

Warszawa, 15.09.2021r.

Dr hab. inż. Marcin Wesołowski  
Politechnika Warszawska  
Instytut Elektroenergetyki  
ul. Koszykowa 75  
00-662 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgra inż. Roberta Żelaznego**

pt.: „Poprawa Efektywności Energetycznej Ogrzewania Rozjazdów Kolejowych z Wykorzystaniem Urządzeń Indukcyjnych”  
napisanej pod kierunkiem dra hab. inż. Pawła Jabłońskiego oraz dr inż. Ewy Łady - Tondyry

**1. Podstawa wykonania recenzji**

Recenzję opracowano na podstawie pisma z dnia 30 czerwca 2021 r., dotyczącego opracowania przeze mnie recenzji rozprawy doktorskiej mgra inż. Roberta Żelaznego, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Naukowej nr 41/2020/2021 z dnia 24.06.2021 r.

**2. Tematyka rozprawy oraz wykorzystane narzędzia**

Przedstawiona do recenzji praca dotyczy aspektów związanych z budową i eksploatacją urządzeń umożliwiających usuwanie śniegu i lodu zalegającego na elementach zwrotnic torowisk. Autor zajmował się elektrycznymi urządzeniami pozwalającymi na wytapianie zalegającego śniegu lub lodu przy wykorzystaniu nagrzewania oporowego oraz indukcyjnego. W szczególności w pracy badano zagadnienia energochłonności tego typu urządzeń, co stanowi istotny czynnik pozwalający na zmniejszenie kosztów eksploatacji poprzez wprowadzenie nowych rozwiązań (w pracy Autor sugeruje wykorzystanie systemu indukcyjnego ogrzewania rozjazdów (IOR) oraz hybrydowego (rezystancyjno – indukcyjnego) ogrzewania rozjazdów).

Temat pracy, jak i sformułowany przez mgra inż. Roberta Żelaznego cel i zakres nie budzą wątpliwości, zarówno co praktycznego wykorzystania wyników, jak i w zakresie naukowego charakteru rozprawy. Autor prawidłowo określił trzy priorytetowe aspekty związane z eksploatacją urządzeń do odładzania rozjazdów: bezpieczeństwo, niezawodność oraz minimalna energochłonność, oraz w sposób odpowiedni prezentował istotne informacje, akcentując odniesienia do w/w aspektów. Dlatego też podjętą tematykę oceniam jako aktualną i istotną. Modernizacja urządzeń wykorzystywanych w transporcie szynowym, w celu zwiększenia ich niezawodności oraz zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych pozwoli na wzrost konkurencyjności tego rodzaju transportu, co jest zgodne z obecnymi wymaganiami zmniejszenia emisji gazów powstających w procesie spalania paliw.

**BIURO DZIEKANA**  
Wydział Elektryczny

Wpł. dn. 15.09.2021  
RWE-5/500/2021

Rozprawa mgra inż. Roberta Żelaznego może być podzielona na zasadnicze części związane z modelowaniem, badaniami laboratoryjnymi oraz terenowymi. Zagadnienia modelowania wykonane zostały przy wykorzystaniu programów wykorzystujących metodę elementów skończonych. Prace badawcze wykonano przy wykorzystaniu autorskich stanowisk zbudowanych w oparciu o czujniki temperatury, rejestratory mocy oraz kamerę termowizyjną. Zarówno prace symulacyjne, jak i badania fizycznych obiektów, wykonane zostały przy wykorzystaniu metod nie budzących wątpliwości, co do ich prawidłowości.

### **3. Charakterystyka struktury recenzowanej Rozprawy**

Przedstawiona Rozprawa liczy 137 stron formatu A4 i została przygotowana w formie jednostronnego wydruku. Pracę podzielono na osiem rozdziałów. Wykaz literatury znajduje się na końcu manuskryptu jako rozdział nienumerowany. Przed rozdziałem nr 1 znajdują się podziękowania Autora oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. W głównej części pracy znajduje się łącznie 118 rysunków, zarówno w formie schematów, wykresów oraz fotografii prezentujących wykonywane badania. Powołano się na 73 źródła w postaci norm, książek, monografii, artykułów i źródeł internetowych.

Taki układ pracy nie budzi zastrzeżeń i jest zgodny z klasycznym dla tego rodzaju opracowań.

