Rys. 5.24. Wytapianie warstwy śniegu oraz brył lodu. Źródło: opracowanie własne.

5.2.2. Wyniki pomiarów dla układu EOR

Urządzenie EOR poddano badaniu w terenie po wcześniejszych opadach śniegu. Jak poprzednio, przestrzeń robocza rozjazdu kolejowego odwzorowano z uwzględnieniem lokalizacji urządzenia pomiędzy iglicą a opornicą. Dla wykonywania badań uformowano jednakowe warstwy śniegu w formie prostopadłościanu (takie same jak do badań układu IOR) (rys. 5.25). Pomiary urządzenia EOR w terenie wykonywano dla temperatury otoczenia -3 °C.



Rys. 5.25. Uformowana warstwa śniegu w formie prostopadłościanu.
Źródło: opracowanie własne.

Efekt wytapiania warstw śniegu dla tradycyjnego układu ogrzewania jest inny, niż w przypadku ogrzewania indukcyjnego, ponieważ po czasie 12 minut od rozpoczęcia pracy układu, w pierwszej kolejności następuje wytapianie śniegu w okolicach stopki szyny (jest to przedstawione na rys. 5.26). Podczas badań stwierdzono znaczne nagrzewanie się stopki i szyki szyny.



Rys. 5.26. Warstwa śniegu po 12 minutach wytapiania. Źródło: opracowanie własne.

Po czasie 28 minut od rozpoczęcia pracy układu (rys. 5.27) w trakcie procesu wytapiania śniegu zaobserwowano, że śnieg nie ulega całkowitemu wytopieniu. W okolicach grzejnika warstwa śniegu została wytopiona w odległości około 2-3 cm od grzejnika. Dolna część szyny w dalszym ciągu jest osuszona ze śniegu oraz pozostałości wody. Zaobserwowano, że wytapianie śniegu następuje poprzez bezpośrednią styczność bryły z szijką oraz stopką szyny.



Rys. 5.27. Warstwa śniegu po 28 minutach wytapiania. Źródło: opracowanie własne.

Po czasie 43 minut od rozpoczęcia pracy układu (rys. 5.28), gdzie podczas badań występował bardzo lekki opad śniegu, zaobserwowano z powodu dystrybucji energii cieplnej do szyny osuszenie dolnej części szyny. Dodatkowo zaobserwowano roztopienie śniegu z główki szyny wraz z postępującym jej osuszaniem. W dalszym ciągu nie nastąpiło wytopienie bryły śniegu, jak to zaobserwowano dla układu IOR.



Rys. 5.28. Warstwa śniegu po 43 minutach wytapiania. Źródło: opracowanie własne.

Po czasie 68 minut od rozpoczęcia pracy układu (rys. 5.29) zaobserwowano osuszenie główki szyny poprzez jej ciągłe nagrzewanie przez grzejnik. W dalszym ciągu nie nastąpiło całkowite wytopienie bryły śniegu. Dystrybucja ciepła z grzejnika do szyny dla tradycyjnego układu ogrzewania rozjazdów jest efektem niepożądanym, ponieważ zamiast wytapiać śnieg lub lód z przestrzeni rozjazdu, w szczególności pomiędzy iglicą a opornicą, następuje przekazanie części energii cieplnej do szyny, a następnie do otoczenia. Ogrzana szyna dla tradycyjnego układu ogrzewania rozjazdów staje się dla takiego systemu radiatorem, który, ze względu na dużą pojemność cieplną oraz znaczną powierzchnię szyny, powoduje małą sprawność dla takiego układu.



Rys. 5.29. Wytapianie śniegu w pobliżu grzejnika dla układu EOR po 68 minutach.
Źródło: opracowanie własne.

Po czasie 70 minut od rozpoczęcia pracy układu (rys. 5.30) nastąpiła stabilizacja w zakresie wytapiania warstwy śniegu. Cała powierzchnia szyny, ze względu na dystrybucję ciepła z grzejnika do szyny, została osuszona (na główce szyny pozostały jedynie pojedyncze krople wody). Zaobserwowano, że dalsze roztapianie warstwy śniegu praktycznie się zatrzymało. W porównaniu do układu IOR wytapianie warstwy śniegu następowało znacznie wolniej, gdzie nawet po czasie 70 minut nie nastąpiło jej całkowite roztopienie. Wniosek z przeprowadzonego badania jest taki, że roztapianie śniegu zachodzi prawidłowo, gdy urządzenie EOR jest załączone do pracy w trakcie opadów śniegu. Padający śnieg, opadając na ogrzane części szyny, jest szybko roztapiany. Również w przypadku przejeżdżającego pojazdu szynowego następowałoby jego nawianie na ogrzane części szyny i w konsekwencji jego roztopienie. W przypadku gdy temperatura zewnętrzna byłaby poniżej $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i występowałyby opady śniegu, dochodziłoby do roztapiania śniegu, nie byłoby możliwości powstawania lodu na kluczowych częściach rozjazdu (przestrzeń pomiędzy iglicą a opornicą). W przypadku, gdy urządzenia EOR są wyłączone z pracy, w danym rozjeździe całkowite przywrócenie go do sprawności technicznej byłoby utrudnione z powodu dość długiego roztapiania śniegu, z którego powstałaby duża powierzchnia w postaci warstwy śniegu. Moc układu elektrycznego ogrzewania rozjazdów w trakcie wykonywanych pomiarów wynosiła $P = 973\text{ W}$.



Rys. 5.30. Wytapianie warstwy śniegu w pobliżu ogrzanej i osuszonej szyny po czasie 70 minut. Widoczny nawis śniegu, który jest niewytopiony. Źródło: opracowanie własne.

5.2.3. Pomiary kamerą termowizyjną urządzeń EOR i IOR

Jednymi z nowoczesnych narzędzi pomiarowych są kamery termowizyjne, które pozwalają określić rozkład temperatury na powierzchni badanego materiału [55,56]. Za ich pomocą, po analizie natężenia promieniowania emitowanego z badanego obiektu w paśmie promieniowania podczerwonego, z otrzymanych termogramów można w sposób zdalny dokonać odczytu rozkładu temperatury na powierzchni badanego elementu. W tym przypadku dokonano badania elementów wykonawczych urządzenia elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych EOR oraz IOR.

Pomiary termowizyjne wykonano dnia 12.02.2021 r. w cieniu przy bezwietrznej pogodzie oraz temperaturze otoczenia $T_o \approx -13$ °C. Na stopce szyny zalegała warstwa zmarzniętego śniegu. Pomiary wykonano za pomocą kamery termowizyjnej FLIR T1020 v. 2.3 firmy FLIR, numer seryjny: 72502648 zawierającej oprogramowanie wersji: 3.12.66 oraz optykę 27° o ogniskowej $f = 36,0$ mm i polu widzenia 28° x 21°. Rozdzielczość geometryczna niechłodzonej, mikrobolometrycznej matrycy detektorów podczerwieni kamery wynosiła: 1024 x 768 pikseli o rozmiarze detektora wynoszącym 17 μ m. Zastosowano kamerę długofalową LWB (ang. Long Wave Bandwidth) o zakresie widmowym 7,5-14 μ m oraz czułości temperaturowej, tzw NETD < 20 mK przy +30 °C (NETD = Noise Equivalent Temperature Difference). Kamera posiadała aktualne świadectwo wzorcowania z dnia 05.08.2020 r.

Pomiary wykonano w ten sposób, że rejestrowano przebieg nagrzewania w układach IOR oraz EOR przy użyciu różnych metod i częstotliwości w postaci filmu w podczerwieni. Wykonano dodatkowo termogramy układów w stanie cieplnie ustalonym.

W idealnych warunkach laboratoryjnych, tj. przy założeniu prawie bezbłędnej wczytania pięciu wartości do mikrokontrolera kamery termowizyjnej, związanych z tzw. modelem pomiarowym kamery [55,56], tj.: emisyjności obiektu ϵ_{ob} , temperatury otoczenia T_o , temperatury atmosfery T_{atm} , wilgotności względnej atmosfery $\omega\%$ oraz odległości d kamera - obiekt, producent podaje, że dla użytego w pomiarach zakresu pomiarowego -40 °C do +150 °C dokładność pomiaru wynosi odpowiednio:

- ± 2 °C dla podzakresu od -40 °C do +5 °C,
- ± 1 °C dla podzakresu od +5 °C do +100 °C,
- ± 1 % dla podzakresu od +100 °C do +150 °C.

Należy podkreślić, że w opisywanej sytuacji pomiarowej największy wpływ na dokładność pomiaru miała dokładność wyznaczania emisyjności ϵ_{ob} powierzchni badanego obiektu. Ze względu na niewielką odległość d kamera – obiekt, rzędu poniżej 1 metra, wpływ pozostałych czterech wielkości na dokładność pomiaru można pominąć. Należy zaznaczyć, że szacowanie dokładności pomiaru temperatury kamerą termowizyjną jest procesem złożonym i szeroko opisanym przykładowo w monografiach [55,56].

Na rysunkach 5.31, 5.32 i 5.33 przedstawiono przygotowany śnieg przeznaczony do wytopienia przez grzejnik urządzenia EOR. Śnieg został umiejscowiony na stopce szyny w formie warstwy o wymiarach wysokość 1,5 cm x szerokość 7 cm x długość 100 cm.



Rys. 5.31. Wytapianie śniegu w układzie EOR po czasie 30 sekund.
Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 5.32 przedstawiono efekt wytapiania śniegu. Można zauważyć, że proces ten zachodzi w pobliżu grzejnika.



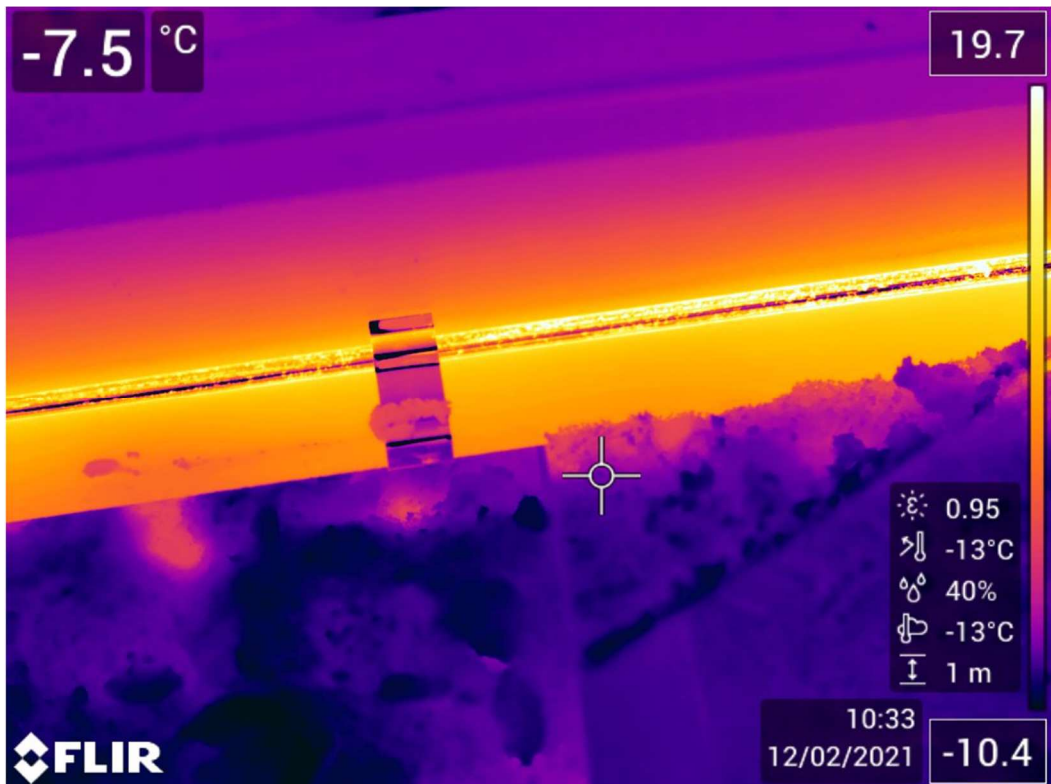
Rys. 5.32. Wytapianie śniegu w układzie EOR po czasie 7 minut.
Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 5.33 przedstawiono końcową fazę wytapiania śniegu. Proces zachodzi najintensywniej w pobliżu grzejnika, lecz jego efekty widoczne są także na stopce i szyjce szyny.

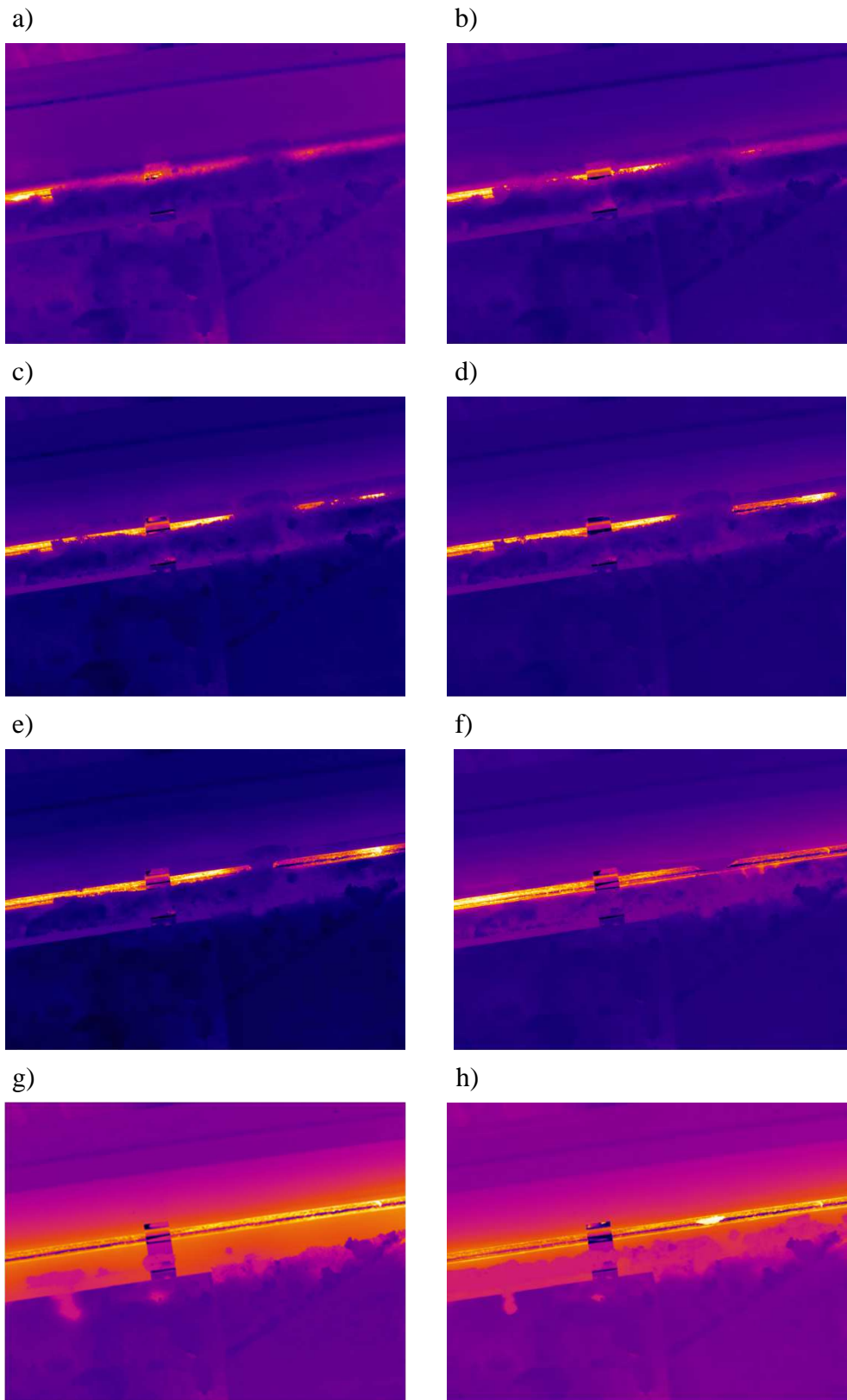


Rys. 5.33. Wytapianie śniegu w układzie EOR po czasie 12 minut.
Źródło: opracowanie własne.

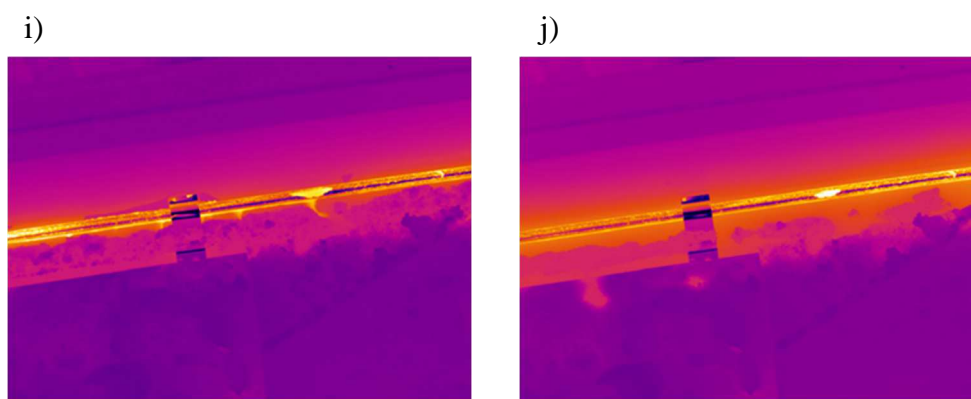
Na rysunkach 5.34 i 5.35 przedstawiono termogramy wytapiania warstwy śniegu dla układu EOR.



Rys. 5.34. Termogram wytapiania warstwy śniegu dla układu EOR po czasie 12 minut od rozpoczęcia procesu wytapiania. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.35. Termogramy wytapiania śniegu dla układu EOR a-h wykonywane w odstępach co 1 minutę. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.35. - cd. Termogramy wytapiania śniegu dla układu EOR i-j wykonywane w odstępach co 1 minutę. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 5.36 został przedstawiony wykres pomiaru temperatury główki szyny w trakcie badań terenowych wykonywanych kamerą termowizyjną. Temperatura główki szyny oscylowała w granicach od $-9,5$ do -8 °C.



