

Rozpływ ciepła w rozjeździe kolejowym ogrzewanym grzejnikiem indukcyjnym

Streszczenie. Celem niniejszej pracy jest zbadanie rozprzestrzenienia ciepła w rozjeździe kolejowym ogrzewanym grzejnikiem indukcyjnym. W pracy prezentowane są wyniki symulacji komputerowych dotyczących wykorzystania prototypowego urządzenia indukcyjnego ogrzewania rozjazdów (IOR). Opisano również wyniki pomiarów wykonanych kamerą termowizyjną w warunkach rzeczywistych pracy IOR przy wytapianiu zalegających warstw śniegu.

Abstract The purpose of this paper is to investigate the heat flow in a railroad turnout heated by an induction heater. The paper presents the results of computer simulations for a prototype turnout induction heating device. In addition, the results of measurements made with a thermal imaging camera under actual conditions of induction heater operation while melting the deposited snow layers are described. (*Heat Distribution In A Railroad Turnout Heated By An Induction Heater*).

Słowa kluczowe: efektywność ogrzewania rozjazdów kolejowych, indukcyjne ogrzewanie rozjazdów kolejowych IOR, numeryczna analiza pola temperatury

Keywords: railroad turnout heating efficiency, inductive heating of railroad turnouts, numerical analysis of temperature field

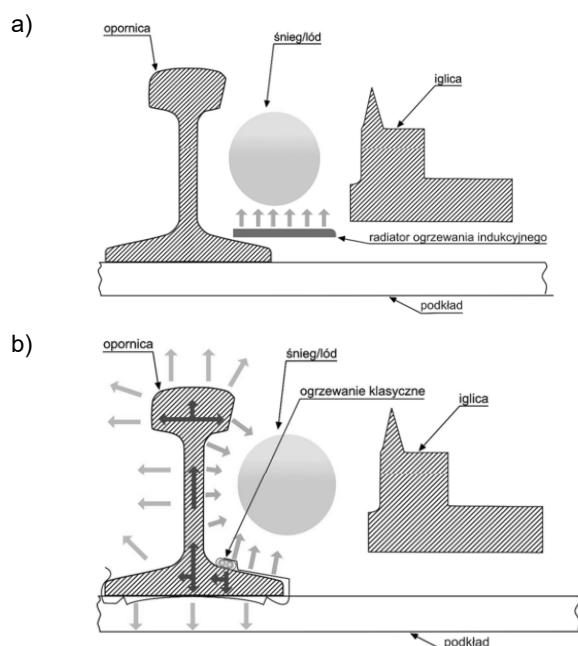
Wprowadzenie

Rozjazdy kolejowe stanowią istotny element infrastruktury kolejowej. Ważne jest utrzymanie ich w stanie pozwalającym na pracę niezależnie od warunków atmosferycznych. W szczególności, w okresach zimowych nie może w nich zalegać śnieg i lód [1]. Aby zapewnić niezawodną pracę mechanizmów zwrotnicowych, niezbędne jest ich ogrzewanie. W celu ogrzewania nierzadkiej przestrzeni roboczej stosuje się wiele rozwiązań, od najprostszego, mechanicznego usuwania zalegającego śniegu (metoda przestarzała), przez m.in. gazowe, olejowe aż po elektryczne oporowe (najczęściej stosowane) [2]. Czynnikiem, które decydują o wyborze typu ogrzewania rozjazdów, są przede wszystkim: dostępność źródeł energii, koszty eksploatacji danego systemu ogrzewania oraz warunki klimatyczne danego rejonu. W Polsce aktualnie najczęściej stosuje się elektryczne ogrzewanie rozjazdów (EOR) z grzejnikiem rezystancyjnym w postaci owalnego pręta przymocowanego do stopki szyny w kluczowych elementach rozjazdów [3]. Metoda ta ma jednak tę wadę, że znaczna ilość ciepła jest rozprzestrzeniana poza obszar roboczy rozjazdu (rys. 1a), co powoduje znaczną energochłonność procesu. Urządzenia EOR dodatkowo nie mają płynnej regulacji mocy grzejników w zależności od panujących warunków atmosferycznych – działają w trybie ON/OFF. Po załączeniu urządzenia grzejniki niezależnie od warunków atmosferycznych działają zawsze z taką samą mocą.