W rozdziale nr 1 Autor wprowadza czytelnika w zagadnienia stanowiące podstawę Rozprawy: w sposób syntetyczny prezentuje przyczyny blokowania rozjazdów kolejowych (opady śniegu oraz lód) oraz aktualnie wykorzystywane metody i urządzenia służące do wytapiania śniegu i lodu z elementów rozjazdów. W końcowej części Rozdziału Autor podaje tezę, cel i zakres pracy. Informacje podane w rozdziale 1 uznaję za wartościowe i świadczące o dobrym rozeznaniu Autora w zagadnieniach podejmowanych w Rozprawie. Tym niemniej prezentowane rysunki systemów ogrzewania rozjazdów (1.3) – (1.6) nie są najlepszej jakości.

W rozdziale nr 2 dość szczegółowo omówiono wykorzystywane urządzenia służące do ogrzewania rozjazdów. Podano informacje, zarówno o urządzeniach rezystancyjnych, jak i indukcyjnych, rozróżniając również sposób ich montażu na poszczególnych elementach rozjazdu (opornica [szyjka, stopka], siodełko, przestrzeń pomiędzy opornicą a iglicą). Dla każdego przypadku zaprezentowano hipotetyczny rozptyw energii cieplnej, objaśniając, że efekt ten wpływa na sprawność całego procesu. Dodatkowo słusznie zauważono, że zagadnienia sprawności istotnie zależą od charakterystyk eksploatacyjnych, co wymaga ich dostosowania do warunków atmosferycznych. Dlatego też, w Rozdziale zaprezentowano też wybrane, stosunkowo nowe rozwiązania pozwalające na sterowanie grzejnikami zwrotnic przy wykorzystaniu prognoz pogody oraz aktualnych warunków. Zdaniem recenzenta rozdział jest ważny, a podane w nim informacje prawidłowe.

Pewne uwagi od strony redakcyjnej budzi niepotrzebnie duża wielkość „pustych przestrzeni” pozostawionych u dołu stron 26 czy 31.

Rozdział nr 3 dotyczy modelowania numerycznego zagadnień elektromagnetycznych w indukcyjnych urządzeniach do ogrzewania rozjazdów. Celem prac była prezentacja czynników wpływających na parametry elektryczne (głównie impedancję) układów grzejnych. W początkowej części Rozdziału nr 3 zaprezentowano podstawy obwodowego oraz polowego opisu zagadnień pola elektromagnetycznego, ukierunkowane na urządzenia do nagrzewania indukcyjnego. Druga część rozdziału zawiera prezentację modelu numerycznego wykonanego w środowisku FEMM oraz wyniki symulacji. Według mojej opinii rozdział znajduje się w odpowiednim miejscu, a prezentowane analizy mogą być zasadne w odniesieniu do doboru odpowiedniego rozwiązania konstrukcyjnego nagrzewnicy stosowanej w kolejnych rozdziałach Rozprawy.

W rozdziale nr 4 dokonano analiz rozptyłu ciepła w urządzeniu IOR. Zaprezentowano podstawowe zależności umożliwiające obliczanie strumienia ciepła wymienianego na drodze przewodzenia, uzupełnione o warunki brzegowe obejmujące konwekcję i radiację. Sam proces symulacyjny został wykonany w środowisku Ansys Electronic Desktop. Prowadzono obliczenia dynamiczne przy zróżnicowanych częstotliwościach roboczych. Dziwi fakt, iż nie zdecydowano się na obliczenia sprzężone. Dodatkowo, analizując proces wytapiania nie uwzględniono przemian fazowych.

Rozdział nr 5 jest rozbudowany i zawiera informacje o badaniach IOR (układ indukcyjny) oraz EOR (układ klasyczny – rezystancyjny), zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i terenowych. Celem badań było określenie i porównanie parametrów pracy obu rozwiązań. Pod pojęciem „parametrów pracy” rozumie się tu nie tylko określenie energochłonności, lecz również czasów wytapiania oraz jakości pola temperatury pozwalającego na najbardziej racjonalne prowadzenie procesu roztapiania śniegu czy lodu. Dodatkowo, dla nagrzewnicy indukcyjnej prowadzono pomiary przy zróżnicowanych częstotliwościach, co pozwoliło na dobór częstotliwości najbardziej właściwej, z uwagi na minimalizację czasu pracy oraz maksymalizację sprawności.