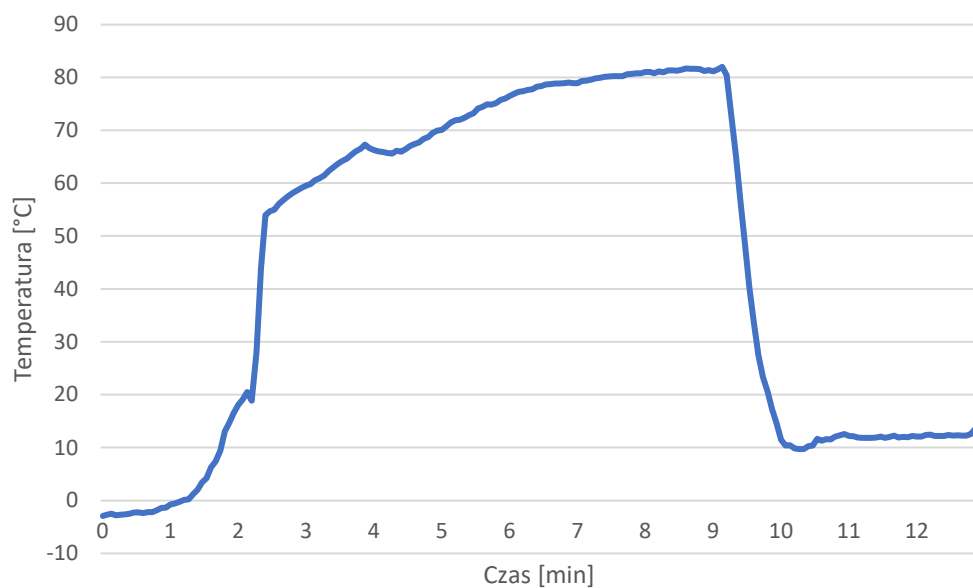
Rys. 5.36. Temperatura główki szyny dla układu EOR. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 5.37 został przedstawiony wykres temperatury szyjki szyny w trakcie badań terenowych wykonywanych kamerą termowizyjną. Temperatura szyjki szyny w początkowym okresie była około -9 °C. W trakcie pracy urządzenia EOR temperatura szyjki szyny wzrosła do około -6 °C.



Rys. 5.37. Temperatura szyjki szyny dla układu EOR. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 5.38 został przedstawiony wykres pomiaru temperatury grzejnika układu EOR w trakcie badań terenowych wykonywanych kamerą termowizyjną. Temperatura grzejnika w początkowym okresie była około $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. W trakcie pracy urządzenia EOR temperatura grzejnika układu EOR wzrosła do około $+82\text{ }^{\circ}\text{C}$ i w kolejnym etapie nagle obniżyła się do poziomu około $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Wyniki takie świadczą o tym, że w trakcie pomiarów zmieniły się parametry materiału (jego emisyjność), dla którego były wykonywane pomiary temperatury. W początkowym okresie na grzejniku był śnieg, w kolejnym etapie wytapiania śniegu ze śniegu powstała woda, a po wyparowaniu wody z grzejnika, pomiary były wykonywane dla osuszonego grzejnika. Każdy z tych materiałów (śnieg, woda, żelazo) charakteryzuje się inną wartością emisyjności, znacznie różniącą się od siebie, przy czym wartość współczynnika emisyjności badanego materiału wprost proporcjonalnie wpływa na wartość natężenia promieniowania podczerwonego wysyłanego z jego powierzchni co z kolei wpływa na wartość zmierzonej temperatury.



Rys. 5.38. Temperatura grzejnika dla układu EOR. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunkach 5.39, 5.40 i 5.41 przedstawiono przygotowany śnieg przeznaczony do wytopienia przez radiator urządzenia IOR. Śnieg został umiejscowiony na radiatorze układu IOR w formie warstwy o wymiarach wysokość 1,5 cm x szerokość 7 cm x długość 40 cm.



Rys. 5.39. Wytapianie śniegu w układzie IOR po czasie 2 minut. Źródło: opracowanie własne.

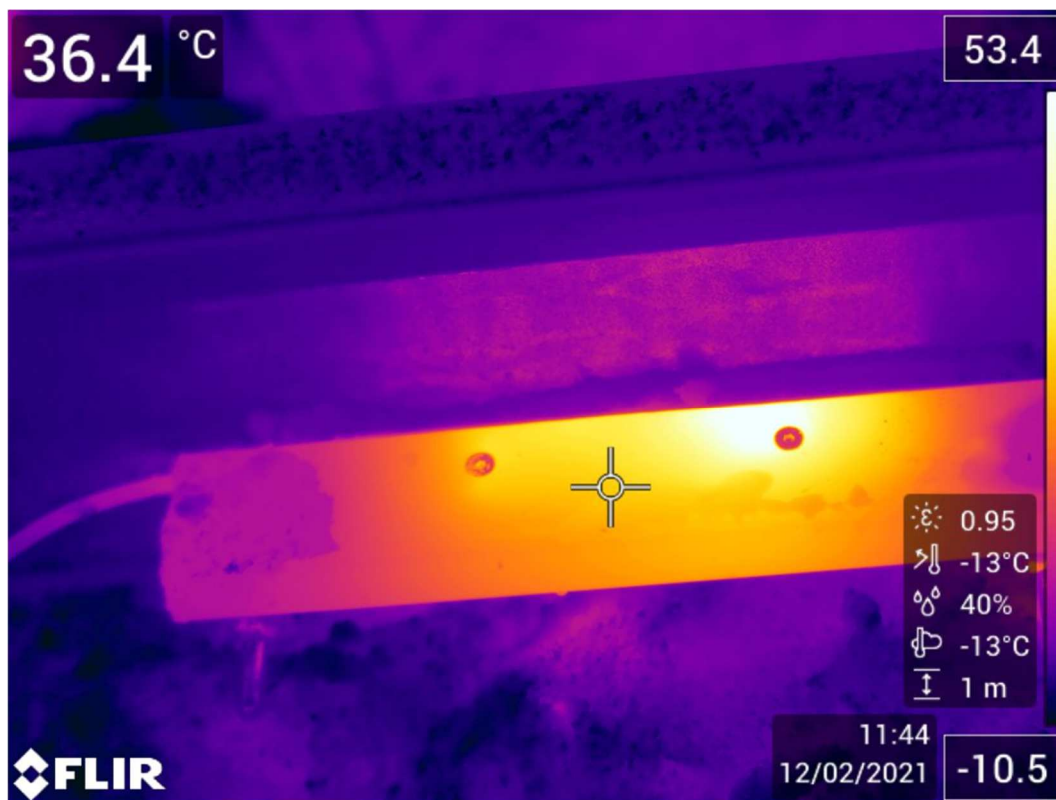


Rys. 5.40. Wytapianie śniegu w układzie IOR po czasie 5 minut.
Źródło: opracowanie własne.

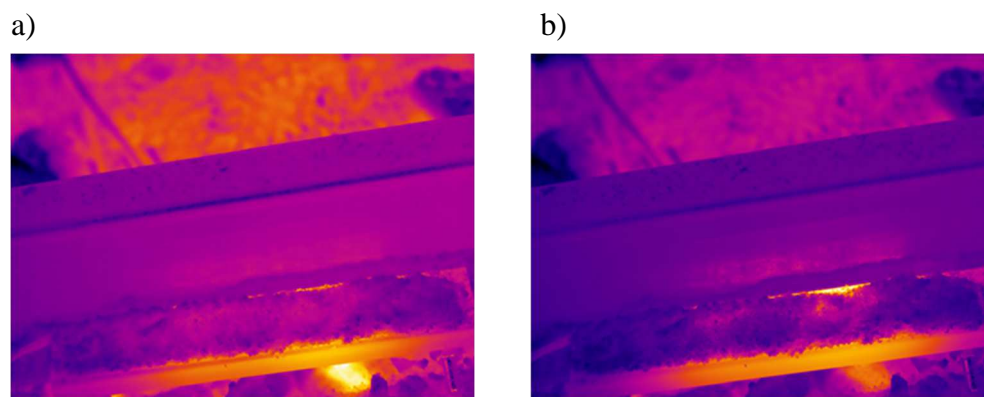


Rys. 5.41. Wytapianie śniegu w układzie IOR po czasie 12 minut.
Źródło: opracowanie własne.

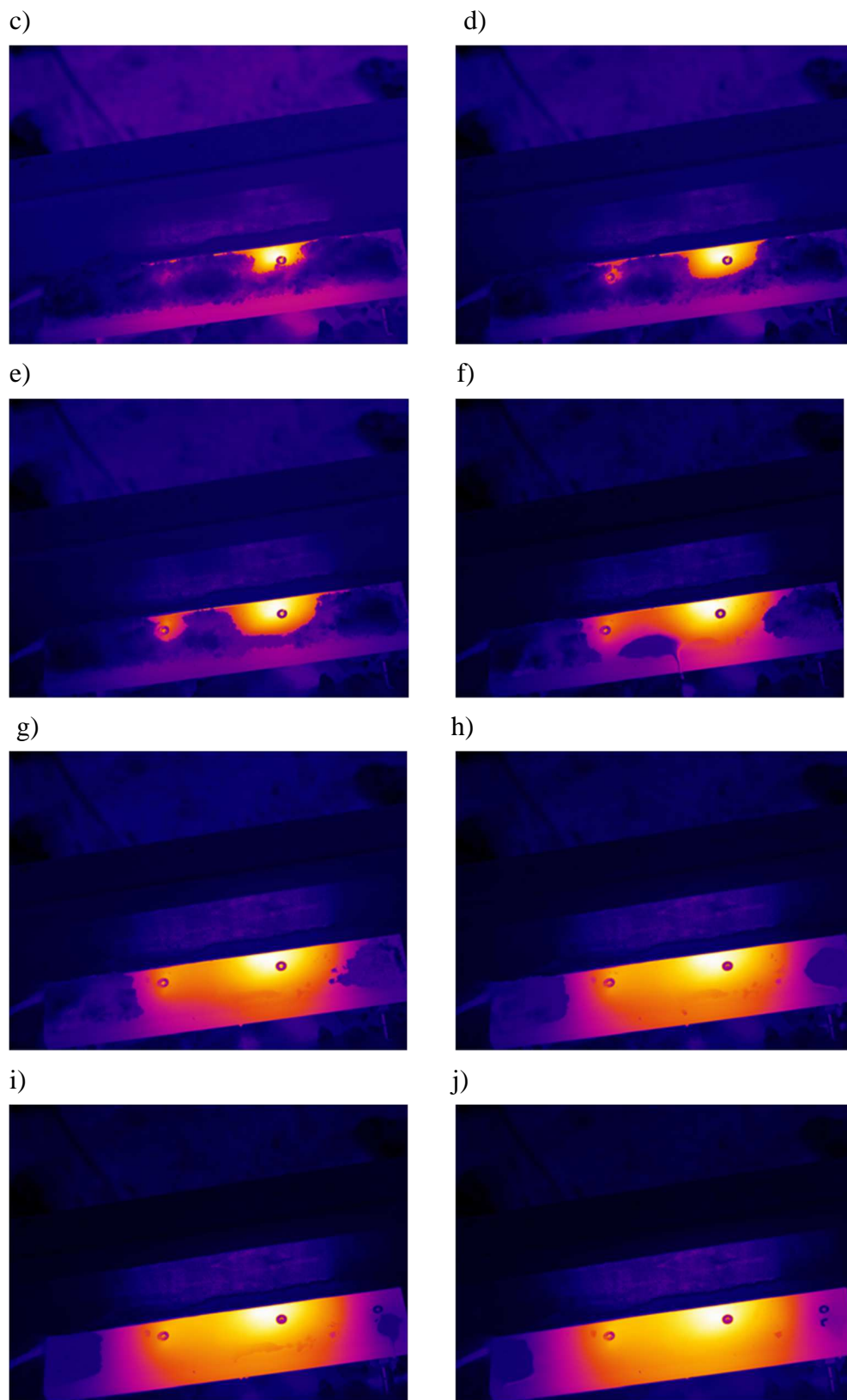
Na rysunkach 5.42 i 5.43 przedstawiono termogramy wytapiania bryły śniegu dla układu IOR.



Rys. 5.42. Termogram wytapiania bryły śniegu dla układu IOR po czasie 12 minut od rozpoczęcia procesu wytapiania dla częstotliwości układu 40 kHz. Źródło: opracowanie własne.

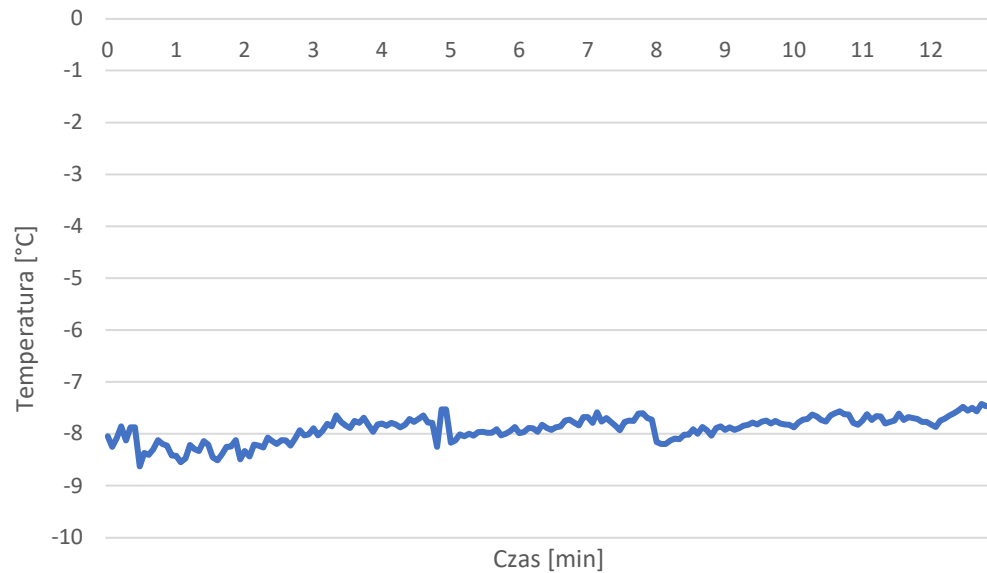


Rys. 5.43. Termogramy wytapiania śniegu w układzie IOR a-b wykonywane w odstępach co 1 minutę dla częstotliwości układu 40 kHz. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.43. - cd. Termogramy wytapiania śniegu w układzie IOR c-j wykonywane w odstępach co 1 minutę dla częstotliwości układu 40 kHz. Źródło: opracowanie własne..

Na rysunku 5.44 został przedstawiony wykres pomiaru temperatury główki szyny w trakcie badań terenowych wykonywanych kamerą termowizyjną. Temperatura główki szyny oscylowała w granicach od $-8,6$ do $-7,4$ °C.



Rys. 5.44. Temperatura główki szyny dla układu IOR. Źródło: opracowanie własne.

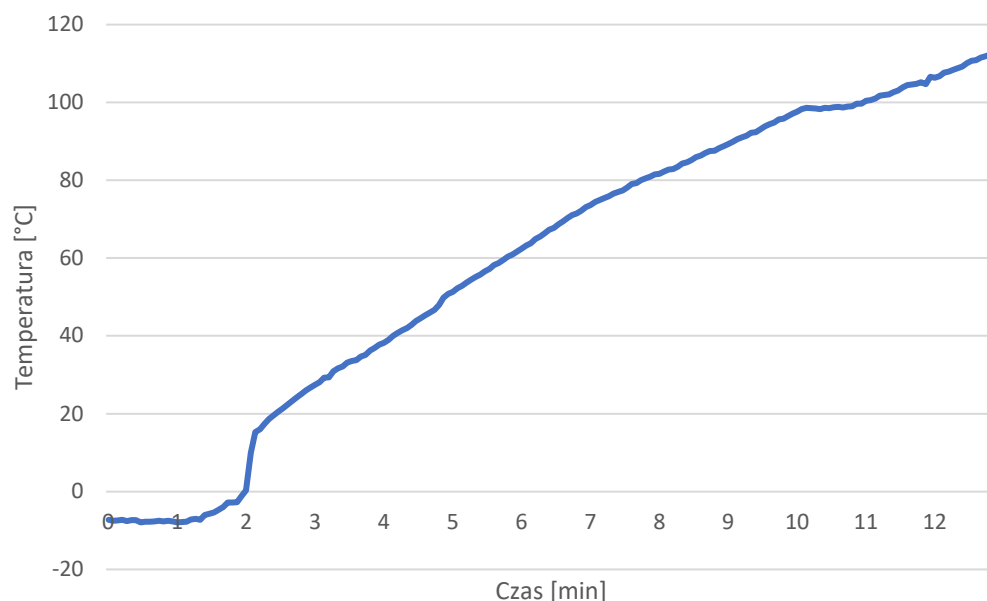
Na rysunku 5.45 został przedstawiony wykres pomiaru temperatury szyjki szyny w trakcie badań terenowych wykonywanych kamerą termowizyjną. Temperatura szyjki szyny w początkowym okresie była około -8 °C. W trakcie pracy urządzenia IOR temperatura szyjki szyny wzrosła do około $+1$ °C. Prawdopodobnie wynika to z tego, że dla układu IOR szyjka szyny nie nagrzewała się od radiatora, lecz zmierzona temperatura była wynikiem pomiaru natężenia promieniowania podczerwonego odbitego od radiatora poprzez szyjkę szyny.



Rys. 5.45. Temperatura szyjki szyny dla układu IOR. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 5.46 został przedstawiony wykres pomiaru temperatury grzejnika układu IOR w trakcie badań terenowych wykonywanych kamerą termowizyjną. Temperatura grzejnika w początkowym okresie była około $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. W trakcie pracy urządzenia IOR temperatura grzejnika układu IOR wzrosła do około $112\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Wyniki pomiarów temperatury w początkowej fazie wskazywały małe zwiększenie temperatury do drugiej minuty pomiarów, a w kolejnym etapie temperatura nagle wzrosła do około $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Takie wyniki temperatury świadczą o tym, że w trakcie pomiarów zmieniły się parametry obiektu, dla którego były wykonywane pomiary temperatury, jak to również zaobserwowano dla układu EOR. W trakcie początkowych pomiarów na grzejniku był śnieg. W kolejnych etapach wytapiania śniegu ze śniegu powstała woda, a po wyparowaniu wody z grzejnika pomiary były wykonywane dla osuszonego grzejnika IOR. Podczas rejestracji procesu nagrzewania kamerą termowizyjną do kamery termowizyjnej wczytaną stałą wartość emisyjności badanego obiektu. Natomiast w tym czasie śnieg przemienił się w wodę, która następnie wyparowała i kamera termowizyjna w końcowym etapie rejestrowała temperaturę żelaza. Każdy z tych materiałów (śnieg, woda, żelazo) charakteryzuje się inną wartością emisyjności, znacznie różniącą się od siebie, przy czym wartość współczynnika emisyjności badanego materiału wprost proporcjonalnie wpływa na wartość natężenia promieniowania podczerwonego wysyłanego z jego powierzchni co z kolei wpływa na wartość zmierzonej temperatury.



Rys. 5.46. Temperatura grzejnika dla układu IOR. Źródło: opracowanie własne.