Aby zwiększyć efektywność ogrzewania rozjazdu, zaproponowano zastosowanie indukcyjnego ogrzewania rozjazdów (IOR). Nagrzewanie indukcyjne jest szeroko wykorzystywane w wielu gałęziach przemysłu, w jubilerstwie i w medycynie. Wprowadzenie początki zastosowania nagrzewania indukcyjnego do ogrzewania rozjazdów kolejowych sięgają lat siedemdziesiątych XX wieku, to jednak ówczesne rozwiązania (przy zastosowaniu częstotliwości 50 Hz) powodowały vibracje i wytwarzanie słyszalnej fali akustycznej. Aktualnie, dzięki rozwojowi energoelektroniki, możliwe stało się uzyskiwanie dużych częstotliwości przy stosunkowo niewielkich nakładach finansowych. Na przestrzeni ostatniej dekady pojawiły się nowe prace badawczo-rozwojowe nad zastosowaniem ogrzewania indukcyjnego rozjazdów kolejowych [4-7].

W niniejszej pracy skupiono się na analizie prototypowego urządzenia IOR do ogrzewania przestrzeni

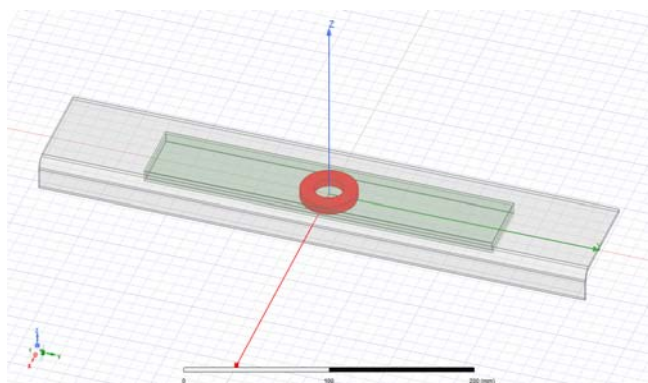
między iglicą a opornicą rozjazdu. Podobnie jak w tradycyjnym oporowym grzejniku istotną metodą jest wykorzystanie ciepła generowanego wskutek przepływu prądu elektrycznego. O ile jednak w grzejniku oporowym prąd generowany jest na skutek przyłożonego napięcia, o tyle w grzejniku indukcyjnym jest efektem indukcji elektromagnetycznej, a same prądy są prądami wirowymi indukowanymi w obudowie grzejnika. Powoduje to, że rozprzestrzenienie ciepła w obydwu typach ogrzewania rozjazdów jest istotnie różne (rys. 1b). System z odizolowanym elementem grzejnym od stopki szyny pozwala na wykorzystanie wytworzonego ciepła w sposób bardziej skuteczny, przekazując je bezpośrednio w miejsce zalegania śniegu lub lodu pomiędzy iglicą a opornicą. Dodatkowo urządzenie pozwala na programowe sterowanie częstotliwością pracy, od której zależy intensywność ogrzewania. W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki badań symulacyjnych oraz pomiarów kamerą termowizyjną prototypowego urządzenia IOR dla wybranych częstotliwości pracy.



Rys 1. Dystrybucja ciepła pomiędzy iglicą a opornicą rozjazdu EOR (a) oraz IOR (b) [2]

Wyniki symulacji numerycznych

Analizowane zagadnienie charakteryzuje się sprzężeniem elektromagnetyczno-termicznym. Straty omowe zostały zaimplementowane z programu Maxwell, należącym do pakietu obliczeniowego Ansys Electronic Desktop 2021 R1 do programu Icepak będącym elementem tego samego pakietu. Wykorzystano solver wiroprądowy Maxwella w celu obliczenia strat cieplnych, które następnie zostały wykorzystane w programie Icepak do symulacji konwekcji naturalnej. Z uwagi na to, że geometria zagadnienia wymaga wykonania obliczeń temperaturowych 3D zdecydowano się na znaczne uproszczenie modelu obliczeniowego: pominięto m.in. przemiany fazowe oraz obecność szyn w pobliżu urządzenia IOR. Cewka urządzenia IOR zamknięta jest w metalowej obudowie, w której indukują się prądy wirowe. Przestrzeń pomiędzy cewką, a obudową wypełniono materiałem PCV. W celu poprawy dystrybucji ciepła do górnej powierzchni obudowy przymocowano radiator. Przyjętą geometrię przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Geometria modelu grzejnika indukcyjnego - widok trymetryczny