W rozdziale nr 6, który traktuję jako dodatkowy, zbadano nagrzewnicę indukcyjną oraz rezystancyjną pod kątem spełnienia wymagań w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej. O pomiarze wskaźników obrazujących jakość energii, stwierdzono, że układ rezystancyjny spełnia wymagania PKP PLK, natomiast w układzie indukcyjnym występują problemy w zagwarantowaniu odpowiedniego  $\text{tg}\phi$ . Rozdział taki jest uzupełnieniem informacji z głównego nurtu pracy i świadczy o konieczności rozwoju urządzenia IOR. Potwierdza to szeroką wiedzę mgra Roberta Żelaznego.

Rozdział nr 7 jest swoistym szerokim podsumowaniem pracy. Autor zaprezentował moce zainstalowane w PKP PLK oraz wykazał, że 37% mocy zużywana jest przez urządzenia EOR. Ograniczenie energochłonności tych urządzeń pozwoli zatem, w skali całego kraju, na istotne

oszczędności. Wykazano, że układ indukcyjny, do osiągnięcia podobnego efektu wytapiania śniegu wymaga o około 60% mniej energii niż typowy układ rezystancyjny. Tym niemniej, z uwagi na awaryjność, stosowanie nagrzewnicy indukcyjnej nie zawsze jest możliwe. Autor zaproponował zatem autorskie rozwiązanie, w postaci systemu hybrydowego, pozwalającego na oszczędności energii w granicach 35%.

Ostatni, ósmy rozdział jest typowym podsumowaniem oraz zestawieniem wniosków płynących z zrealizowanych prac.

Podsumowując, układ pracy oceniam jako poprawny i przemyślany. Kolejne rozdziały ułożone są w sposób prawidłowy i stanowią jednolitą całość. Sposób prezentowania kolejnych informacji: od rozważań teoretycznych, poprzez symulacje i badania fizyczne, aż do sformułowania ogólnych wniosków kształtuje odpowiednią dynamikę i oceniany jest przeze mnie bardzo wysoko.

#### **4. Ocena strony formalnej oraz językowej**

Pod względem językowym praca przygotowana została poprawnie, na wysokim poziomie. Autor w sposób prawidłowy formułuje zdania oraz używa języka technicznego. Znaleźć można pewną liczbę typowych „literówek”, sformułowań uznawanych jako potoczne oraz niepoprawnie wykorzystanych definicji:

**4.1.** W tezie na stronie 15 stwierdzono, że " Zastosowanie ... pozwoli na istotne zmniejszenie **energochłonności poboru energii** elektrycznej ...". Moim zdaniem sformułowanie "energochłonność poboru energii" nie jest zbyt udane. W rzeczywistości chodzi o energochłonność urządzeń oraz procesu roztapiania śniegu/łodu.

**4.2.** - str. 21 – akapit 1 „... ciepła uciekającego ...” - to właśnie takie potoczne sformułowanie – nie wykorzystujemy ich w tekstach technicznych;

**4.3.** - str. 21 – czwarty wiersz od dołu: „... przekazywania ciepła wskutek przewodności cieplnej ...” - przewodność cieplna (właściwie przewodność cieplna właściwa) jest parametrem materiałowym. W sformułowaniu chodzi zapewne o przewodzenie ciepła (zjawisko).

**4.4.** - str. 22 – wykorzystano stwierdzenie, że: „Dodatkowym atutem jest możliwość regulacji częstotliwości, co przekłada się na większe możliwości w zakresie regulacji ...”. Czy mogę prosić o wyjaśnienie, co oznaczają „większe możliwości regulacji” – formalnie wielkość regulowaną można zmieniać w zakresie 0 – 100%.

**4.5.** - str. 23 „... moc urządzenia wynosiła mocy 200 W ...”

**4.6** – str. 74 – co oznacza pojęcie „mała konwekcja”?

**4.7.** - str. 97 – stwierdzono, że „... kamera ... rejestrowała temperaturę żelaza.”. Zapewne chodzi o stal.

**4.8** – str. 101 – stwierdzono, że „Wykonano również pomiar wartości pola magnetycznego ...”. Jaka wielkość mierzono? W jakich miejscach dokonano w/w pomiarów? Dodatkowo Autor często używa pojęcia „pomiar pola magnetycznego” – należałoby precyzyjnie powiedzieć jaką wielkość mierzono.