Badanie urządzenia IOR oraz EOR w warunkach terenowych dla wytopienia takiej samej ilości śniegu przy temperaturze otoczenia $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ oraz wykorzystaniu kamery termowizyjnej potwierdziło wnioski uzyskane z badań nad roztopianiem lodu w komorze klimatycznej. W trakcie badania wytopienia śniegu otrzymano wyniki czasów wytopienia dla układu IOR oraz EOR (tab. 5.2), gdzie wartość częstotliwości pracy układu 70 kHz odpowiada takiemu samemu czasowi wytopienia jak dla układu EOR. Zużycie energii elektrycznej dla urządzenia IOR w porównaniu do urządzenia EOR było o 25% mniejsze. Jest to wartość mniejsza niż w przypadku wytopienia lodu. Wynika to prawdopodobnie z niewielkiej grubości warstwy śniegu, a co za tym idzie - ze stosunkowo krótkiego czasu wytopienia. W tym czasie energia cieplna nie została w znaczny sposób przekazana do szyny i konsekwencji straty energii w tym przypadku były mało istotne. Na termogramach wykonanych kamerą termowizyjną zaobserwowano rozkład temperatury, w którym można zauważyć, że stopka i szyjka szyny znacznie się nagrzewa dla układu EOR, więc zużycie energii elektrycznej w przypadku wytopienia większej ilości śniegu będzie się zwiększać z powodu większych strat energii cieplnej (nagrzewanie szyny). W przypadku układu indukcyjnego ogrzewany radiator nagrzewał się, a stopka oraz szyjka szyny praktycznie się nie nagrzewała. Zauważone wzrosty temperatury główki oraz szyjki szyny są związane z efektem wpływu promieniowania podczerwonego radiatora IOR odbitego od powierzchni szyny. W trakcie nagrzewania dla układu tradycyjnego grzejnik po czasie 12 minut osiągnął temperaturę $82\text{ }^{\circ}\text{C}$, a dla układu IOR radiator po tym samym czasie osiągnął temperaturę $112\text{ }^{\circ}\text{C}$. Wyższa temperatura urządzenia IOR, a także mniejsza jego moc w porównaniu do mocy układu EOR przeliczonej na długość odpowiadającą układowi IOR (tabela 5.2) pozwala stwierdzić, że urządzenie IOR charakteryzuje się większą efektywnością działania.

Tabela 5.2. Wartości maksymalnego czasu wytapiania śniegu dla urządzenia IOR oraz EOR przy temperaturze otoczenia -12 °C. Źródło: opracowanie własne.

Badane urządzenie	Długość elementu wykonawczego	Maksymalny czas wytapiania śniegu	Moc urządzenia	Zużycie energii elektrycznej
-	m	min	W	kWh
IOR dla częstotliwości 40 kHz	0,4	7	176	0,021
IOR dla częstotliwości 70 kHz	0,4	12	104	0,021
EOR	0,4*	12	139*	0,028

* przeliczono na długość urządzenia IOR

6. ASPEKTY DOTYCZĄCE JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ I KOMPATYBILNOŚCI ELEKTROMAGNETYCZNEJ

6.1. Badania jakości energii elektrycznej oraz kompatybilności elektromagnetycznej

W rozdziale przedstawiono podstawowe wymagania dotyczące jakości energii elektrycznej dotyczącej części przemiennoprądowej kolejowego systemu elektroenergetycznego. Na terenie PKP PLK S.A. obecnie obowiązują następujące dokumenty dotyczące wymagań jakościowych w zakresie energii elektrycznej Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 [57] oraz norma PN-EN 50160 [58]. Dodatkowym dokumentem obowiązującym w zakresie elektroenergetyki nietrakcyjnej są standardy techniczne [21]. Standardy techniczne określają podstawowe wymagania i parametry obowiązujące na terenie PKP PLK S.A. określane jako szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200 \text{ km/h}$ (dla taboru konwencjonalnego) /250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem), w których są również zawarte wymagania norm [57,58]. Stosowane obecnie urządzenia EOR oraz urządzenia IOR zostały zweryfikowane analizatorem jakości energii elektrycznej SONEL PQM 701Z pod względem spełnienia obowiązujących wymogów.

Wymagania w zakresie podstawowych parametrów obowiązujących na terenie PKP PLK S.A. zgodnie z [21] to:

1. do zasilania odbiorów nietrakcyjnych, w przypadkach uzasadnionych technicznie lub ekonomicznie, dopuszcza się stosowanie innych rozwiązań, takich jak przetwornice stacjonarne 3 kV DC/0,4 kV AC, baterie słoneczne itp.;
2. niezależnie od zastosowanego rozwiązania napięcie wyjściowe powinno spełniać następujące wymagania:
 - 2.1. znamionowe napięcie wyjściowe UN: 230 V AC lub 3x400 V AC;
 - 2.2. dopuszczalne zmiany wartości napięcia wyjściowego: 10% (zgodnie z rozporządzeniem [57] i normą PN-EN 50160 [58]);
 - 2.3. znamionowa częstotliwość napięcia wyjściowego f: 50 Hz;
 - 2.4. dopuszczalne zmiany częstotliwości napięcia wejściowego: 1% przez 95% tygodnia; + 4%/- 6% przez 100% tygodnia (zgodnie z rozporządzeniem [57] i normą PN-EN 50160 [58]);
 - 2.5. maksymalna wartość współczynnika THD napięcia wyjściowego, uwzględniający wyższe harmoniczne do rzędu 40: 8% (zgodnie z rozporządzeniem [57] i normą PN-EN 50160 [58]);
 - 2.6. maksymalne wartości harmoniczných (zgodnie z rozporządzeniem [57]);

- 2.7. dopuszczalne zmiany wartości napięcia między fazami oraz siecią główną: 5% (zgodnie z pracą [59]);
- 2.8. minimalna przeciążalność: 150% przez 5 minut;
- 2.9. maksymalna wartość przepięć o częstotliwości sieciowej: $U_N + 250 \text{ V}$ dla $t > 5 \text{ s}$; $U_N + 1200 \text{ V}$ dla $t < 5 \text{ s}$ (zgodnie z normą PN-IEC 60364 [60]);
- 2.10. kompatybilność elektromagnetyczna zgodnie normą PN-EN 50121-2 [48];

W zakresie rozprawy dokonano badania wybranych parametrów jakości energii elektrycznej: napięcia, prądu, mocy czynnej, mocy biernej, mocy pozornej, harmonicznych napięcia, harmonicznych prądu, współczynnika $\cos\phi$, współczynnika $\text{tg}\phi$. Dokonano analizy zakłóceń wprowadzanych do sieci zasilającej. Wykonano również pomiar wartości pola magnetycznego dla układu IOR.

6.2. Wyniki pomiarów terenowych dotyczących jakości energii elektrycznej

6.2.1. Badania terenowe urządzeń EOR

Na rysunku 6.1 przedstawiono skrzynię tradycyjnego urządzenia elektrycznego ogrzewania rozjazdów (EOR), w której zamontowano transformatory separacyjne. W skrzyni transformatorów separacyjnych podłączono do połączeń elektrycznych analizator jakości energii elektrycznej. Urządzenia EOR w tym przypadku są zaprojektowane jako odbiory podłączone do dwóch faz. Grupa urządzeń EOR w danym okręgu nastawczym jest podłączona do przyłącza w taki sposób, aby była dotrzymana zasada równomierności obciążenia we wszystkich fazach.



Rys. 6.1. Badanie jakości energii elektrycznej urządzeń EOR analizatorem typu SONEL PQM 701Z. Źródło: opracowanie własne.

Grzejniki zamontowane w rozjazdach są zasilane poprzez transformatory separacyjne. Na rysunku 6.2 przedstawiono urządzenia EOR w trakcie nagrzewania elementów rozjazdu. W związku z tym, że grzejnik nagrzewa iglicę oraz opornicę rozjazdu, bezpośrednio w miejscach przylegania, uwidaczniają się miejsca przewodnictwa ciepła. Ogrzanie szyny ma miejsce nie tylko w okolicach stopki szyny ale również w szyjce szyny i główce szyny.



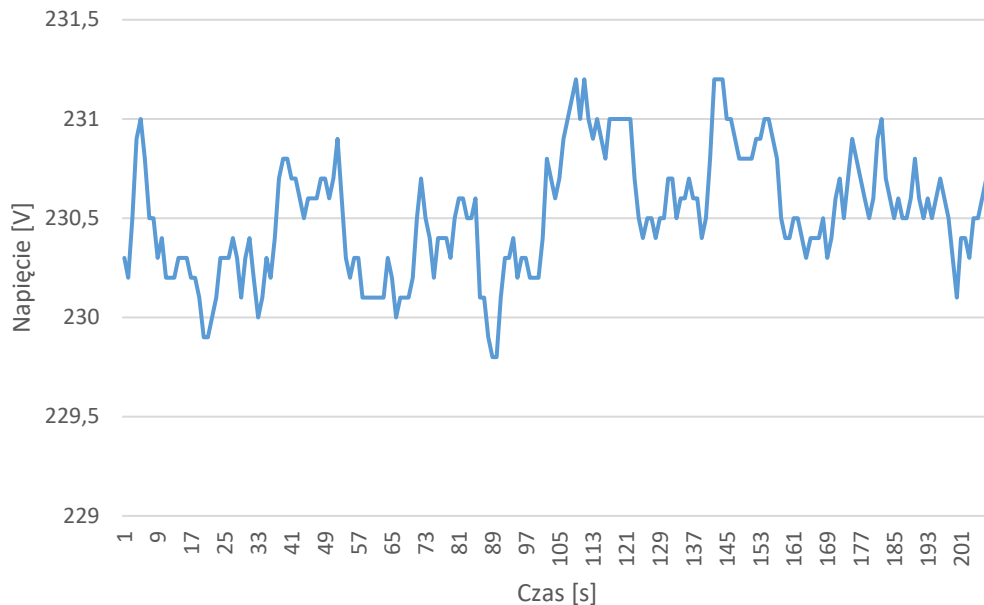
Rys. 6.2. Urządzenie EOR w trakcie nagrzewania elementów rozjazdu.
Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 6.3 zaprezentowano podstawowe parametry odczytane z analizatora jakości energii elektrycznej. Spełniają one wymagania odnośnie dopuszczalnych wartości parametrów obowiązujących na terenie PKP PLK S.A. [49,61,62,63]. Parametry uzyskane dla urządzenia EOR z wykonanych pomiarów przedstawiają rezystancyjny charakter z niewielką indukcyjnością.

	U	U _{0c}	f	I	I _{0c}	P	Q ₁	S	S _N	E _p	E _r	E _a	E _g	E _s	PF	cosφ	tgφ	THD U	THD I	
Jednostka	[V]	[mV]	[Hz]	[A]	[mA]	[kW]	[var]	[kVA]	[var]	[Wh]	[Wh]	[varh]	[varh]	[VAh]	---	---	---	[%]	[%]	
L1-N	230.8	34.95	49.99	9.754	0.204	2.248	112.3	2.252	72.59	97.05	0.000	4.796	0.000	97.21	0.998	0.999	0.050	1.215	2.981	
L2-N	234.0	-20.98	49.99	9.393	3.464	2.188	206.7	2.198	64.79	94.85	0.000	8.886	0.000	95.30	0.995	0.996	0.094	1.167	2.700	
L3-N	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
N-PE	---	---	---	9.011	3.618	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	4.600
L1-L2	405.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
L2-L3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
L3-L1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Wartość całkowita	---	---	49.99	---	---	4.436	319.0	4.450	137.4	191.9	0.000	13.68	0.000	192.5	0.997	0.997	0.072	---	---	

Rys. 6.3. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów w zakresie jakości energii elektrycznej. Zrzut z ekranu analizatora SONEL. Źródło: opracowanie własne.

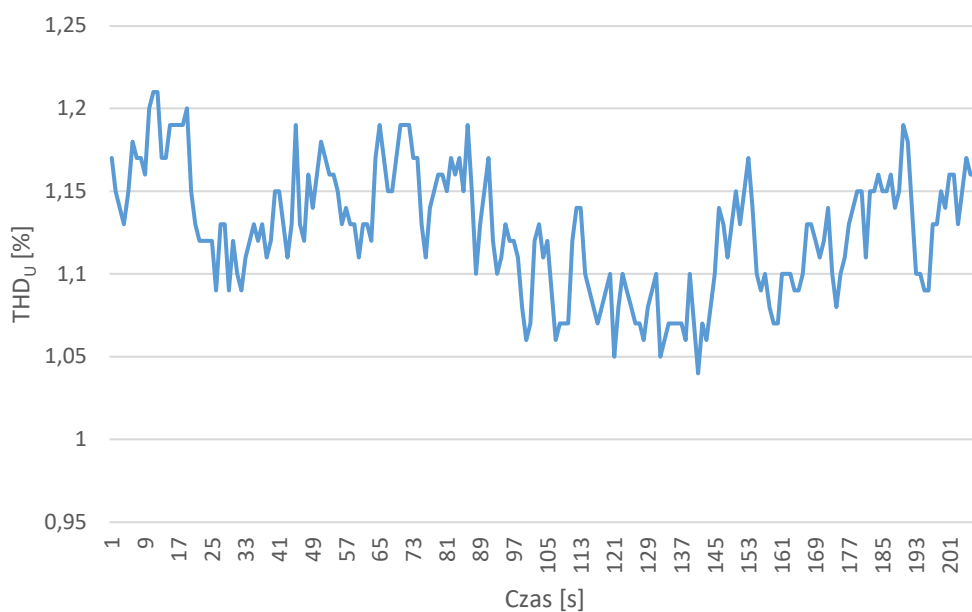
Na rysunku 6.4 zaprezentowano parametry napięcia zasilającego. Napięcie zasilające w zakresie od około 230 V do 231 V spełnia wymagania obowiązujących przepisów na terenie PKP PLK S.A. [49].



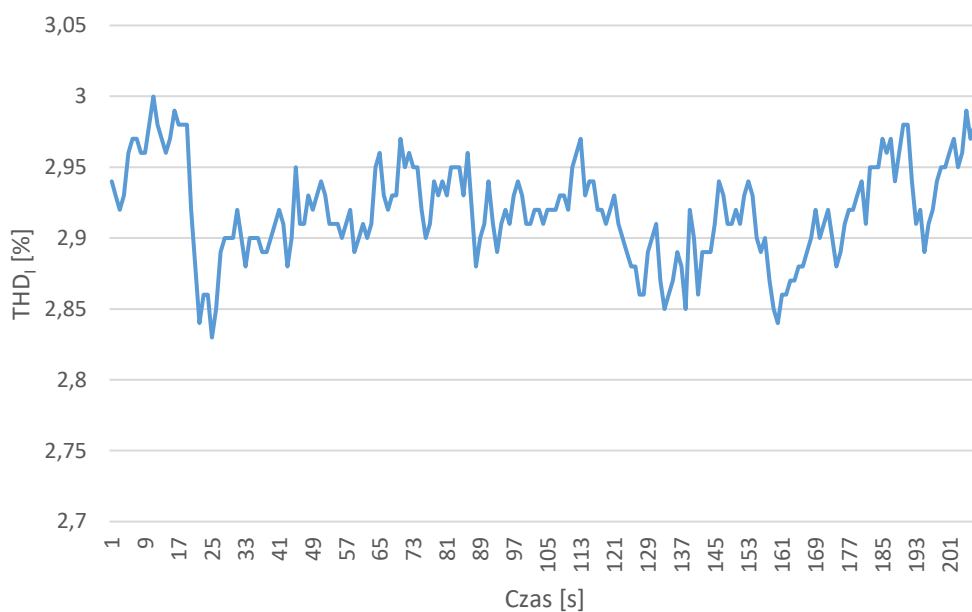
Rys. 6.4. Przebieg napięcia zasilania urządzenia EOR w trakcie wykonywanych pomiarów. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 6.5 przedstawiono parametry harmonicznych napięcia THD_U [%]. Wartości na poziomie około 1,2% spełniają wymagania obowiązujących przepisów [49,64,65], w tym przepisów obowiązujących na terenie PKP PLK S.A. Zgodnie z rozporządzeniem [57] i normą PN-EN 50160 [58] dopuszczalna wartość harmonicznych napięcia THD_U powinna zawierać się do 8%.

Na rysunku 6.6 przedstawiono parametry harmonicznych prądu THD_I [%]. Wartości na poziomie około 3% spełniają wymagania obowiązujących przepisów. Zgodnie z [7,8,66,67,68] dopuszczalna wartość harmonicznych prądu THD_I powinna zawierać się maksymalnie do 15%. Zapisy normy [7,8] nie określają maksymalnej dopuszczalnej wartości współczynnika zawartości wyższych harmonicznych prądu THD_I dla grup odbiorników, lecz dla pojedynczego odbiornika THD_I powinna zawierać się do 15%.



Rys. 6.5. Wartości THD_U urządzenia EOR. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.6. Wartości THD_I urządzenia EOR. Źródło: opracowanie własne.

W tabeli 6.1 podano parametry jakości energii elektrycznej wraz z oszacowaniem spełnienia warunków jakościowych.

Tabela 6.1. Średnie wartości parametrów jakości energii elektrycznej dla urządzenia EOR. Źródło: opracowanie własne.

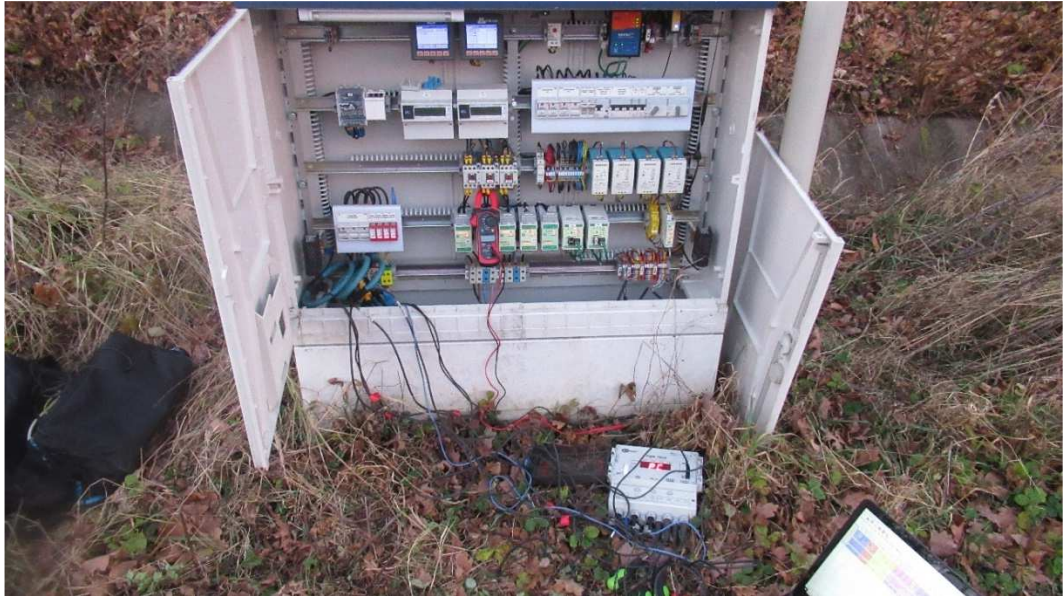
Wielkość	Jednostka	Wartość średnia	Spełnienie warunków jakości energii elektrycznej [18]
Napięcie	V	230,5	TAK
Prąd	A	9,7	-
Moc czynna	W	2242	-
Moc bierna	var	111	-
Moc pozorna	VA	2246	-
THD _U	%	1,12	TAK
THD _I	%	2,92	TAK
cosφ	-	0,99	TAK
tgφ	-	0,05	TAK

6.2.2. Badania terenowe urządzeń IOR

Urządzenia IOR zabudowane w stacji Międzyzlesie zostały podłączone do analizatora jakości energii elektrycznej typu SONEL PQM 701Z celem dokonania badań. Urządzenia zostały wcześniej zabudowane celem testowania w terenie (rys. 6.7 i 6.8).