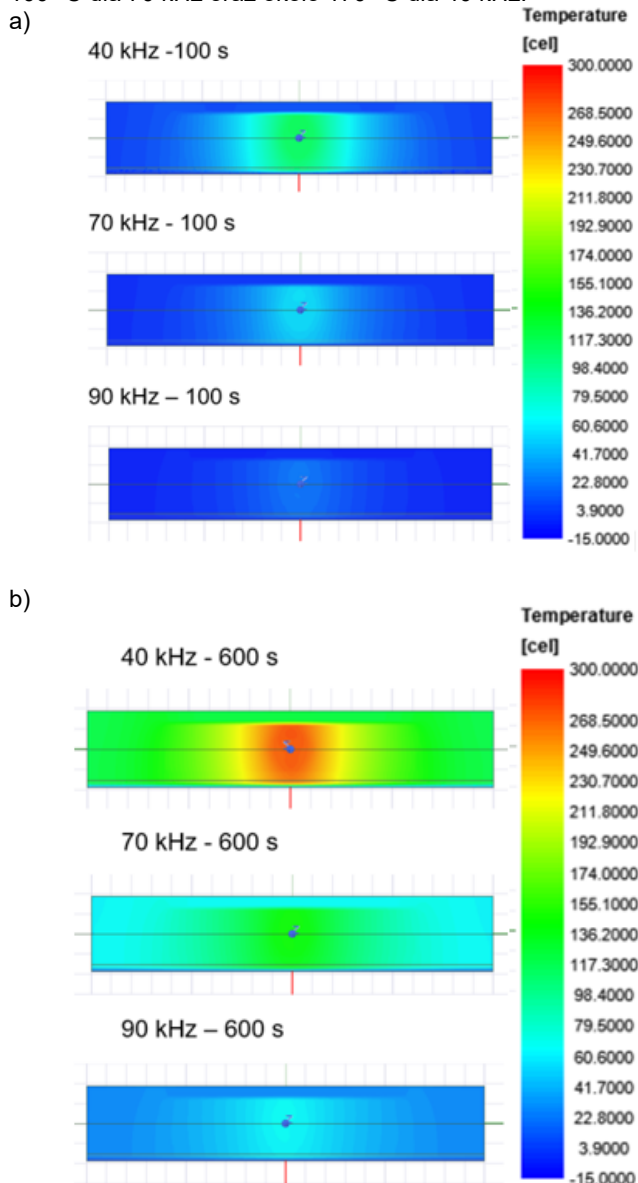
Symulacje wykonano dla częstotliwości pracy 40 kHz, 70 kHz oraz 90 kHz dla temperatury otoczenia -10°C . Prąd cewki był tak dobrany, aby pobierana moc czynna była zgodna z wartościami uzyskanymi z pomiarów (tabela 1). Moc ta maleje wraz ze wzrostem częstotliwości. Jest to wynikiem wzrostu impedancji układu cewka-obudowa – większa częstotliwość powoduje silniejsze tłumienie pola elektromagnetycznego i jego wnikanie do obudowy na mniejszą głębokość. W efekcie zmniejsza się przekrój czynny dla prądów wirowych, rośnie impedancja, maleje prąd pobierany przez cewkę i maleje moc czynna.