**4.9** – str. 102 – stwierdzono, że „Na rysunku 6.2 ... bezpośrednio w miejscach przylegania, uwidaczniają się miejsca przewodzenia ciepła.” Na rys. 6.2 nie widzę takich miejsc. Termin „miejsce przewodzenia ciepła” jest chyba mało precyzyjny.

**4.10** – str. 110 i inne – co to jest radiator indukcyjny?

Podane powyżej uwagi nie są liczne i nie rzutują znacząco na pozytywną ocenę pracy pod względem językowym.

Od strony formalnej, oceniam, że praca została przygotowana prawidłowo, choć niezbyt starannie. Znajdują się nieliczne błędy w stosowanych oznaczeniach czy też powołania na nieprawidłowe wzory. Te uchybienia są jednak mało istotne i trudno je całkowicie wyeliminować. Negatywnie ocenić muszę jednak czytelność niektórych rysunków, zarówno w formie schematów jak i wykresów. Szczegółowe uwagi w zakresie oceny formalnej zestawiono poniżej:

**4.11.** - Rys. 2.10 – jeżeli (w podpisie) poz. (b) oznacza lód, to chyba wkradł się błąd. Podkłady chyba nie są wykonywane z lodu?

**4.12.** - Str. 29 – dolny akapit jest powtórzeniem akapitu umieszczonego nad rysunkiem 2.15.

**4.13.** - Str. 35 – powołano się na wzór (3.46) zamiast na (3.16);

**4.14.** - Str. 39 – stwierdzono, że „Z kolei M3 i M6 dają podobne wartości rezystancji, ale wyraźnie ta dla M6 jest większa niż ta dla M3.”. To w końcu wartości są podobne, czy dla M6 rezystancja jest wyższa? Patrząc na rysunek 3.3a dla maksymalnej liczby warstw jest dwukrotnie większa ...

**4.15.** - Rys. 3.4 – rysunek jest nieczytelny, a przez to niewartościowy. Na rysunku (a) nie widać jaka jest liczba warstw w kierunku „r” i „h”. Poza tym pożądana byłaby analiza porównawcza.

**4.16.** - Str. 48 - zależność (4.1) -  $q$  nie jest strumieniem cieplnym lecz gęstością strumienia ciepła. Sam strumień jest wielkością skalarną (mocą cieplną).

**4.17.** - Str. 70 - co to jest temperatura konwekcji i w jaki sposób dokonano jej pomiaru?

**4.18.** - Str. 73 – rys. 5.17 – czym różnią się przypadki „Temperatura otoczenia 0 st. C”?

**4.19.** - str. 19 – „Grzejnik opornicy składa się z pręta, w którym umieszczona jest spirala ...” - w jaki sposób można w pręcie umieścić spiralę?

Pomimo pewnej liczby uchybień, poziom przygotowania pracy oceniam jako zadowalający. Większość z wyszczególnionych w recenzji błędów nie wpływa na jakość

prezentowanych rozważań i prawdopodobnie powstała na etapie ostatecznego formatowania tekstu przed wydrukiem.

## **5. Merytoryczna ocena pracy**

Przedstawiona do recenzji praca mgra inż. Roberta Żelaznego ma charakter aplikacyjny. Autor słusznie założył, że zastosowanie nowych rozwiązań w zakresie ogrzewania rozjazdów kolejowych w celu utrzymania ich sprawności w warunkach zimowych, może przynieść wymierne efekty w postaci ograniczenia kosztów związanych z poborem energii podczas wytapiania śniegu i lodu. Zagadnienie to jest w ostatnich latach podejmowane przez zespoły badawcze w wielu ośrodkach, co świadczy o aktualności podjętego tematu. Warto podkreślić, że temat nie został całkowicie rozwiązany, a proponowane przez Autora rozwiązanie w postaci układu hybrydowego (indukcyjno – rezystancyjnego) jest kompletne i charakteryzować się powinno korzystnymi wskaźnikami ekonomiczno – eksploatacyjnymi. Biorąc pod uwagę dodatkowe aspekty związane z bezpieczeństwem w transporcie szynowym, opracowanie niezawodnych rozwiązań pozwalających na szybkie wytapianie śniegu i lodu stanowi o wadze podjętego zadania. Dlatego też tematykę rozprawy oceniam jako aktualną i wartościową.