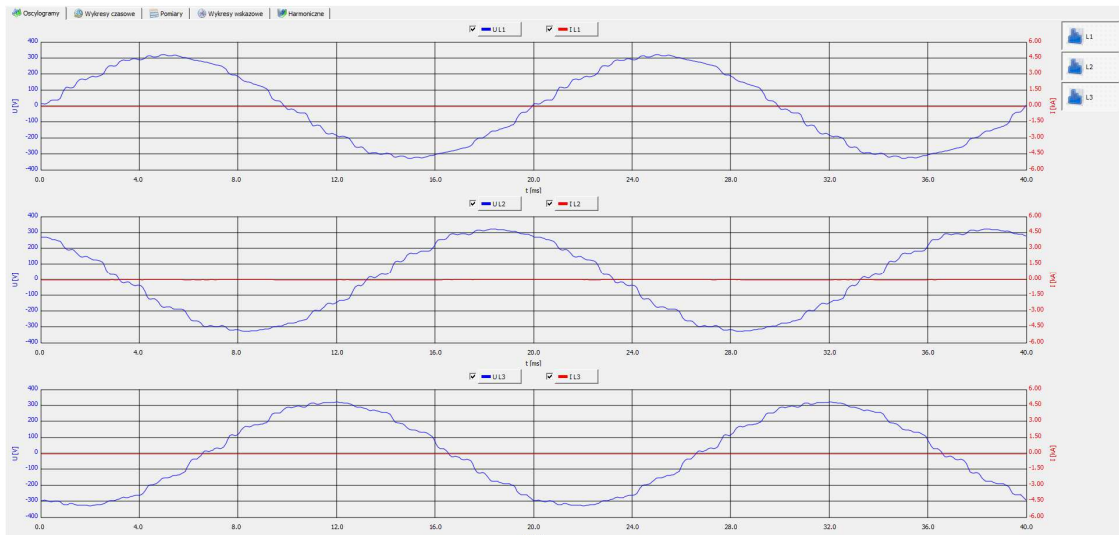


Rys. 6.7. Zabudowane innowacyjne urządzenie IOR w rozjeździe kolejowym. Źródło: opracowanie własne.

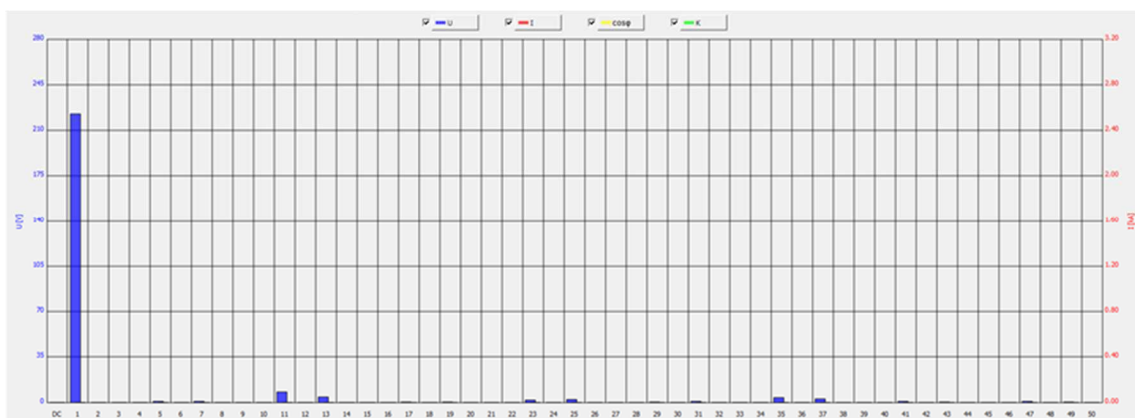


Rys. 6.8. Szafa zasilająco sterująca urządzenia IOR z podłączonym analizatorem jakości energii elektrycznej SONEL PQM 701Z. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 6.9 przedstawiono przebieg napięcia. Widoczne są zniekształcenia pochodzące od wyższych harmonicznych. Na rysunku 6.10 przedstawiono spektrum harmonicznych napięcia. Stwierdzono stosunkowo dużą wartość harmonicznych 11 i 13.



Rys. 6.9. Przebieg napięcia urządzenia IOR. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.10. Harmoniczne napięcia urządzenia IOR. Źródło: opracowanie własne.

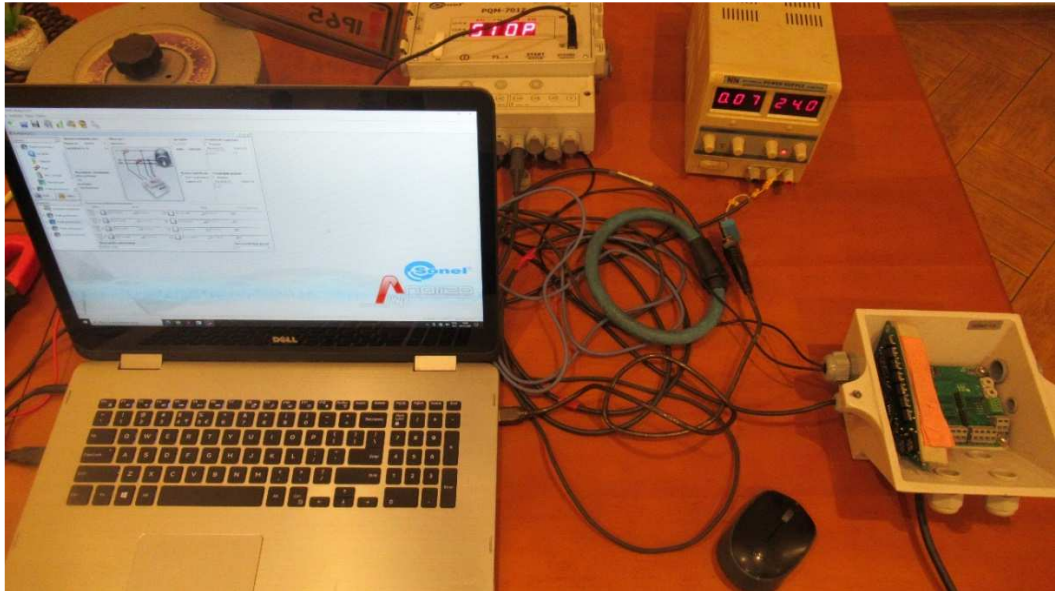
W tabeli 6.2 podano parametry jakości energii elektrycznej urządzenia IOR wraz z oszacowaniem spełnienia warunków jakościowych. Dla badanego urządzenia IOR po wykonanych pomiarach stwierdzono, że nie zostały spełnione wymagane warunki THD_I . Dopuszczalna wartość nie powinna przekraczać 15%. Po wykonanych oględzinach zauważono, że w nastąpiło przepięcie w rozdzielni skąd jest zasilane urządzenie IOR. Przepięcie to mogło uszkodzić istniejące układy zasilająco-sterujące lub filtr zabudowany w układzie IOR.

Tabela 6.2. Średnie wartości parametrów jakości energii elektrycznej. Źródło: opracowanie własne.

Wielkość	Jednostka	Wartość średnia	Spełnienie warunków jakości energii elektrycznej [18]
Napięcie	V	231,1	TAK
Prąd	A	0,97	-
Moc czynna	W	220	-
Moc bierna	var	26	-
Moc pozorna	VA	225	-
THD_U	%	2,13	TAK
THD_I	%	17,46	NIE
$\cos\varphi$	-	0,979	TAK
$tg\varphi$	-	0,14	TAK

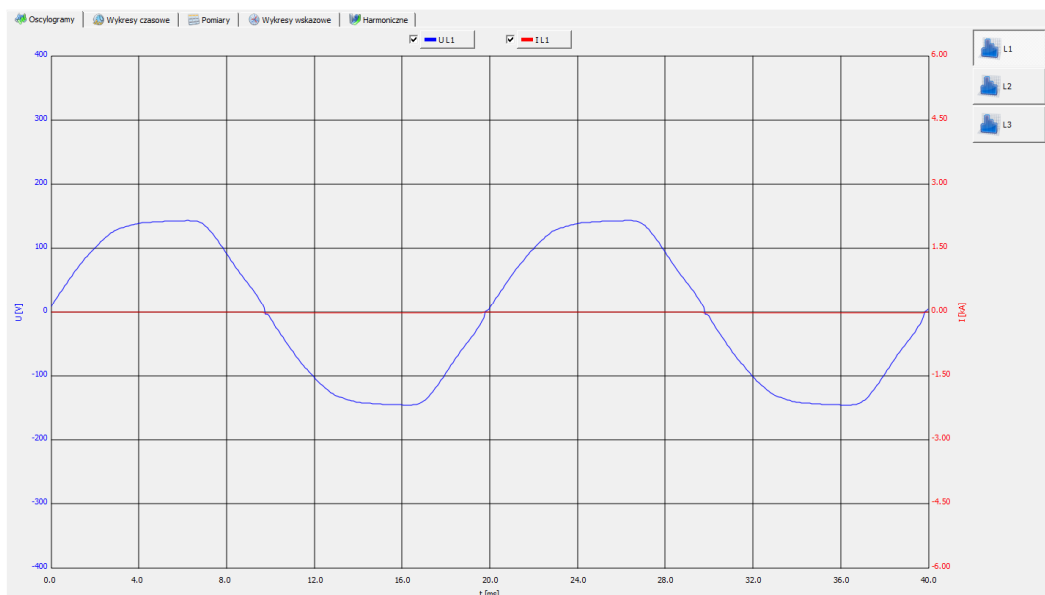
6.2.3. Badania laboratoryjne urządzenia IOR

Na rysunku 6.11 pokazano urządzenie IOR w trakcie wykonywania laboratoryjnych badań jakości energii elektrycznej analizatorem SONEL PQM 701Z dla częstotliwości pracy od 40 do 90 kHz.



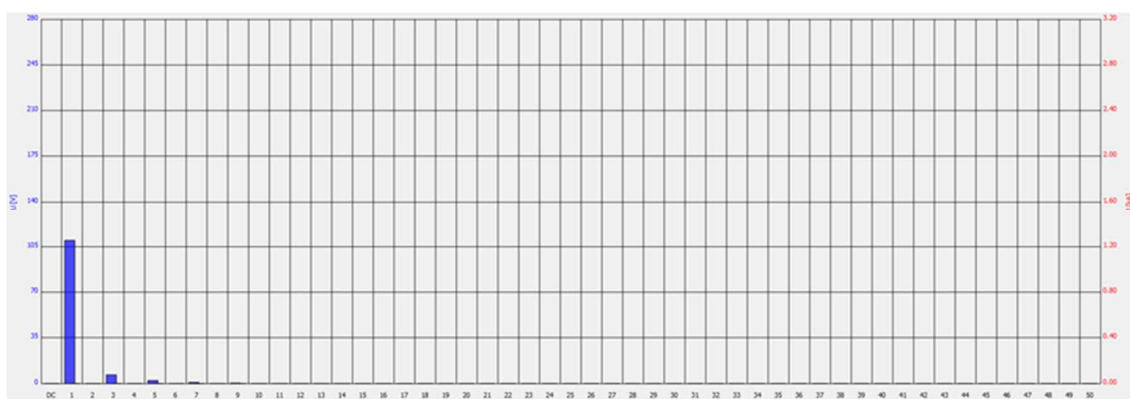
Rys. 6.11. Urządzenie IOR w trakcie wykonywania badań. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 6.12 pokazano przebieg napięcia, który został zdeformowany przez istniejące harmoniczne. Deformacje badanego urządzenia IOR w porównaniu do przebiegu na rysunku 6.9 wskazują na obecność innych harmonicznych niż zaobserwowano w trakcie badań terenowych.



Rys. 6.12. Wykres przebiegu napięcia urządzenia IOR. Źródło: opracowanie własne.

Z rysunku 6.13 wynika, że występują harmoniczne napięcia 3, 5 i 7. Kolejne harmoniczne praktycznie są równe zero.



Rys. 6.13. Harmoniczne napięcia urządzenia IOR. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 6.14 pokazano podstawowe parametry odczytane z analizatora jakości energii elektrycznej. W tym przypadku, kiedy wartość THD_I jest mniejsza od dopuszczalnej, ale wymagania nie są spełnione w odniesieniu do tangensa φ , który ma wartość ujemną [21,69,70]. W przypadku podłączenia odbiornika o charakterze pojemnościowym do przyłącza operator system dystrybucyjnego (OSD) zgodnie z umową naliczy stosowne kary umowne za wprowadzanie do systemu mocy biernej pojemnościowej. Dla odbiorników podłączonych do jednego przyłącza z przeważającym charakterem indukcyjnym, to urządzenie IOR będzie kompensatorem mocy biernej.

	U	U _{oc}	f	I	I _{pc}	P	Q _l	S	S _N	E _{p+}	E _{p-}	E _{q+}	E _{q-}	E _s	PF	cosφ	tgφ	THD U	THD I	
Jednostka	[V]	[mV]	[Hz]	[A]	[mA]	[W]	[var]	[VA]	[var]	[Wh]	[Wh]	[μvarh]	[varh]	[VAh]	---	---	---	[%]	[%]	
L1-N	109.8	-23.48	50.04	1.638	-4.404	179.6	-8.233	179.8	19.89	-14.67	0.163	-0.269	1.062	-15.07	0.999	0.999	-0.046	7.120	8.401	
L2-N	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
L3-N	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
N-PE	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
L1-L2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
L2-L3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
L3-L1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Wartość całkowita	109.8	-23.48	50.04	1.638	-4.404	179.6	-8.233	179.8	19.89	-14.67	0.163	-0.269	1.062	-15.07	0.999	0.999	-0.046	7.120	8.401	

Rys. 6.14. Podstawowe dane w zakresie jakości energii elektrycznej układu IOR. Źródło: opracowanie własne.

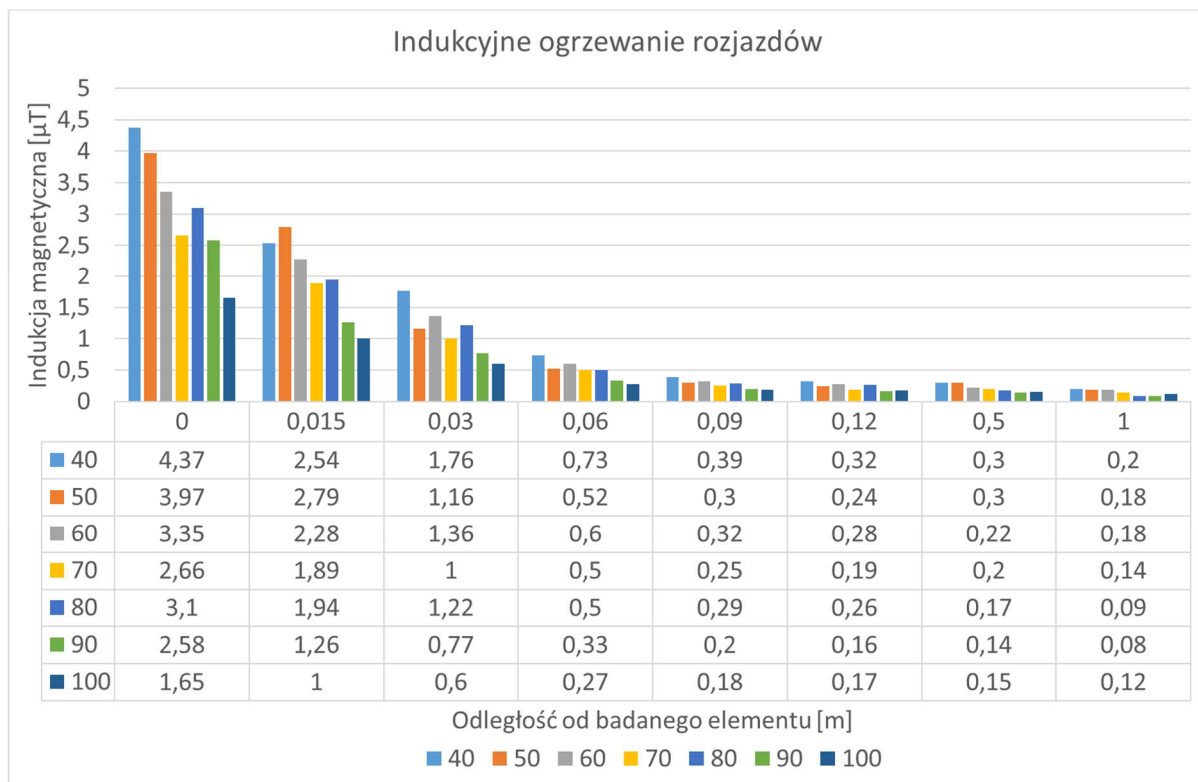
W tabeli 6.3 podano parametry jakości energii elektrycznej wraz z oszacowaniem spełnienia warunków jakościowych. Parametry, które nie spełniają warunków jakościowych, oznaczono kolorem czerwonym. Wynika stąd, że występują pewne trudności w zapewnieniu odpowiedniego $tg\varphi$.

Tabela 6.3. Średnie wartości parametrów jakości energii elektrycznej.
Źródło: opracowanie własne.