Tabela 1. Straty w stalowej obudowie pod wpływem indukowania się prądów wirowych (pomiar)

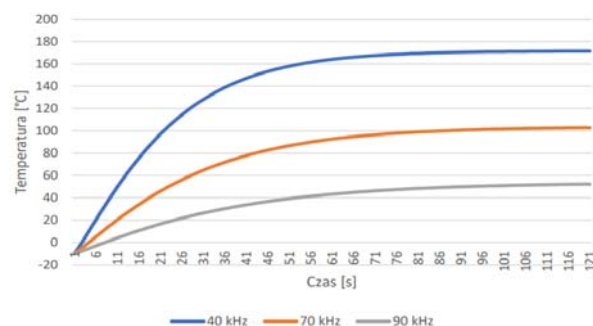
Częstotliwość, KHz	Moc czynna, W
40	180
70	91
90	43

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe rozkłady temperatury na powierzchni radiatora układu IOR dla wybranych czasów (100 i 600 s) od chwili rozpoczęcia nagrzewania dla badanych częstotliwości. Rozkład temperatury radiatora nie jest równomierny – nagrzewa się on znacznie silniej w miejscu, pod którym znajduje się cewka. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi czasowe temperatury uśrednionej na powierzchni radiatora dla badanych częstotliwości pracy. Temperatura ustala się po

około 2 minutach i wynosi około 50°C dla 90 kHz, około 100°C dla 70 kHz oraz około 170°C dla 40 kHz.



Rys. 3. Rozkład temperatury na powierzchni radiatora układu IOR po 100 s (a) oraz 600 s (b) od rozpoczęcia nagrzewania dla częstotliwości 40 kHz, 70 kHz i 90 kHz przy temperaturze początkowej -10°C



Rys. 4. Uśredniona temperatura na powierzchni radiatora dla częstotliwości 40, 70 i 90 kHz [2]

Wyniki pomiarów termowizyjnych

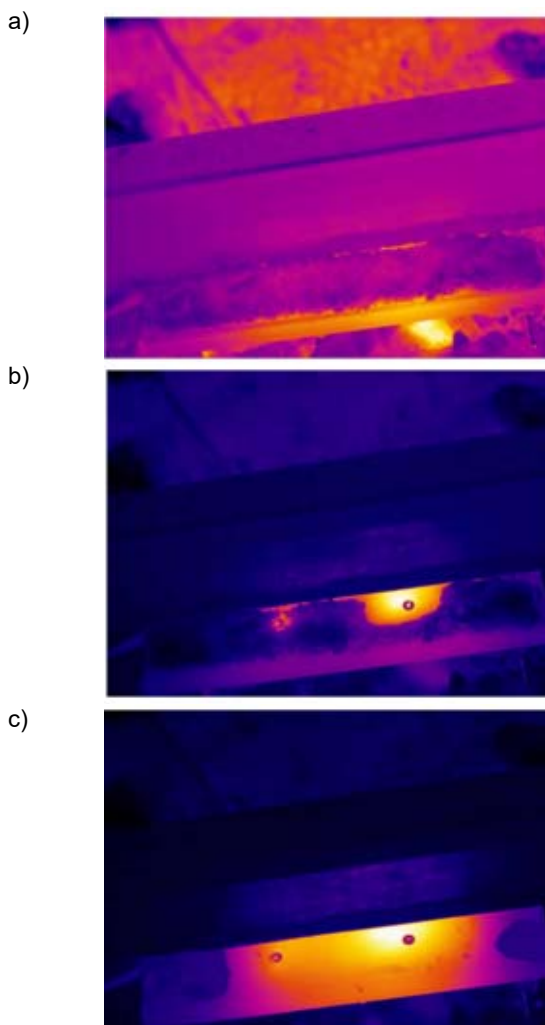
Pomiary termowizyjne wykonano w cieniu przy bezwietrznej pogodzie oraz temperaturze otoczenia -13°C .

Grzejnik IOR był zamontowany w pobliżu szyny. Na stopce szyny oraz na radiatorze zalegała warstwa śniegu (rys. 5).



Rys. 5. Urządzenie IOR w warunkach rzeczywistej pracy [2]

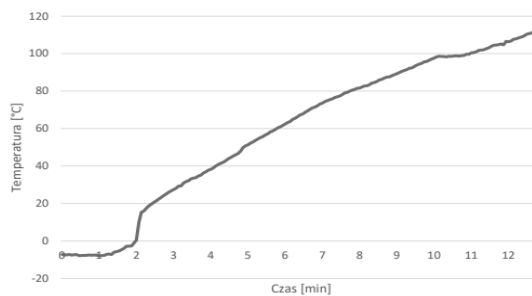
Przebieg czasowy nagrzewania układu IOR w postaci filmu w podczerwieni zarejestrowano za pomocą kamery termowizyjnej FLIR T1020, numer seryjny 72502648 wyposażonej w optykę 28° (ogniskowa $f=36$ mm). Do analizy przebiegów czasowych rozkładu temperatury zastosowano oprogramowanie ThermaCAM Researcher Professional v. 2.10. Przykładowe termogramy otrzymane dla częstotliwości napięcia zasilania cewki 40 kHz przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Termogramy grzejnika IOR w chwili 0 (a), po 4 (b) i po 8 (c) minutach dla częstotliwości układu 40 kHz [2]