Zgodnie z tezą Rozprawy (Zastosowanie hybrydowego (IOR + EOR) układu ogrzewania rozjazdów pozwoli na ograniczenie energochłonności w porównaniu z obecnie stosowanymi EOR) oraz zakresem pracy, wyodrębnić można cztery zasadnicze części:

- analizę literaturową;
- modelowanie i symulację procesu nagrzewania indukcyjnego;
- badania laboratoryjne i terenowe urządzeń EOR i IOR;
- analizę efektywności energetycznej.

W początkowych rozdziałach rozprawy Autor dokonał przeglądu aktualnie wykorzystywanych (w PKP) układów do ogrzewania rozjazdów oraz możliwych zastosowania innych rozwiązań. Skupił się na opisie urządzeń elektrycznych (grzejnych) wykorzystujących metodę rezystancyjną (rozwiązania klasyczne) oraz indukcyjną (rozwiązania nowe). Moim zdaniem ta część pracy wykonana została na wysokim poziomie. Zarówno wykonany przegląd literatury, jak i mnogość danych Autorskich świadczy o wysokim poziomie wiedzy Doktoranta.

Zagadnienia symulacyjne podzielone zostały na dwie części związane z modelowaniem zjawisk elektromagnetycznych oraz cieplnych. Wykorzystano dwa systemy obliczeniowe (FEMM oraz ANSYS) wykorzystujące metodę elementów skończonych. Postępowanie takie wynikało z chęci określenia wpływu konstrukcji nagrzewnicy indukcyjnej (liczba i ułożenie zwojów wzbudnika, konduktywność, częstotliwość, grubość aktywnej części obudowy) na moce (przy wymuszeniu napięciowym) oraz parametry zastępcze (obliczenia elektromagnetyczne wykonywane w programie

FEMM). W części obliczeń cieplnych dokonano analiz dynamicznych procesu nagrzewania z wykorzystaniem zróżnicowanych mocy (wynikających z częstotliwości pracy układu grzejnego). Takie postępowanie jest zrozumiałe jednak budzi szereg wątpliwości. Wykonano jedynie modele liniowe, nie analizując zagadnień sprzężonych (elektromagnetyczno – cieplnych). Argumentacja takiego postępowania, wyrażająca obawę o zbyt długi czas obliczeń oraz wątpliwą jakość wyników opierających się o mało wiarygodne parametry (na przykład dla konwekcji) wydaje się zbyt daleko posunięta. Obecnie analizy takie nie stanowią zbyt dużego wyzwania, choćby z uwagi na fakt, że bardziej zaawansowane programy (jak choćby ANSYS) posiadają rozwinięte algorytmy pozwalające na wygodne prowadzenie obliczeń sprzężonych oraz, choćby, analizę pól przepływowych przy konwekcji. W analizie procesu roztapiania lodu czy śniegu pominięto też przemiany fazowe. Oczywiście przyjęte uproszczenia nie dyskwalifikują otrzymanych wyników oraz wniosków. Mają one jednak obniżoną wartość i mogą być wykorzystywane w praktyce inżynierskiej – nie naukowej. Dlatego też, część pracy związana z obliczeniami oceniana jest jedynie jako akceptowalna.

W części pomiarowej wykorzystano dwa układy: rezystancyjny (w postaci elementu grzejnego przymocowanego do stopki szyny) oraz indukcyjny (umieszczony obok szyny (układ laboratoryjny) oraz w przestrzeni między iglicą a opornicą (badania terenowe)). Wykonano badania energochłonności oraz charakterystyk czasowo – temperaturowych podczas roztapiania lodu (w warunkach laboratoryjnych) oraz śniegu (podczas badań terenowych). Wykorzystana metoda badawcza nie budzi zastrzeżeń i uzyskane wyniki są prawidłowe. Nie jestem jednak pewien, czy wszystkie prezentowane przypadki w sposób należyty odzwierciedlają rzeczywistość. Porównuje się dwa układy o zróżnicowanej konstrukcji. Umieszczenie grzejnika na szynie oraz obok da zupełnie inne charakterystyki, niezależnie, czy stosowane jest nagrzewanie indukcyjne czy rezystancyjne.

Ostatnia część związana z prognozowaniem zużycia energii w warunkach rzeczywistych oceniana jest przeze mnie wysoko. Autor dokonał prawidłowej analizy energochłonności różnych rozwiązań, co pozwoliło, w sposób jednoznaczny, udowodnić tezę. Zaproponował także autorskie rozwiązanie w postaci układu hybrydowego IOR+EOR. Informacje prezentowane w tym rozdziale świadczą o znaczącej wiedzy Doktoranta w zakresie objętym tematyką Rozprawy.