Parametry (wartość średnia)		Częstotliwość pracy układu IOR [kHz]					
		40	50	60	70	80	90
U	V	105,5	108,7	108,0	112,1	112,7	109,5
I	A	1,66	1,6	1,23	0,93	0,60	0,38
P	W	175,6	168,9	133,5	103,7	67,3	40,9
Q	var	-9,2	-9,2	-8,7	-8,9	-8,3	-7,4
S	VA	175,9	169,2	133,8	104,2	69,9	42,0
THD _U	%	6,76	7,1	7,15	7,89	7,89	7,85
THD _I	%	8,58	9,00	8,22	10,23	10,23	13,99
cosφ	-	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98
tgφ	-	-0,05	-0,05	-0,06	-0,12	-0,12	-0,18

6.3. Pomiary pola magnetycznego

Na rysunku 6.15 przedstawiono wyniki pomiarów pola magnetycznego, które zostały wykonane w celu zbadania oddziaływania radiatora indukcyjnego ogrzewania rozjazdów kolejowych na otoczenie [48,71,72]. Badania zostały wykonywane w taki sposób, że badano indukcję pola magnetycznego w odległości od radiatora w zakresie do 1 metra. Badania zostały wykonane dla różnych częstotliwości pracy urządzenia IOR w zakresie od 40 do 100 kHz.



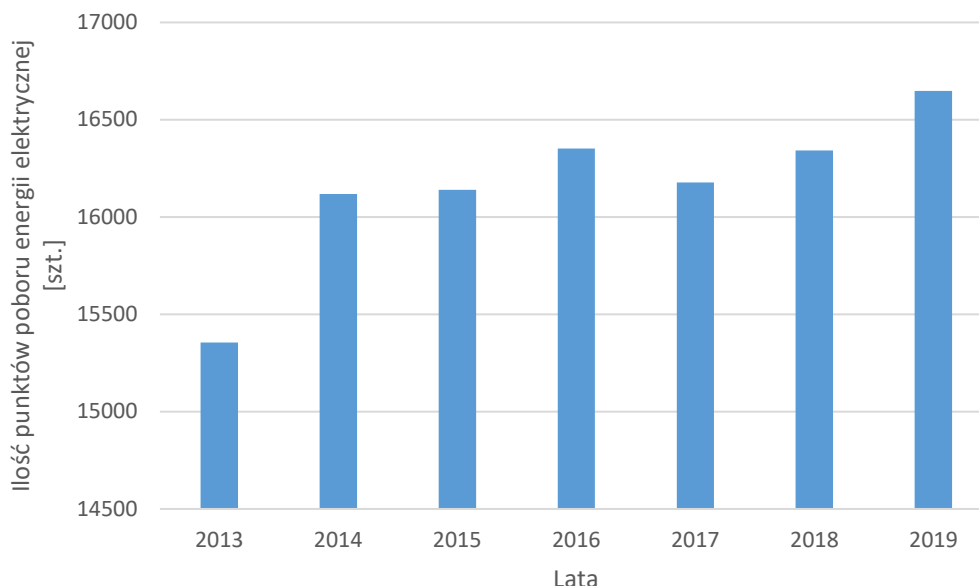
Rys. 6.15. Średnie wartości indukcji magnetycznej nad radiatorem w odległości od 0 do 1 m. Źródło: opracowanie własne.

Wartość pola magnetycznego maleje wraz ze wzrostem częstotliwości pracy układu oraz od odległości od radiatora IOR. Jest to zgodne z oczekiwaniami, działanie prądów wirowych praktycznie zupełnie eliminują pole magnetyczne w otoczeniu grzejnika IOR. Zatem nie powinno być ono źródłem zakłóceń dla innych urządzeń infrastruktury kolejowej.

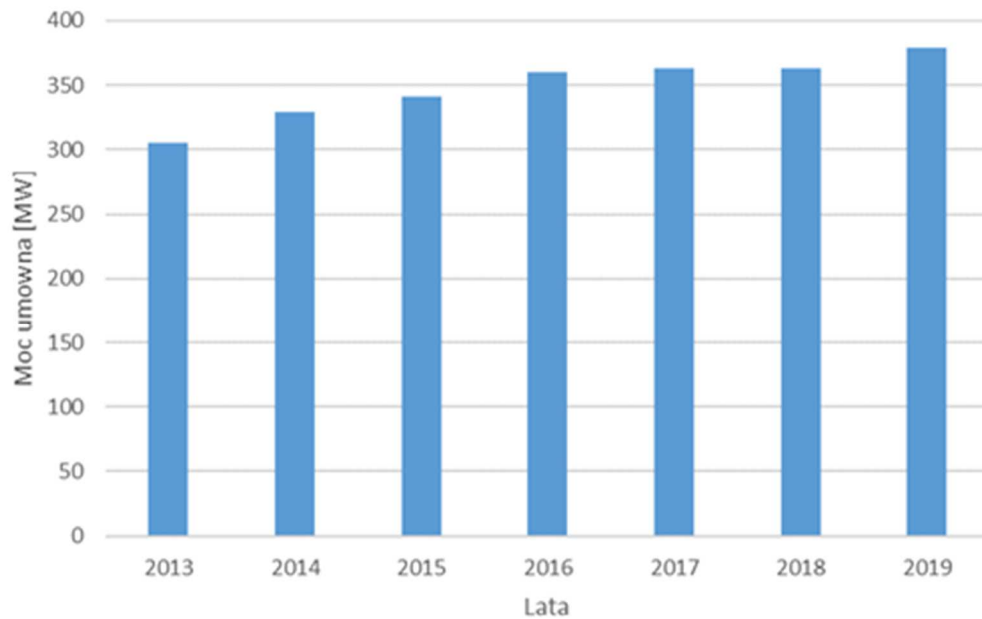
7. ANALIZA PORÓWNAWCZA ZUŻYCIA ENERGII NA OGRZEWANIE ROZJAZDÓW W POLSCE

7.1. Zużycie energii elektrycznej na ogrzewanie rozjazdów w Polsce

W celu zachowania bezpieczeństwa, urządzenia na terenie kolejowym muszą być zasilane energią elektryczną o określonych parametrach [62,63], aby nie nastąpiło ich uszkodzenie. Do zasilania odbiorów kolejowych PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. są często wykorzystywane linie potrzeb nietrakcyjnych (zasilane z podstacji trakcyjnych) oraz linie zasilające energetyki zawodowej. Urządzenia elektroenergetyki kolejowej w instalacjach PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. najczęściej zasilane są napięciem 230 V 50 Hz lub 3x400 V 50 Hz. Na rysunku 7.1 przedstawiono liczbę punktów poboru energii elektrycznej w PKP PLK S.A. w latach 2013-2019. Wynika z niego, że liczba punktów poboru energii w kolejnych latach wykazuje trend wzrastający. W roku 2013 liczba punktów poboru energii wynosiła 15 355, a w roku 2019 wzrosła ona do 16 647. Wraz ze wzrostem liczby punktów poboru energii elektrycznej wzrosła również moc umowna (rysunek 7.2). Moc umowna na istniejących przyłączach dla odbiorów elektroenergetycznych w roku 2013 wynosiła 306 MW, a w roku 2019 wzrosła do 379 MW.



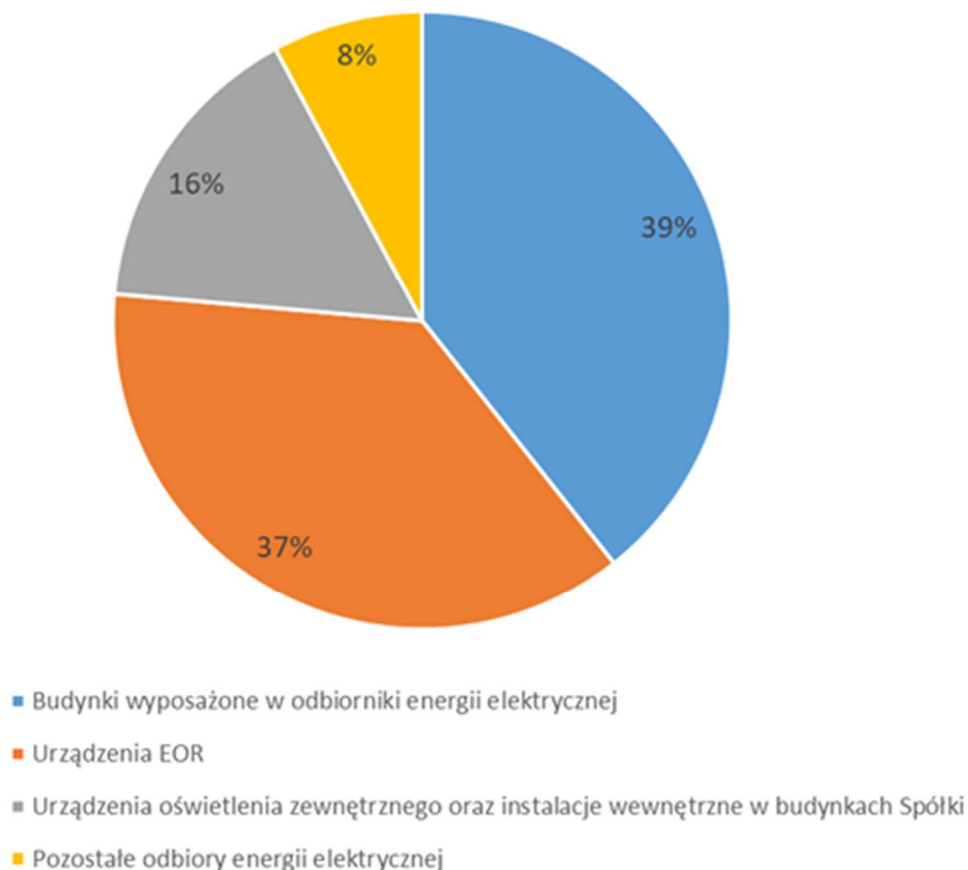
Rys. 7.1. Ilość punktów poboru energii elektrycznej w latach 2013 - 2019 dla odbiorów PKP PLK S.A. Źródło: opracowanie własne. Dane z PKP PLK S.A.



Rys. 7.2. Moc umowna dla punktów poboru energii elektrycznej w latach 2013 - 2019 dla odbiorów PKP PLK S.A. Źródło: opracowanie własne. Dane z PKP PLK S.A.

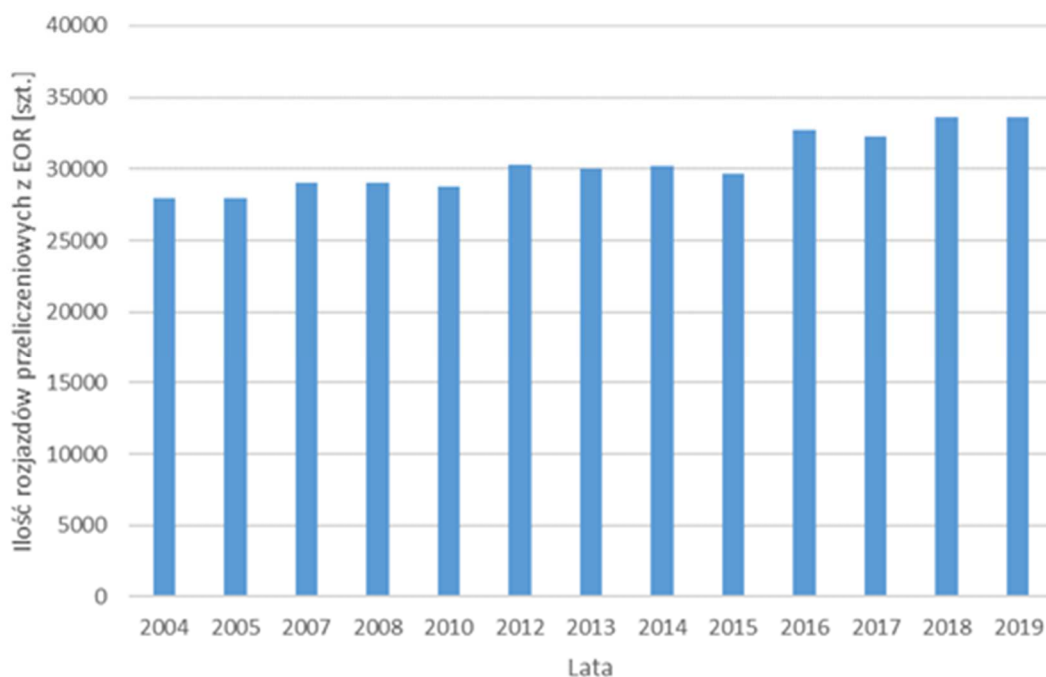
Wzrost mocy zamówionej dla istniejących przyłączy przede wszystkim wynika z realizacji inwestycji, w tym z montowania dodatkowych urządzeń EOR, co powoduje bezpieczniejsze i sprawniejsze prowadzenie ruchu pociągów, lecz zwiększa koszty za użytą energię elektryczną. Moc zainstalowana zabudowanych urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów w stosunku do mocy zainstalowanej wszystkich odbiorów energii elektrycznej w Spółce PKP PLK S.A. wynosi około 37% (rys. 7.3). Wynika z niego, że urządzenia EOR należą do najbardziej energochłonnych w Spółce PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

Zużycie energii elektrycznej dla poszczególnych grup urządzeń jest zależne od sposobu ich przeznaczenia, np. praca w okresach zimowych, w nocy, w godzinach od 7:00 do 15:00 dla urządzeń zabudowanych w biurach takich jak komputery, klimatyzatory itp. Zużycie energii elektrycznej dla urządzeń elektroenergetycznych zarządzanych przez PKP PLK S.A. z każdym rokiem wzrasta, głównie ze względu na zabudowę nowych urządzeń EOR w rozjazdach. Na rysunku 7.4 pokazano liczbę rozjazdów przeliczeniowych zabudowanych z zamontowanymi urządzeniami EOR w latach 2004-2019. Liczba rozjazdów przeliczeniowych z urządzeniami EOR zabudowanymi na terenie całej Polski w roku 2004 wynosiła 27 923, a w roku 2019 zwiększyła się do 33 587.



Rys. 7.3. Procentowy udział mocy zainstalowanej podstawowych odbiorów energii elektrycznej zabudowanych na terenie Spółki PKP PLK S.A. Źródło: opracowanie własne. Dane z PKP PLK S.A.

W związku z tym, że na terenie całej Polski urządzenia elektrycznego ogrzewania rozjazdów (w tym układy zasilania i szczególnie sterowania) podlegają modernizacji, są one bardziej energooszczędne w porównaniu do układów bez zamontowanych elementów automatycznego sterowania. Układy sterowania w początkowej wersji były wykonywane tylko jako ręcznie sterowane przez pracowników PKP. Ręczne sterowanie urządzeniami EOR jest zależne od oceny przez pracowników obsługi warunków pogodowych, które wymagają ich załączenia. W kolejnych latach ilość urządzeń EOR z układami sterowania automatycznego wzrosła do poziomu 51%, a w roku 2019 osiągnęła poziom 70%. Sterowanie automatyczne pozwala na zmniejszenie zużycia energii elektrycznej spowodowane działaniem sterownika, który pobiera dane z czujników zabudowanych w rozjeździe wzorcowym.



Rys. 7.4. Ilość rozjazdów przeliczeniowych z zabudowanymi urządzeniami EOR na terenie PKP PLK S.A. w latach 2004 - 2019 Źródło: opracowanie własne. Dane z PKP PLK S.A.

Pomimo przeprowadzanych modernizacji zużycie energii rośnie z każdym rokiem z uwagi na wzrost liczby zabudowywanych urządzeń EOR. Zużycie energii elektrycznej za okres 2018 roku wynosiło około 265 GWh. Roczne koszty związane ze zużyciem energii elektrycznej w PKP PLK S.A. w ostatnich latach wynosiły około 150 mln zł, przy czym koszty wynikające ze zużycia energii przez zabudowane urządzenia EOR w każdym roku to około 30 mln zł. Zużycie energii elektrycznej przez urządzenia EOR są w znacznym stopniu zależne od intensywności negatywnych warunków atmosferycznych w okresach, kiedy urządzenia te są załączane do pracy. Na terenie PKP PLK S.A. okres, kiedy urządzenia EOR są przewidziane do pracy w warunkach zimowych, trwa od początku listopada do końca kwietnia. Zmniejszenie zużycia energii elektrycznej dla urządzeń EOR w całej Polsce o 10% spowodowałoby obniżenie ponoszonych kosztów za energię elektryczną o około 3 mln zł. Oszczędności uzyskane ze zużycia energii elektrycznej można wykorzystać na modernizację energochłonnych urządzeń EOR, osiągając dalsze zmniejszenie kosztów. Zmniejszenie zużycia energii elektrycznej ma także istotny aspekt ekologiczny.

Poprawę efektywności energetycznej można osiągnąć poprzez działania skupione na grupach odbiorów energii elektrycznej, które zwykle prowadzą do sprawdzalnej i wymiernej lub możliwej do oszacowania poprawy efektywności energetycznej urządzeń.

Podstawa prawna obligująca do takich działań to obowiązek wynikający z nowelizacji ustawy o efektywności energetycznej z dnia 9 stycznia 2020 r. [73]. Nowelizacja ustawy wymusza określenie ilości i struktury zużywanej energii oraz zalecenie konkretnych rozwiązań (organizacyjnych, modernizacyjnych, formalnych), której celem będzie poprawa i zwiększenie efektywności energetycznej przedsiębiorstw. Należą do nich:

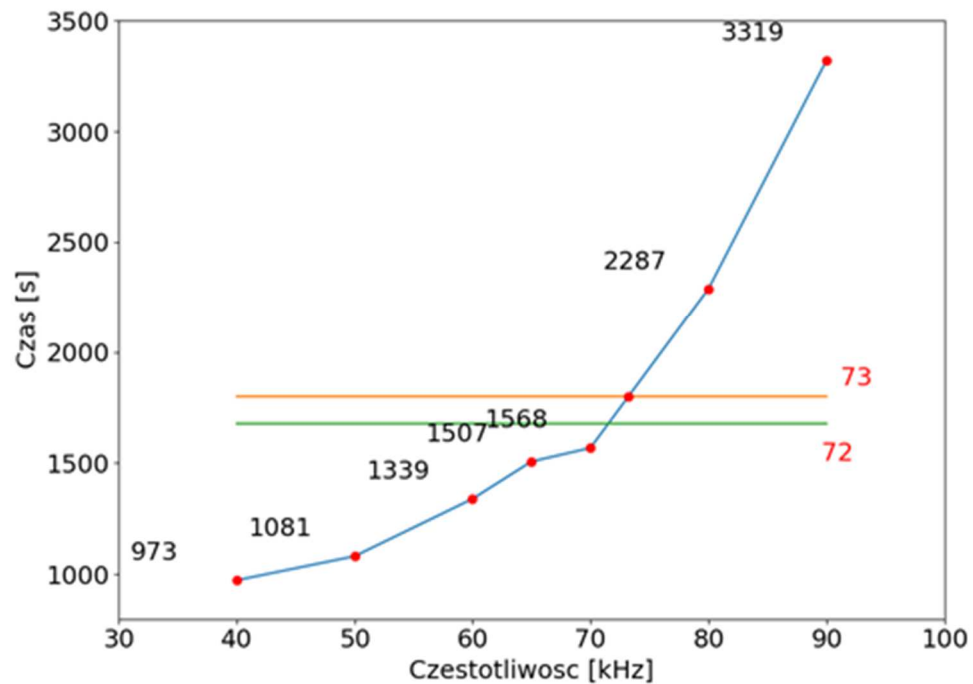
- sterowanie naprzemienne do ograniczenia poboru mocy przez urządzenia ogrzewania rozjazdów (przystosowanie rozdzielnic polega na wymianie programu sterownika na obsługujący sterowanie naprzemienne tak, aby elektrycznie było niemożliwe załączenie dwóch grup sterowania naprzemiennego jednocześnie);
- zabudowa nowoczesnych systemów sterowania dla urządzeń EOR;
- systematyczne szkolenia w zakresie świadomości pracowników odnośnie gospodarki energetycznej, czyli dobrych nawyków w czasie korzystania z urządzeń elektrycznych, w tym korzystanie z urządzeń EOR sterowanych ręcznie przez obsługę;
- wyrobienie nawyków związanych z oszczędzaniem energii, szczególnie dla urządzeń EOR sterowanych ręcznie przez pracownika obsługi;
- zabudowa nowych rozwiązań w zakresie ogrzewania rozjazdów, których działanie jest efektywniejsze w stosunku do obecnie stosowanych urządzeń EOR;

W ten ostatni punkt wpisuje się zastosowanie urządzeń IOR. Warto zauważyć, że dostępne możliwości w tym zakresie są obecnie znacznie utrudnione ze względu na brak rozwiązań technicznych dopuszczonych do stosowania, które po zabudowaniu spowodują znaczne zmniejszenie zużycia energii elektrycznej. Jedno z nowoczesnych rozwiązań jest przedmiotem rozprawy.