Na rysunku 7 przedstawiono przebieg czasowy temperatury w centralnej części radiatora uzyskany z termogramów dla 40 kHz. W trakcie pracy temperatura w rozpatrywanym punkcie radiatora wzrosła do około 112 °C,

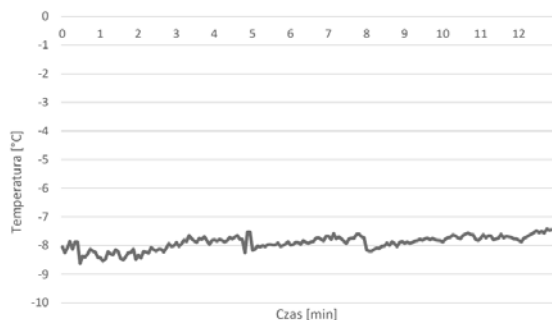
po czym nastąpiło wytopienie śniegu i układ został wyłączony.



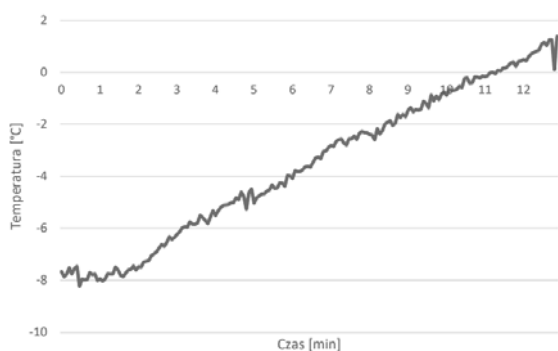
Rys. 7. Temperatura grzejnika dla układu IOR w trakcie badań terenowych wykonywanych kamerą termowizyjną [2]

Przebieg temperatury wskazuje, że rośnie ona wraz z czasem działania urządzenia, ale nie jest to wzrost równomierny. W początkowym okresie około 2 minut temperatura rośnie niewiele, po czym następuje dość gwałtowny wzrost od 0 °C do około 20 °C. Z kolei w okolicach 100 °C wzrost temperatury jest wolniejszy niż wynikałoby to z trendu. Te nierównomierności należy przypisać przemianom fazowym lód-woda-para oraz związanym z nimi zmianom parametrów badanego obiektu w trakcie pomiaru. W warunkach, w których został przeprowadzony pomiar, wśród pięciu wartości wczytywanych do mikrokontrolera kamery termowizyjnej [8,9] tj.: emisyjności obiektu, temperatury otoczenia, temperatury atmosfery, wilgotności względnej atmosfery oraz odległości kamery od obiektu, to właśnie dokładność wyznaczania emisyjności powierzchni badanego obiektu miała największy wpływ na dokładność pomiaru. Ze względu na niewielką odległość kamery (ok. 1 m) wpływ pozostałych czterech wielkości na dokładność pomiaru można pominąć. Na początku pomiarów na badanym obiekcie zalegał zamrożony śnieg. Pod wpływem ogrzewania nastąpiło jego wytopienie, skutkiem czego powierzchnię radiatora pokryła woda. Dalsze nagrzewanie się powierzchni radiatora spowodowało odparowywanie wody i końcowe pomiary były wykonywane dla osuszonego grzejnika IOR. Rejestracja procesu nagrzewania odbywała się w sposób ciągły przy początkowo wczytanych ustawieniach emisyjności nadanego obiektu. Zachodzące przemiany fazowe spowodowały, że 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, a zmiana wartości współczynnika emisyjności badanego materiału wprost proporcjonalnie wpływa na wartość natężenia promieniowania podczerwonego wysyłanego z jego powierzchni, co z kolei wpływa na wartość zmierzonej temperatury. Dlatego bezwzględne wartości temperatury należy uważać za wartości orientacyjne.