7.2. Porównanie zużycia energii elektrycznej do ogrzewania rozjazdu typu Rz 49E1-190-1:9 za pomocą urządzeń EOR i IOR

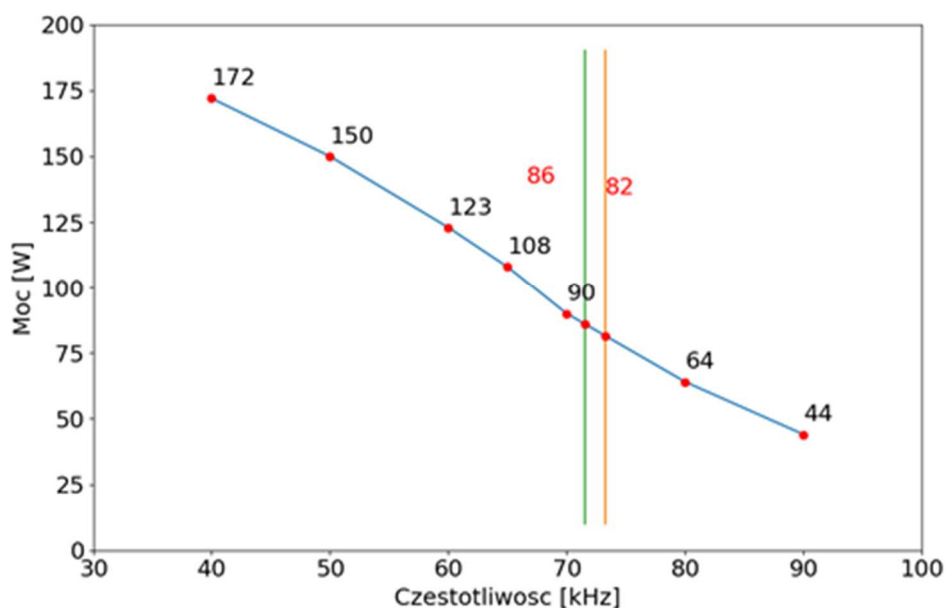
Na podstawie wyników uzyskanych podczas bezpośredniego porównania pracy urządzeń EOR i IOR w komorze klimatycznej oraz w terenie (rozdział 5) stwierdzono, że urządzenie IOR oferuje efektywniejszy sposób wytapiania lodu i śniegu w porównaniu do tradycyjnego urządzenia EOR. Aby dokonać szacunkowej analizy zużycia energii przy zastosowaniu obydwu rodzajów urządzeń, wykorzystano wyniki uzyskane w badaniach z wytapianiem lodu. Przyjęto, że nastawa (częstotliwość pracy) urządzenia IOR będzie taka, aby czas potrzebny do wytopienia referencyjnej bryłki lodu był taki sam jak w przypadku urządzenia EOR. W podrozdziale 5.1.2 stwierdzono, że urządzenie EOR wytapiało

referencyjną bryłę lodu w czasie około 29 minut (w temperaturze 0 °C). Do dalszego oszacowania przyjęto, że wytopienie następuje w czasie 28 do 30 minut. Na rysunku 7.5 wykreślono charakterystykę urządzenia IOR w układzie częstotliwość (oś pozioma) i czas wytapiania referencyjnej bryłki lodu (oś pionowa). Wynika z niego, że aby czas działania obydwu urządzeń był zbliżony (28-30 minut), urządzenie IOR powinno pracować przy częstotliwości 72 do 73 kHz.



Rys. 7.5. Obliczenia wartości częstotliwości układu IOR dla czasu 29 minut (tolerancja +/- 1 minuta). Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 7.6 przedstawiono charakterystykę urządzenia IOR w układzie częstotliwość (oś pozioma) i moc (oś pionowa). Wynika z niej, że częstotliwości pracy w zakresie 72-73 kHz odpowiadają mocy 82-86 W. W dalszym ciągu przyjęto wartość średnią 84 W. Jest to moc urządzenia IOR, przy której wytopienie referencyjnej bryłki lodu nastąpi w takim samym czasie jak w układzie EOR. Należy podkreślić, że wyniki te są szacunkowe, zarówno ze względu na wykorzystanie wyników z komory klimatycznej, jak i też na przyjęty sposób wyznaczania równoważnego sposobu pracy obydwu rodzajów urządzeń.



Rys. 7.6. Obliczenia wartości mocy układu IOR przy częstotliwości pracy układu $f = 72-73$ kHz. Źródło: opracowanie własne.

Przyjęty jednakowy czas działania obydwu układów pozwala zastąpić porównywanie zużycia energii porównywaniem mocy. Do tego celu wybrano taki sam typ rozjazdu (Rz 49E1-190-1:9), dla którego zabudowano ogrzewanie rozjazdów IOR oraz EOR. Rozjazd ten obrano z tego powodu, że jest to obecnie jedyny rozjazd z zabudowanymi eksperymentalnie urządzeniami IOR. Jest on co prawda nieczynny, ale został zabudowany zgodnie z wytycznymi [4,5] i dlatego może stanowić punkt odniesienia dla rozjazdów innego typu. Informacje dotyczące mocy zainstalowanej w tego typu rozjeździe przedstawiono w tabeli 7.1. Układ EOR składa się z 4 grzejników o mocy 900 W każdy (moc całego układu 3600 W). Natomiast układ IOR składa się z 18 radiatorów. Zgodnie z przedstawionymi wyżej rozważaniami moc każdego radiatora wynosi 84 W (moc całego układu 1512 W). Z przedstawionej wyżej analizy wynika, że dla rozjazdu typu Rz 49E1-190-1:9 oszczędności w zużyciu energii mogą sięgnąć nawet **58%**. Jest to oczywiście wartość szacunkowa i być może nierealna do osiągnięcia, ale wskazuje na duży potencjał rozpatrywanego rozwiązania.

Tabela 7.1. Wartości mocy dla urządzenia EOR oraz IOR przy jednakowym czasie wytapiania lodu z uwzględnieniem przepisów projektowania [4,5] dla rozjazdu typu Rz 49E1-190-1:9. Źródło: opracowanie własne.

Układ EOR			Układ IOR		
Ilość grzejników	Moc pojedynczego grzejnika	Moc układu EOR	Ilość radiatorów	Moc pojedynczego radiatora	Moc układu IOR
sztuki	W	W	sztuki	W	W
4	900	3600	18	84	1512

W związku ze zmianami wytycznych projektowania urządzeń EOR na terenie PKP PLK S.A. w 2004 roku zamiast 4 sztuk grzejników 900 W zastosowano 4 sztuki grzejników 900 W oraz 2 sztuki grzejników 1050 W [6]. Moc całego układu zamiast 3 600 W wzrosła do wartości 5 700 W. W tabeli 7.2 przedstawiono informacje dotyczące mocy dla rozjazdu typu Rz 49E1-190-1:9 z uwzględnieniem większej powierzchni ogrzewania rozjazdu. Dla układu IOR w takim przypadku zamiast 18 sztuk radiatorów powinno być 28 sztuk radiatorów. W efekcie moc całego układu zamiast 1512 W będzie wynosić 2352 W. Oszczędności dla takiego układu wynoszą **59%**.

Tabela 7.2. Wartości mocy dla urządzenia IOR oraz EOR przy jednakowym czasie wytapiania lodu z uwzględnieniem obowiązujących przepisów projektowania [6] dla rozjazdu typu Rz 49E1-190-1:9. Źródło: opracowanie własne.

Układ EOR			Układ IOR		
Ilość grzejników	Moc pojedynczego grzejnika	Moc układu EOR	Ilość radiatorów	Moc pojedynczego radiatora	Moc układu IOR
sztuki	W	W	sztuki	W	W
2	1050	2100	28	84	2352
4	900	3600			
SUMA		5700	SUMA		2352

7.3. Propozycja hybrydowego układu IOR+EOR

Z doświadczenia zawodowego autora wynika, że dla zwiększenia niezawodności pracy rozjazdów kolejowych oprócz podgrzewania przestrzeni roboczej między siodełkami oraz iglicą i opornicą należy także podgrzewać siodełka, na których spoczywa iglica. Siodełka takie mogą być podgrzewane zarówno metodą tradycyjną, jak i indukcyjną. Przykład urządzenia indukcyjnego zabudowanego w siodełku przedstawiono w rozdziale 2 na rysunku 2.9. Rozwiązanie takie ma tę wadę, że ewentualna awaria urządzenia zabudowanego w siodełku może sprawiać duży kłopot podczas naprawy, a właściwie wymiany urządzenia. Aby tego uniknąć, proponuje się zastosować specjalnego typu grzejniki rezystancyjne zabudowane przy każdym siodełku. Grzejniki te powinny mieć długość czynną 0,15 m i być mocowane tradycyjnymi uchwytami do stopki szyny tuż przy siodełku. Zastosowanie takiego układu hybrydowego IOR+EOR, w którym radiatory IOR byłyby umieszczone pomiędzy siodełkami, a siodełka byłyby ogrzewane w tradycyjny sposób specjalnymi grzejnikami, pozwoliłoby na wykorzystanie potencjału urządzeń IOR przy jednoczesnym zapewnieniu łatwej wymiany każdego grzejnika w razie jego awarii. Dodatkowo taki układ umożliwiłby sterowanie mocą urządzeń IOR, co pozwoliłoby dostosować intensywność ogrzewania rozjazdów w zależności od potrzeb. Parametry mocowe proponowanego układu hybrydowego IOR+EOR dla rozjazdu Rz 49E1-190-1:9 przedstawiono w tabeli 7.3. Układ hybrydowy miałby moc 3738 W w porównaniu do układu tradycyjnego o mocy 5700 W (tabela 7.2), a więc byłoby to o 34% mniej.

Tabela 7.3. Parametry mocowe hybrydowego układu IOR+EOR dla rozjazdu typu Rz 49E1-190-1:9 w/g wytycznych [6]. Źródło: opracowanie własne.

Część IOR (ogrzewanie przestrzeni między siodełkami)			Część EOR (ogrzewanie siodełek)		
Ilość radiatorów	Moc pojedynczego radiatora	Moc układu IOR	Ilość grzejników	Moc pojedynczego grzejnika	Moc układu EOR
sztuki	W	W	sztuki	W	W
28	84	2352	28	49,5	1386
SUMA MOCY					3738

Układ hybrydowy IOR+EOR miałby zmienną moc w zależności od zastosowanej częstotliwości. Przedstawiono to w tabeli 7.4, która dotyczy rozpatrywanego rozjazdu Rz 49E1-190-1:9. Wynika z niej, że moc zmieniałaby się od 2618 W dla częstotliwości 90 kHz do 6202 W dla częstotliwości 40 kHz.

Tabela 7.4. Moc układu hybrydowego IOR+EOR dla rozjazdu typu Rz 49E1-190-1:9 w zależności od częstotliwości układu sterowania w/g wytycznych [6].
Źródło: opracowanie własne.

Częstotliwość pracy IOR	Moc pojedynczego radiatora IOR	Ilość zastosowanych radiatorów IOR	Moc radiatorów IOR	Moc grzejników EOR	SUMA mocy IOR+EOR
kHz	W	Sztuki	W	W	W
40	172	28	4816	1386	6202
50	150	28	4200	1386	5586
60	123	28	3444	1386	4830
65	108	28	3024	1386	4410
70	90	28	2520	1386	3906
80	64	28	1792	1386	3178
90	44	28	1232	1386	2618

W przypadku potrzeby intensywnego ogrzewania rozjazdów pobór mocy może być zwiększony nawet do 6202 W. Natomiast w przypadku pojawienia się warunków pogodowych, które pozwalają zmniejszyć intensywność ogrzewania rozjazdów, pobór mocy może być zmniejszony do 2618 W.

W tabeli 7.5 pokazano pobór mocy, czas wytapiania bryłki lodu oraz pobór energii dla układu hybrydowego IOR+EOR w zależności od częstotliwości układu sterowania IOR. Moc układu hybrydowego w przypadku częstotliwości 40 kHz i 50 kHz jest najwyższa, wyższa lub zbliżona do mocy układu EOR (odpowiednio dla 40 kHz i 50 kHz moc wynosi 6202 oraz 5586 W), jednak ze względu na znacznie krótszy czas wytapiania bryłki lodu (odpowiednio dla 40 kHz i 50 kHz: 16 i 18 minut) w stosunku do układu EOR (29 minut) to dla tych częstotliwości uzyskuje się największą oszczędność energii, wynoszącą około 1,08-1,10 kWh. Podobną oszczędność energii uzyskano dla częstotliwości 70 kHz, dla której czas wytapiania bryłki lodu (26 minut) był porównywalny do układu EOR, natomiast pobierana moc była mniejsza o 1,8 kW. Najmniejszą oszczędność energii uzyskano dla najwyższej częstotliwości pracy układu, tj. 90 kHz, choć pobór mocy był najmniejszy (2618 W), to znacznie wydłużony czas topnienia lodu (55 minut) spowodował, że oszczędność energii wyniosła niespełna 0,36 kWh. Warto zauważyć, że niezależnie od zastosowanej częstotliwości układ hybrydowy w porównaniu do układu EOR pozwala na oszczędność energii, dodatkowo regulacja częstotliwości pozwala w zależności od potrzeb i warunków środowiskowych (temperatury, intensywności opadów) skrócić lub wydłużyć czas topnienia lodu.

Tabela 7.5. Szacunkowe wartości poboru mocy, czasu wytapiania bryłki lodu oraz poboru energii układu hybrydowego IOR+EOR w zależności od częstotliwości układu sterowania w stosunku do układu tradycyjnego EOR (5700 W) dla wytycznych [6]. Źródło: opracowanie własne.

Częstotliwość pracy	Moc układu hybrydowego	Czas wytapiania bryłki lodu dla układu hybrydowego	Pobór energii układu hybrydowego	Różnica pobieranej energii przez układ hybrydowy w odniesieniu do układu EOR
Hz	W	min	kWh	kWh
40	6202	16	1,65	-1,10
50	5586	18	1,68	-1,08
60	4830	22	1,77	-0,98
65	4410	25	1,84	-0,92
70	3906	26	1,69	-1,06
80	3178	38	2,01	-0,74
90	2618	55	2,40	-0,36

W dalszej części rozprawy rozpatrzono inne często występujące typy rozjazdów. W tabeli 7.6 zestawiono dane związane z ogrzewaniem EOR wybranych rozjazdów.

Tabela 7.6. Moc dla urządzeń EOR zabudowanych w podstawowych typach rozjazdów zgodnie z obowiązującymi wytycznymi projektowania [6]. Źródło: opracowanie własne.

Urządzenia EOR dla podstawowych rozjazdów				
Typ rozjazdu	Ilość grzejników	Moc pojedynczego grzejnika	Długość grzejnika	Moc układu EOR
-	sztuki	W	m	W
Rz 49E1-190-1:9	4	900	2,8	3600
	2	1050	3,3	2100
	SUMA			5700
Rz 49E1-300-1:9	2	1050	3,3	2100
	4	1250	3,8	5000
	SUMA			7100
Rkpd 49E1-190-1:9	4	900	2,8	3600
	8	1050	3,3	8400
	4	1250	3,8	5000
	SUMA			17000
Rz 60E1-190-1:9	4	900	2,8	3600
	2	1050	3,3	2100
	SUMA			5700
Rz 60E1-300-1:9	6	1250	3,8	7500
	SUMA			7500
Rz 60E1-500-1:12	8	1250	3,8	10000
	SUMA			10000
Rkpd 60E1-190-1:9	16	1250	3,8	20000
	SUMA			20000

Na podstawie przeprowadzonych badań zaproponowano ogrzewanie rozjazdów za pomocą hybrydowego układu IOR+EOR (tabela 7.7) dla częstotliwości pracy układu IOR 72 kHz. Przykładowo dla rozjazdu typu Rz 49E1-190-1:9 należy zastosować 28 sztuk radiatorów IOR każdy po 84 W oraz 28 sztuk specjalnych grzejników po 49,5 W każdy. Suma mocy dla układu hybrydowego 3 738 W.

Tabela 7.7. Moc układu hybrydowego IOR+EOR dla podstawowych typów rozjazdów zgodnie z obowiązującymi wytycznymi projektowania [6]. Źródło: opracowanie własne.

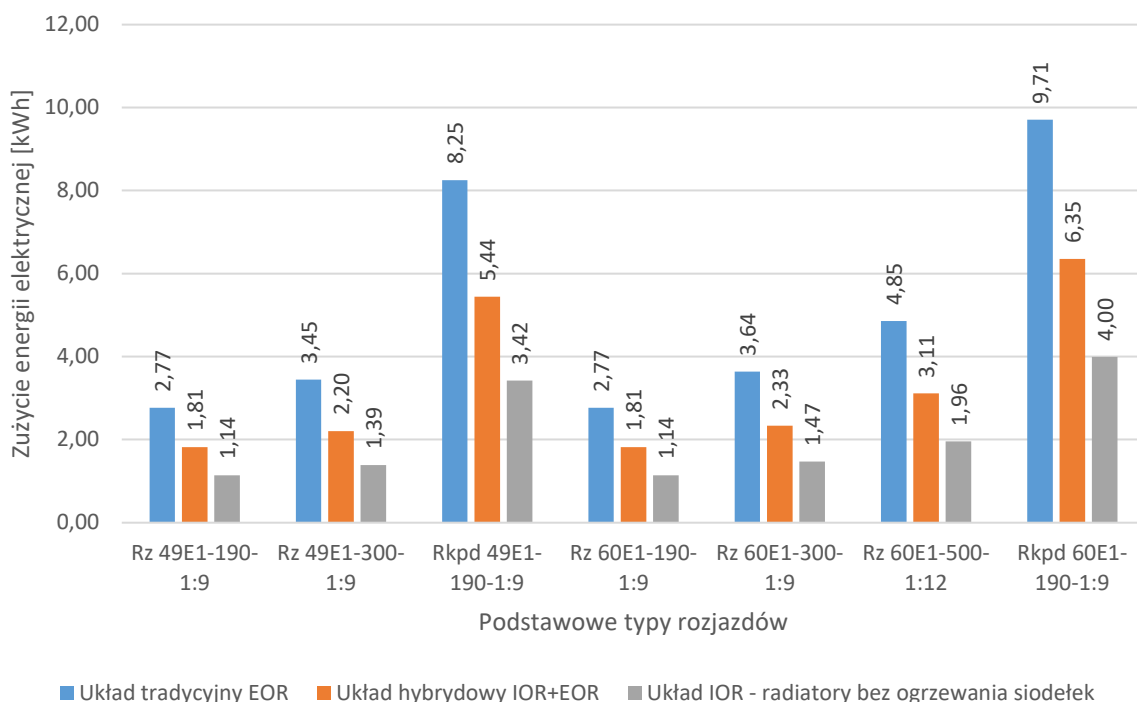
Układ hybrydowy IOR + EOR						
Typ rozjazdu	Układ IOR - radiatory bez ogrzewania siodełek			Układ EOR - ogrzewanie siodełek		
	Ilość radiatorów	Moc pojedynczego radiatora	Moc układu IOR	Ilość grzejników	Moc pojedynczego grzejnika	Moc układu EOR
-	sztuki	W	W	sztuki	W	W
Rz 49E1-190-1:9	28	84	2352	28	49,5	1386
	SUMA					3738
Rz 49E1-300-1:9	34	84	2856	34	49,5	1683
	SUMA					4539
Rkpd 49E1-190-1:9	84	84	7056	84	49,5	4158
	SUMA					11214
Rz 60E1-190-1:9	28	84	2352	28	49,5	1386
	SUMA					3738
Rz 60E1-300-1:9	36	84	3024	36	49,5	1782
	SUMA					4806
Rz 60E1-500-1:12	48	84	4032	48	49,5	2376
	SUMA					6408
Rkpd 60E1-190-1:9	98	84	8232	98	49,5	4851
	SUMA					13083

W tabeli 7.8 porównano układy EOR, IOR oraz IOR+EOR dla wybranych typów rozjazdów dla częstotliwości pracy układu IOR 72 kHz. Dla układu IOR (tj. bez ogrzewania siodełek) zmniejszenie poboru mocy sięga nawet 59-60% w zależności od typu rozjazdu. W przypadku zastosowania układu hybrydowego IOR+EOR (tj. z ogrzewaniem siodełek) oszczędności w poborze mocy urządzeń byłyby na poziomie 34-36% w zależności od danego typu rozjazdu.

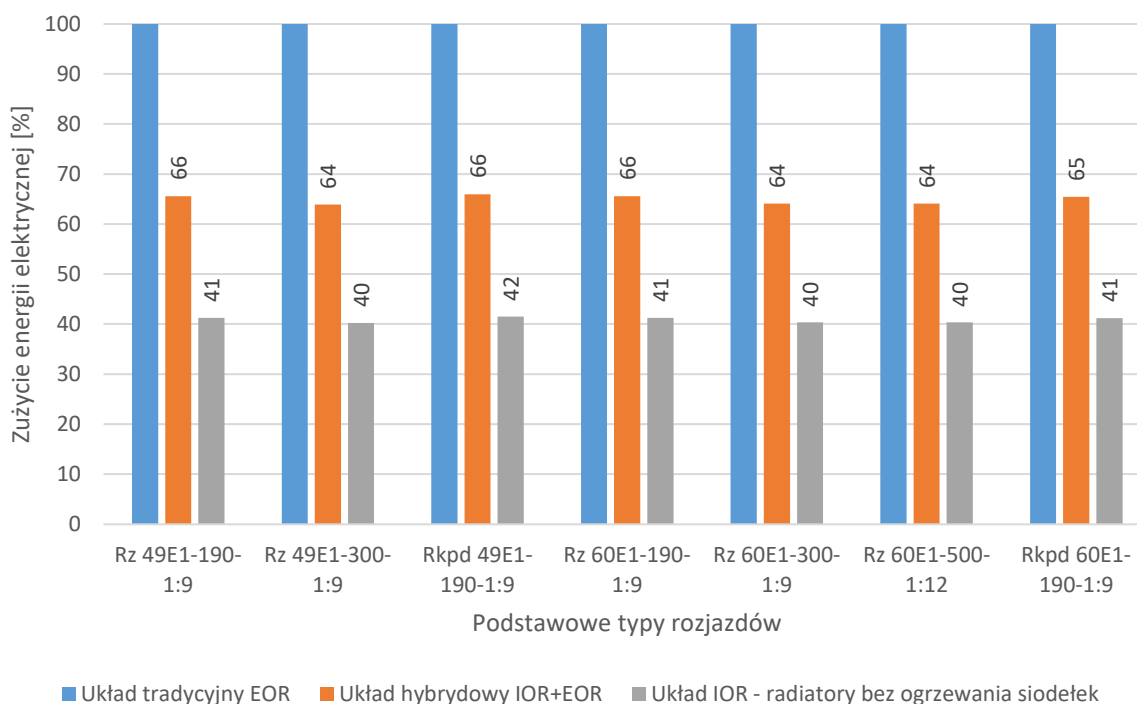
Tabela 7.8. Porównanie mocy urządzeń innowacyjnych IOR+EOR w stosunku do urządzeń tradycyjnych EOR zgodnie z obowiązującymi wytycznymi projektowania [6]. Źródło: opracowanie własne.

Typ rozjazdów	Układ tradycyjny EOR	Układ IOR – radiatory bez ogrzewania siodełek		Układ hybrydowy IOR+EOR			
	Moc urządzeń EOR	Moc urządzeń IOR	Oszczędność mocy	Oszczędność mocy	Moc urządzeń IOR+EOR	Oszczędność mocy	Oszczędność mocy
	W	W	W	%	W	W	%
Rz 49E1-190-1:9	5700	2352	3348	59	3738	1962	34
Rz 49E1-300-1:9	7100	2856	4244	60	4539	2561	36
Rkpd 49E1-190-1:9	17000	7056	9944	59	11214	5786	34
Rz 60E1-190-1:9	5700	2352	3348	59	3738	1962	34
Rz 60E1-300-1:9	7500	3024	4476	60	4806	2694	36
Rz 60E1-500-1:12	10000	4032	5968	60	6408	3592	36
Rkpd 60E1-190-1:9	20000	8232	11768	59	13083	6917	35

Na rysunku 7.7 przedstawiono zużycie energii elektrycznej do ogrzewania podstawowych typów rozjazdów przy założeniu, że ich czas działania jest równy czasowi wytapiania kostki lodu dla temperatury otoczenia 0 °C. Częstotliwość pracy układu IOR przyjęto 72 kHz. Na rysunku 7.8 przedstawiono zużycie energii elektrycznej podstawowych rozjazdów (IOR, IOR+EOR) w stosunku do zużycia energii elektrycznej dla tradycyjnych urządzeń EOR. Wyniki podano jako procent energii potrzebnej w układzie EOR. Typ rozjazdu nie ma dużego wpływu na procentowe wartości potrzebnej energii. W przypadku zastosowania układu hybrydowego IOR+EOR w takim przypadku zużycie energii jest mniejsze o około 35%.

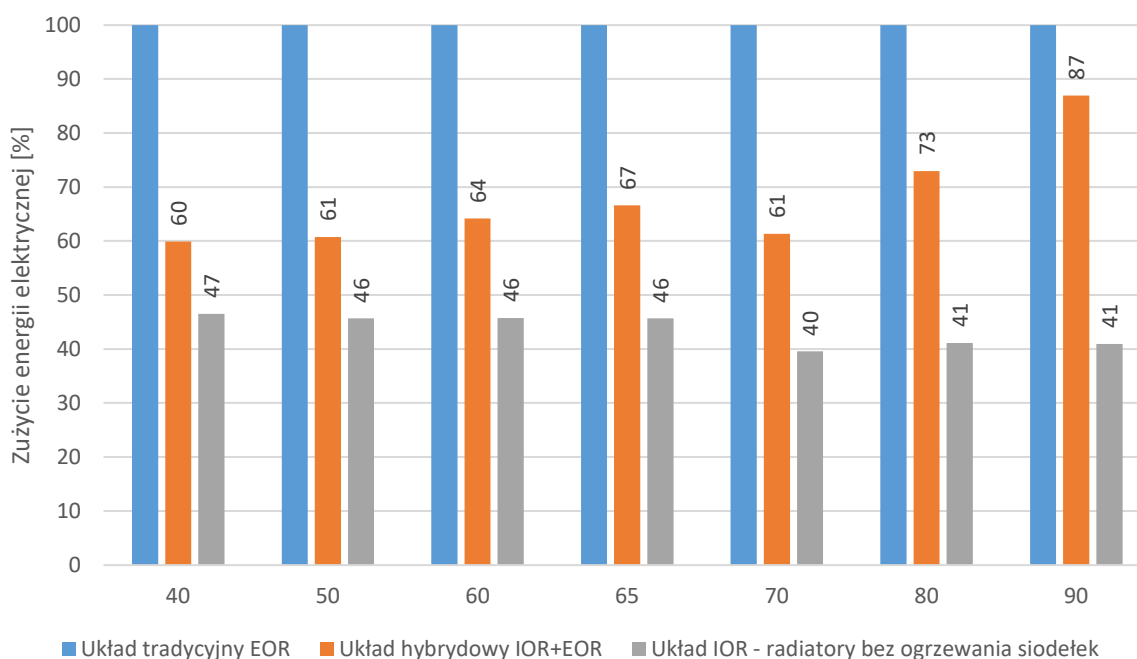


Rys. 7.7. Zużycie energii elektrycznej urządzeń EOR, IOR oraz IOR+EOR w czasie potrzebnym do wytopienia lodu w temperaturze 0 °C - zużycie energii elektrycznej urządzeń podano w kWh. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 7.8. Zużycie energii elektrycznej urządzeń układu hybrydowego IOR+EOR oraz układu IOR w stosunku do zużycia energii elektrycznej tradycyjnych urządzeń EOR - dane podano w procentach. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 7.9 przedstawiono procentowe zużycie energii elektrycznej przyjmując za 100% energię potrzebną w metodzie EOR dla rozjazdu typu Rz 49E1-190-1:9 dla różnych częstotliwości urządzenia IOR w zakresie od 40 do 90 kHz dla temperatury otoczenia 0 °C. Różne częstotliwości działania układu IOR nie mają dużego wpływu na zużycie energii (np. zmniejszenie częstotliwości prowadzi do zwiększenia poboru mocy, ale jest to rekompensowane krótszym czasem działania). Dla układu IOR+EOR w związku z tym, że są zastosowane specjalne grzejniki do ogrzewania siodełek w systemie ogrzewania EOR, stwierdzono w całym przedziale częstotliwości różne zużycie energii elektrycznej. W układzie IOR+EOR zużycie energii elektrycznej zawierało się w zakresie od 60 do 87% w stosunku do układu EOR. Wraz ze wzrostem częstotliwości pracy układu IOR+EOR następowało zwiększenie poboru energii elektrycznej. Zużycie energii elektrycznej dla częstotliwości układu 40, 50 oraz 70 kHz wskazuje na zbliżone zużycie energii. Zbliżone wartości uzyskuje się także dla innych typów rozjazdów.



Rys. 7.9. Procentowe zużycie energii elektrycznej urządzeń układu hybrydowego IOR+EOR oraz układu IOR w stosunku do zużycia energii elektrycznej tradycyjnych urządzeń EOR dla temperatury otoczenia 0 °C przy różnych częstotliwościach układu IOR dla rozjazdu typu Rz 49E1-190-1:9. Źródło: opracowanie własne.

Przedstawione wyżej obliczenia sugerują, że możliwe jest zmniejszenie zużycia energii elektrycznej potrzebnej do ogrzewania rozjazdów kolejowych o około 35-40%. Należy podkreślić, że są to obliczenia szacunkowe. Nawet gdyby w praktyce wartości okazały się mniejsze, ewentualne zastosowanie hybrydowego układu IOR+EOR mogłoby przynieść wymierne zmniejszenie zużycia energii, a jednocześnie pozwoliłoby zwiększyć możliwości sterowania ogrzewaniem rozjazdów poprzez łatwą regulację programową inersyjności ogrzewania, co w efekcie pozwoliłoby dostosować ją do aktualnie panujących warunków pogodowych.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zużycie energii elektrycznej jest kluczową wielkością wpływającą na koszty ponoszone przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Duży wpływ w tym zakresie mają urządzenia EOR, które są niezbędne do bezpiecznego prowadzenia ruchu pociągów w zimie. Modernizacja systemu ogrzewania rozjazdów może znacznie wpłynąć na ograniczenie ponoszonych kosztów. Wdrożenie nowych rozwiązań może się szybko zwrócić i w następnej kolejności przynieść znaczne oszczędności finansowe. Zagadnienia poruszane w pracy mają na celu zwiększenie efektywności ogrzewania rozjazdów kolejowych poprzez zastosowanie innowacyjnych urządzeń indukcyjnego ogrzewania rozjazdów. Na podstawie przeprowadzonych badań zaproponowano zastosowanie hybrydowego układu IOR+EOR, który łączy zalety obydwu metod. Analiza pracy układów EOR, IOR oraz IOR+EOR wskazuje, że połączenie elementów indukcyjnego ogrzewania rozjazdów z tradycyjnymi oporowymi elementami powinno doprowadzić do uzyskania znaczących oszczędności w zużyciu energii elektrycznej. Rdzeń pracy stanowią badania w zakresie elektrotechniki, ale płynące z nich wnioski mają duże przełożenie na aspekty czysto ekonomiczne oraz ekologiczne.

Przeprowadzone badania literaturowe wskazywały na duży potencjał indukcyjnego ogrzewania rozjazdów, zwłaszcza w zakresie efektywności energetycznej, szybkości działania oraz możliwości regulacyjnych. W dalszej kolejności przeprowadzono analizę właściwości elektrycznych grzałki IOR w zależności od takich parametrów konstrukcyjnych, jak liczba i sposób ułożenia zwojów, właściwości materiałowe czy wymiary geometryczne. Następnie przeprowadzono symulacje numeryczne dotyczące rozkładu temperatury w otoczeniu grzałki IOR, które pozwoliły wstępnie uzyskać informacje dotyczące rozptyłu ciepła wokół radiatora. Jednocześnie przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych z topnieniem lodu w warunkach laboratoryjnych, w tym w komorze klimatycznej, oraz z topnieniem śniegu w symulowanych warunkach terenowych z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. Badano także parametry związane z jakością energii elektrycznej, gdyż urządzenie IOR zawiera elementy energoelektroniczne mogące być źródłem zakłóceń emitowanych do sieci. W aspekcie kompatybilności elektromagnetycznej badano też poziom pola magnetycznego wokół części wykonawczej IOR. W następnej kolejności dokonano szacunkowej analizy porównawczej zużycia energii elektrycznej dla wybranych typów rozjazdów w przypadku zastosowania urządzeń EOR, IOR lub ich łącznego zastosowania w układzie hybrydowym IOR+EOR. Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Spośród badanych metod ogrzewania rozjazdów kolejowych największe oszczędności w zakresie zużycia energii elektrycznej oferuje metoda IOR. Ponieważ jednak ewentualna awaria urządzenia IOR zabudowanego w siodełku może stanowić problem z punktu widzenia jego wymiany, zaproponowano, aby siodełka były ogrzewane metodą

rezystancyjną, co doprowadziło do koncepcji układu hybrydowego IOR+EOR. Przeprowadzona analiza szacunkowa wskazuje, że oszczędności energii wynosiłyby około 35-40% w stosunku do tradycyjnego układu EOR i byłyby tylko nieco mniejsze niż w przypadku czystego układu IOR.

2. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że urządzenie IOR niezawodnie wytapia śnieg z przestrzeni roboczej rozjazdu. Ciepło przez nie generowane jest praktycznie w 100% dystrybuowane w przestrzeń roboczą, co odróżnia je od tradycyjnego urządzenia EOR, które nagrzewając znacznie opornicę, powoduje ucieczkę ciepła poza obszar roboczy. W efekcie wytapianie śniegu lub lodu przez urządzenie IOR następuje intensywniej niż w przypadku urządzenia EOR przy takiej samej mocy.
3. Poprawne wytapianie śniegu przez urządzenie EOR wymaga jego działania już podczas opadów śniegu. Urządzenie IOR radzi sobie także w przypadku śniegu już zalegającego w rozjeździe, podczas gdy metoda EOR prowadzi w takim przypadku do wytopienia tunelu w śniegu i pozostawiania reszty śniegu w przestrzeni roboczej rozjazdu.
4. Rezystancja grzałki IOR silnie zależy od częstotliwości i w przybliżeniu rośnie ona proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z częstotliwości. Wynika to przede wszystkim z małej głębokości wnikania pola do obudowy grzałki, co powoduje, że wraz ze wzrostem częstotliwości spada efektywny przekrój czynny dla prądów wirowych indukowanych w obudowie grzałki. Stąd też moc pobierana przez grzałkę jest zależna od częstotliwości i w przybliżeniu maleje odwrotnie proporcjonalnie do pierwiastka z częstotliwości przy niezmienniej wartości skutecznej napięcia zasilającego.
5. Zależność rezystancji grzałki IOR od częstotliwości oferuje możliwość płynnej regulacji mocy za pomocą zmiany częstotliwości, czego dokonuje się programowo. Można w ten sposób dostosowywać potrzebną moc do aktualnych warunków pogodowych, np. zwiększyć dynamikę nagrzewania w razie nagłego pogorszenia pogody. Możliwości takich nie mają aktualnie stosowane układy EOR, które mogą być albo wyłączone, albo włączone na pełną moc.
6. Aby element grzewczy IOR pracował efektywnie, konieczna jest praca w rezonansie. Pociąga to za sobą odpowiedni dobór i sterowanie pojemnością kondensatorów w zależności od częstotliwości podawanej na cewkę IOR, gdyż zmiana częstotliwości powoduje wzrost reaktancji grzałki.
7. Urządzenie IOR jako całość (elementy wykonawcze + układ energoelektroniczny) przejawia charakter rezystancyjno-pojemnościowy. Gdyby urządzenie pracowało w oderwaniu od innych urządzeń w sieci, należałoby zastosować odpowiednią kompensację mocy biernej. Ponieważ jednak w typowych przypadkach wiele odbiorów ma charakter rezystancyjno-indukcyjny, to zastosowanie urządzenia IOR może być uważane za pewną formę kompensacji mocy biernej indukcyjnej.