Po 12 minutach rejestrowania temperatury radiator osiągnął temperaturę około 112 °C. Nie zaobserwowano natomiast znaczących zmian w temperaturze główki szyny (rys. 8), a wzrost temperatury szynki szyny był nieznaczny (rys. 9). Niewielkie wzrosty temperatury szynki szyny są związane z efektem wpływu promieniowania podczerwonego radiatora IOR odbitego od powierzchni szyny. Na termogramach widoczne są zmiany w rozkładzie temperatury na powierzchni radiatora, natomiast temperatura stopki oraz szynki szyny praktycznie nie ulega zmianie. Brak istotnego wzrostu temperatury główki i szynki szyny jest istotny z punktu widzenia obniżenia strat energii cieplnej.



Rys. 8. Temperatura główki szyny dla układu IOR w trakcie badań terenowych wykonywanych kamerą termowizyjną



Rys. 9. Temperatura szyjki szyny dla układu IOR w trakcie badań terenowych wykonywanych kamerą termowizyjną

Wnioski

Przeprowadzone pomiary i symulacje numeryczne pokazują, że temperatura ustalona radiatora układu IOR może sięgać od kilkudziesięciu do nawet kilkuset stopni Celsjusza. Największa temperatura uzyskiwana jest przy niższych częstotliwościach z uwagi na większy pobór mocy (mniejsza impedancja układu cewki i obudowy grzejnika). Również dynamika zmian temperatury jest największa dla niższych częstotliwości. Daje to możliwość płynnej regulacji intensywności nagrzewania w zależności od warunków atmosferycznych. Wydaje się więc zasadne, aby mniejsze częstotliwości stosować 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.

Zaobserwowano, że temperatura na brzegu radiatora jest wyraźnie niższa niż temperatura w miejscu centralnym. Mimo tego, temperatura radiatora w punktach brzegowych w stanie ustalonym znacznie przekracza 0 °C (np. 20 °C dla 90 kHz przy temperaturze otoczenia -10 °C), i jest to temperatura zapewniająca wytopianie śniegu bądź lodu. Można jednak rozważyć umieszczenie dwóch cewek w jednym urządzeniu, co spowodowałoby większą równomierność w temperaturze radiatora.

Przeprowadzone badania 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.

Autorzy są wdzięczni 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".

Autorzy: dr inż. Robert Żelazny, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., E-mail: robet1980@interia.eu; dr inż. Ewa Łada-Tondyra, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: e.lada-tondyra@pcz.pl; dr hab. inż. Paweł Jabłoński, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: pawel.jablonski@pcz.pl; prof. dr hab. inż. Waldemar Minkina, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: waldemar.minkina@pcz.pl.

LITERATURA

- [1] Kiraga K., Szychta E., Andrulonis J., Wybrane metody ogrzewania rozjazdów kolejowych – artykuł przeglądowy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 2, 247-252
- [2] Żelazny R., Poprawa efektywności energetycznej ogrzewania rozjazdów kolejowych z wykorzystaniem urządzeń indukcyjnych, Rozprawa doktorska, Politechnika Częstochowska, 2021.
- [3] Flis M., Metody ogrzewania rozjazdów kolejowych, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, 83 (2015), 245-252
- [4] Szychta E., Szychta L., Luft M., Kiraga K., Application of 3D Simulation Methods to the Process of Induction Heating of Rail Turnouts, *Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway*, 2012.
- [5] Szychta E., Szychta L., 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*, 96-106
- [6] Kiraga K., Szychta E., Research of selected electric and magnetic properties of railway rail, *Archives of Electrical Engineering*, 61(2012), nr 3, 347-357
- [7] Szychta E., Szychta L. Comparative Analysis of Effectiveness of Resistance and Induction Turnout Heating, *Energies*, 13.20 (2020)
- [8] Minkina W., Pomiary termowizyjne- przyrządy i metody, *Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej*, Częstochowa 2004
- [9] Minkina W., Dudzik S., Infrared Thermography. Errors and uncertainties, *John Willey&Sons, Chichester*, 2009