8. Proponowane rozwiązanie dzięki wykorzystaniu układu sterowania już pracującego na terenie PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. jest kompatybilne z obecnie istniejącym systemem nadzoru i kontroli, np. SMUE.
9. Do zalet proponowanego rozwiązania należą:
 - istotne zmniejszenie zużycia energii elektrycznej,
 - możliwość płynnej regulacji intensywności nagrzewania radiatorów IOR,
 - możliwość pracy urządzeń IOR przy mniejszej mocy umownej przyłącza,
 - możliwość pracy urządzeń IOR w układzie hybrydowym IOR+EOR, prowadząca mniejszego poboru energii elektrycznej przy zachowaniu funkcjonalności układu ogrzewania rozjazdów.
10. Pomimo szeregu zalet, urządzenia IOR mają także wady. Są one związane przede wszystkim z większym stopniem skomplikowania w stosunku do urządzenia EOR, zwłaszcza z obecnością części energoelektronicznej. Stąd też podstawowe wady to:
 - większy koszt początkowy zastosowania urządzenia IOR w stosunku do EOR,
 - możliwość wystąpienia uszkodzenia elementów energoelektronicznych,
 - możliwość wystąpienia zwiększonej ilości prac serwisowych ze względu na ewentualne uszkodzenia, co może spowodować zwiększenie kosztów utrzymania.

Biorąc pod uwagę powyższe wnioski, tezę pracy uważam za udowodnioną. Na koniec warto wytyczyć kierunki dalszych badań:

- Wskazane byłoby zabudowanie w terenie testowego układu hybrydowego IOR+EOR w celu dokładniejszego określenia jego możliwości eksploatacyjnych w zakresie oszczędności energii oraz funkcjonalności.
- Warto byłoby przeprowadzić pełną analizę kosztów produkcji, zabudowy oraz serwisu w stosunku do możliwych korzyści finansowych uzyskanych ze zmniejszenia zużycia energii elektrycznej.
- Aby zmniejszyć prawdopodobieństwo występowania uszkodzeń elementów energoelektronicznych istotna może być optymalizacja układu zasilania i sterowania.
- Interesującym kierunkiem wydaje się zabudowanie czujnika do pomiaru temperatury w radiatorze wzorcowym rozjazdu i sterowanie ogrzewaniem poprzez uzyskanie oczekiwanej temperatury radiatora w każdych możliwych warunkach atmosferycznych. Zmodyfikowany układ IOR pozwoliłby sterować intensywnością nagrzewania radiatora w zależności od ustawionej częstotliwości, lecz tylko do momentu osiągnięcia zadanej temperatury na radiatorze. Zatem sterowanie układu IOR byłoby za pomocą zmiany częstotliwości oraz za pomocą odczytu temperatury z radiatora wzorcowego. Rozwiązanie takie umożliwiłoby osiągnięcie dodatkowych oszczędności w zakresie zużycia energii elektrycznej. Temperatura radiatora w każdych warunkach pogodowych powinna być dodatnia (około 10 °C), co byłoby wystarczające do roztopienia podającego lub nawiewanego śniegu oraz ewentualnie powstałego wcześniej lodu.

- Można też rozważyć wprowadzenie opcji „pełna moc” w przypadku uruchomienia urządzeń ogrzewania rozjazdów, np. po braku zasilania lub wcześniej wyłączonego ogrzewania rozjazdu w celu roztopienia zalegającego śniegu lub lodu. Po początkowej fazie „pełna moc” i wytopieniu śniegu/lodu układ przechodziłby w stan normalnej pracy. Układ taki posiadałby cechy skutecznego usuwania śniegu lub lodu przy redukcji zużycia energii elektrycznej w trybie normalnym. Obecnie układ IOR powoduje nagrzewanie radiatora bez kontroli w zakresie temperatury na elemencie wykonawczym.

LITERATURA

- [1]. Ir-17: Instrukcja o zapewnieniu sprawności kolei w zimie, Warszawa 2016.
- [2]. Iet-1: Instrukcja eksploatacji i utrzymania urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów, PKP PLK S.A., Warszawa 2014.
- [3]. Szychta E., Szychta L., Luft M., Kiraga K., Application of 3D Simulation Methods to the Process of Induction Heating of Rail Turnouts, 2012, doi: 10.5772/36917, <https://www.researchgate.net/publication/224829688>.
- [4]. Katalog EOR Elektryczne ogrzewanie rozjazdów kolejowych, Biuro projektów kolejowych Katowice, Katowice 1984.
- [5]. Album EOR-1, Elektryczne ogrzewanie rozjazdów kolejowych – instalacje EOR, Biuro projektów kolejowych Katowice, Katowice 1985.
- [6]. Iet-5 Wytyczne projektowania urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów Tom 1. Projektowanie instalacji torowych i przytorowych, dobór grzejników – Warszawa 2015r., wprowadzona Zarządzeniem nr 46/2015 Zarządu PKP PLK S.A. z dnia 27 października 2015r.
- [7]. PN - EN 61000-3-2 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 3-2: Poziomy dopuszczalne - Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika ≤ 16 A).
- [8]. PN-EN 61000-3-12 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 3-12: Dopuszczalne poziomy - Dopuszczalne poziomy harmoniczných prądów powodowanych działaniem odbiorników, które mają być przyłączone do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia z fazowym prądem zasilającym odbiornika > 16 A i ≤ 75 A.
- [9]. Żelazny R., Urządzenia elektrycznego ogrzewania rozjazdów oraz oświetlenia zewnętrznego na terenie PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 296, Elektrotechnika z. 36 nr 2/2017, s. 41-50.
- [10]. Flis M., Metody ogrzewania rozjazdów kolejowych, Poznań University of technology Academic Journals, Electrical Engineering, 2015.
- [11]. Iet-118: Dokument normatywny 01-8/ET/2008, Grzejniki elektrycznego ogrzewania rozjazdów - PKP PLK S.A., Warszawa 2008.
- [12]. Dyduch J., Bednarczyk P., Nowa technologia w ogrzewaniu rozjazdów kolejowych, czasopismo Autobusy 12/2018.
- [13]. Horoszko E., Induction heating of railway switches, Elektrowaerme International, Edition B: Industrielle Elektrowaerme 1978, 36 (B6), pp. b328-b331.
- [14]. Flis M., Analiza efektywności energetycznej elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 2018r.
- [15]. Kiraga K., Szychta E., Andrulonis J.: Wybrane metody ogrzewania rozjazdów kolejowych – artykuł przeglądowy, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2/2010.
- [16]. Eker O. F., Camci F., Guclu A., Yiboga H. et al., Prosty państwowy model prognostyczny dla systemów frekwencji kolejowej, IEEE Transactions on Industrial Electronics 58(5), 1718–1726 (2011), <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2051399>.

- [17]. Iet-119: Dokument normatywny 01-9/ET/2008, Uchwyty grzejników elektrycznego ogrzewania rozjazdów - PKP PLK S.A. Warszawa 2008.
- [18]. Iet-117: Dokument normatywny 01-7/ET/2008 Skrzynia transformatorowa elektrycznego ogrzewania rozjazdów - PKP PLK S.A. Warszawa 2008.
- [19]. Iet-116: Dokument normatywny 01-6/ET/2008, Szafa rozdzielcza elektrycznego ogrzewania rozjazdów - PKP PLK S.A. Warszawa 2008.
- [20]. Żelazny R., Jabłoński P., Praca prototypowego urządzenia indukcyjnego ogrzewania rozjazdów kolejowych przy różnych częstotliwościach roboczych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 97 nr 1/2021, doi:10.15199/48.2021.01.40.
- [21]. Standardy techniczne – szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200 \text{ km/h}$ (dla taboru konwencjonalnego) /250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem).
- [22]. Woo H. G. i Shin D.C., Research on distance and frequency variability of flat-state inductive heat-induced heat, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers* 27(6), 2013, s. 68–74, <https://doi.org/10.5207/jieie.2013.27.6.068>.
- [23]. Flis M., Analiza porównawcza 2D i 3D klasycznego i bezstykowego elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych, *Poznan University of technology Academic Journals, Electrical Engineering* 88, 2016, s. 301-311.
- [24]. Flis M., Wołoszyn M., Energy Efficiency Analysis of Railway Turnout Heating with a Simplified Snow Model Using Classical and Contactless Heating Method, *International Interdisciplinary PhD Workshop, 8th International Interdisciplinary PhD Workshop Conference, The Conference Proceedings, IEEE Xplore Database*, 2018.
- [25]. Flis M., Energy efficiency analysis of railway turnout heating system with a melting snow model heated by classic and contactless heating method, *Archives of Electrical* vol. 68(3), 2019, pp. 511–520, doi 10.24425/ae.2019.129338.
- [26]. Flis M., Contactless turnouts' heating for energy consumption optimization, *Archives of Electrical Engineering* vol. 69(1), 2020, pp. 133–145, doi 10.24425/ae.2020.131763.
- [27]. Wołoszyn M., Jakubiuk K., Flis M., Analysis of resistive and inductive heating of railway turnouts, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92, nr 4/2016, s. 52-55.
- [28]. Lucia O., Maussion P., Dede E. i Burdio J.M., Design of fusion equipment for low power and line conversion for facility overview, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61(5), 2509–2520 (2013), <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2281162>.
- [29]. Patent USA 3648017, 7.03.1972. Device for deicing rails.
- [30]. Brodowski D., Andrulonis J., *Efektywność ogrzewania rozjazdów kolejowych*, CNTK, Warszawa 2000.
- [31]. Miedziński, B., Okraszewski, Z., Szymański, A., & Kristiansen, M. (n.d.). Low frequency inductive heating of a rigid track during track laying. IAS '95, *Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting*, doi:10.1109/ias.1995.530542.
- [32]. Szychta E., Szychta L., and Kiraga K., Analytical Model of a Rail Applied to Induction Heating of Railway Turnouts, W. J. Mikulski (Ed.): *International Conference on Transport Systems Telematics TST 2010: Transport Systems Telematics* pp. 96-106, TST 2010, CCIS 104, pp. 96–106, 2010.

- [33]. Kiraga K., Szychta E., Research of selected electric and magnetic properties of railway rail, Archives of Electrical Engineering vol. 61(3), 2012, pp. 347-357, doi 10.2478/v10171-012-0028-9.
- [34]. Szychta E., Szychta L., Luft M., Pietruszczak D., The results of the rail induction heating by the current inverter with the parallel resonant circuit, Przegląd Elektrotechniczny, r. 92 NR 11/2016.
- [35]. Szychta E., Szychta, L., Selected issues of energy-efficient induction heating of railway rail, Przegląd Elektrotechniczny 2019, R. 95, nr 8, pp. 146—150.
- [36]. Szychta E., Szychta L. Comparative Analysis of Effectiveness of Resistance and Induction Turnout Heating, Energies 2020.
- [37]. Hyeong-Seok Oh, Chan-Bae Park, Seung-Hwan Lee, Tae-Uyung Kim and Hyung-Woo Lee, A study on de-icing for railway turnouts using 250 kHz 200W class induction heating system, 2019 AIP Advances scitation.org/journal/adv.
- [38]. Oh, H., Jeong, G., Park, C.-B., Jo, I.H., Kwon H., Kim, B., Han, P.-W., Lee, H.-W. , A Study on High-Frequency Induction Heating System for Railway Turnout, Proceedings of the 13th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 9-12.07.2019, Tuluza, Francja, pp. 93-96.
- [39]. Oh, H.-S., Park, C.-B., Lee, S.-H., Lee, H.-W., Study on 200W-class heating system of induction heating type to melt snow in railway turnout, Journal of the Korean Society for Railway 2019, 22(10), pp. 762-767 .
- [40]. Jeong, G., Ji, W.Y., Kom, J.Ch., Park, Ch.-B., Lee, J.-B., Lee, J., Lee, H.-W., Study on Characteristic Analysis of Induction Type Heating Device for Anti-icing in Railway Switch, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2020, 69(10), 1555-1560, doi: 10.5370/KIEE.2020.69.10.1555.
- [41]. Jeong, G., Ji, W.-Y., Lee, J.-B., Park Ch.-B., Lee, J., Lee, H.-W. , Study on performance analysis depending on electric heating-type of heating device for anti-icing in railway turnouts, Journal of the Korean Society for Railway 2020, 23(12), pp. 1231-1239, doi: 10.7782/JKSR.2020.23.12.1231.
- [42]. Kim, J.-C., Ji, W.-Y., Park, C.-B., Lee J.-B., Jeong, G., Lee, H.-W., Design considering the impedance of induction heating system for 200W-class railway turnout, Journal of the Korean Society for Railway 2020, 23(11), pp. 1124-1132, doi: 10.7782/JKSR.2020.23.11.1124.
- [43]. Jang D. W. i Jeon T. H., Design of fusion equipment for low power and line conversion for facility overview, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 27(1), 2013, s. 61–67,doi.org/10.5207/jieie.2013.27.1.061.
- [44]. Patent PL/EP 3141657, Urządzenie do ogrzewania rozjazdu kolejowego, 2.05.2018.
- [45]. Żelazny R., Jabłoński P., Szczegielniak T., Operation of the Prototype Device for Induction Heating of Railway Turnouts at Various Operating Frequencies, Energies 2021, 14, 476, doi.org/10.3390/en14020476.

- [46]. Ligmann K., Galla S., Układ indukcyjnego systemu grzewczego o zmniejszonej emisji zaburzeń, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* nr 30, s. 89-91.
- [47]. Ermolenko D., Uferev L., Roschin O. Electrical Supply of Railway Transport Infrastructure Objects at High Frequency. Popovic Z., Manakov A., Breskich V. (eds) VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1115. Springer, Cham, doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_71.
- [48]. PN-EN 50121-2: 2004, Zastosowania kolejowe, Kompatybilność elektromagnetyczna, Część 2: Oddziaływanie systemu kolejowego na otoczenie.
- [49]. Żelazny R. Jakość energii elektrycznej w liniach zasilających odbiorniki PKP PLK S.A., *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* 297, *Elektrotechnika* z. 37 nr 1/2018, s. 37-48.
- [50]. Jabłoński P., Piątek Z., *Podstawy teorii pola elektromagnetycznego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, WNT, Warszawa 2021.
- [51]. Sikora R., *Teoria pola elektromagnetycznego*, WNT, Warszawa 1998.
- [52]. Wiśniewski S., Wiśniewski T.S., *Wymiana ciepła*, WNT, Warszawa 2000.
- [53]. Kmieć A., *Procesy cieplne i aparaty*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [54]. Kącki E., *Równania różniczkowe cząstkowe w elektrotechnice*, WNT, Warszawa 1971.
- [55]. Minkina W. *Pomiary termowizyjne-przyrządy i metody*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
- [56]. Minkina W., Dudzik S. *Infrared Thermography. Errors and uncertainties*, John Willey&Sons, Chichester, 2009.
- [57]. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych zasad funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z 2007 r. Nr 93, poz. 623, z późn. zm.).
- [58]. PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych s. 13.
- [59]. *Opracowanie wymagań na zasilanie energią elektryczną urządzeń sterowania ruchem kolejowym*, Praca CNTK nr 4034/10, Warszawa 2003.
- [60]. PN-IEC 60364: 2006-2009, Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych.
- [61]. Maciążek M., Pasko M., Skutki oddziaływania wyższych harmonicznych na sieć zasilającą oraz wybrane metody ich eliminacji, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, zeszyt 242, 2009, s. 149-161.
- [62]. Hanzelka Z.: Rozważania o jakości energii elektrycznej. cz.IV, *Elektroinstalator* nr 12/2001, s. 10-17
- [63]. Jakubowski R. Techniczne specyfikacje interoperacyjności podsystemu infrastruktura jako podstawa zmian w przepisach PKP, *Problemy Kolejnictwa – Zeszyt* 157, 2012, s. 5-22.
- [64]. Lange A., Pasko M., *Wybrane metody poprawy jakości energii elektrycznej za pomocą układów LC*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.

- [65]. Lange A., Pasko M., Kompensacja mocy biernej i filtracja wyższych harmonicznych za pomocą filtrów biernych LC, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 86 nr 4, 2010, s. 126-129.
- [66]. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997r. z późniejszymi zmianami Prawo energetyczne Dz.U. z 2012r., poz. 1059. Z 2013r., poz. 984 i poz.1238, z 2014r., poz. 457, poz. 490, poz. 900, poz. 942, poz. 11010, poz. 1662 oraz z 2015r. poz. 151, poz. 478 i poz. 942.
- [67]. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (zatwierdzona decyzją Prezesa URE nr DRR-4321-29(5)/2013/MKo4 z dnia 10 września 2013 r.) s. 99-101.
- [68]. Żelazny R. Harmoniczne prądu w liniach i urządzeniach elektrycznych zasilających odbiorców kolejowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* 297, *Elektrotechnika* z. 37 nr 1/2018, s. 25-35.
- [69]. Pasko M., Dębowski K., Symetryzacja układów trójfazowych i wielofazowych zasilanych ze źródeł napięć okresowych odkształconych, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, 2002.
- [70]. Pasko M., Walczak J., Optymalizacja energetyczno-jakościowych właściwości obwodów elektrycznych z przebiegami okresowymi niesinusoidalnymi, *Zeszyty Naukowe Elektryka*, z. 150, 1996.
- [71]. Siergiejczyk M., Wawrzyński W., Paś J., Rosiński A., Eksploatacja systemów telematycznych na rozległym obszarze transportowym z uwzględnieniem oddziaływań o charakterze zakłóceń elektromagnetycznych, *Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 177*, grudzień 2017, s. 21-27.
- [72]. Zawadka Ł., Adamski D., Białoń A., Juliusz Furman, Wpływ pola magnetycznego generowanego przez pojazdy trakcyjne na urządzenia SRK na tle obowiązujących standardów, *Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 168*, wrzesień 2015, s. 63-67.
- [73]. Ustawa o efektywności energetycznej Dz.U. 2020 poz 264 z dnia 09.01.2020r.