Zestawienie szczegółowych uwag merytorycznych:

**5.1.** - Głębokość wnikania określona wzorem (3.2) (str. 32) nie jest głębokością na jaką pole wnika do obudowy (co stwierdzono w tekście tuż przed zależnością (3.2)).

**5.2.** - Zależność (3.3) jest zbyt mocno uproszczona, co prowadzi do mało precyzyjnych wniosków podanych w ostatnim akapicie na stronie 32. W zależności tej nie uwzględniono żadnych współczynników korekcyjnych wynikających z stosunku grubości "płyty kołowej" do głębokości

wnikania oraz współczynników uwzględniających rozproszenie. Czy założono (3.3), że prąd płynie tylko po obwodzie płyty oraz ma jednakową gęstość na głębokości wnikania ? Są to podstawowe błędy (nie wspominając o przekształceniach) wpływające na wnioski ze strony 32.

**5.3.** - Czy zależność (3.7) (str. 34) jest poprawna?

**5.4.** - Rys. 3.2 (str. 38) - co dzieje się na granicy Cu-Case oraz Case - Radiator (szczególnie w odniesieniu do gęstości prądów)? Czy na linii (powierzchni) granicznej mamy dwie wartości gęstości prądów?

**5.5.** - Str. 39 - ostatni akapit oraz rys. 3.3 i 3.4 - Na podstawie rys. 3.2 oraz przyjętych uproszczeń (str. 34 - cewka stranded) wyjaśnienia wymaga sposób modelowania zwojów wzbudnika - zwłaszcza, że cewki wielowarstwowe stanowią wyzwanie w nagrzewnicach indukcyjnych. Jeżeli zatem wzbudnik modelowany jest jako jednorodny materiał - uproszczenie jest zbyt daleko idące. Efekt ten widoczny jest na rysunku 3.4a (notabene - rysunek nieczytelny - nie widać jaka jest liczba warstw w kierunku  $r$  i  $h$ ). Sam Autor stwierdza (str. 39), że na rezystancję wpływa liczba zwojów a nie sposób ich ułożenia. W rzeczywistości analizowany układ jest bardziej skomplikowany - występują tu zagadnienia, zarówno pól podłużnych, jak i poprzecznych - dlatego sposób ułożenia zwojów względem przewodzącej obudowy wpływa na  $R$  i  $X$  całego układu grzejnego (jak to nazwano w pracy - grzałki indukcyjnej). Ten błędny wniosek (ze str. 39 - „ważna jest raczej wypadkowa liczba zwojów niż sposób ich ułożenia”) może wynikać z przyjętego uproszczenia - pominięcia zjawiska naskórkowości i zbliżenia. Bardzo proszę o wyjaśnienie tej kwestii.

**5.6.** - Str. 42 - tytuł "wpływ grubości obudowy na impedancję cewki". Czy chodzi o impedancję samej cewki czy też całego układu - cewka (wzbudnik) oraz wsad (odbiornik, obudowa)? Ponadto wartość impedancji zależy od stosunku (jak wspomniano) grubości materiału do głębokości wnikania. Jeżeli zatem dokonano wcześniej analizy częstotliwościowej, w jakim celu wykonywać te dodatkowe obliczenia w p. 3.3.4?

**5.7.** - Str. 44 – czy analiza dla materiału ferromagnetycznego wykonana jest w sposób nazbyt uproszczony? Czy stosowanie stałej wartości przenikalności magnetycznej jest dopuszczalne, jeżeli ta wielkość zależy od  $H$ ?

**5.8.** - Str. 45 - Czy w modelu cieplnym procesu roztapiania można pomijać przemiany fazowe?

**5.9.** - Rysunki 4.5 do 4.8 są mało czytelne a wykonane analizy nie do końca zrozumiałe. Jeżeli chodzi o badanie wpływu częstotliwości, dlaczego stosuje się odmienne moce? Oczywiście przy źródle napięciowym lub prądowym moce zmieniają się w funkcji częstotliwości. Jednak czy nie lepiej w ramach obliczeń dobrać odpowiednią częstotliwość gwarantującą największą sprawność całkowitą (elektrotermiczną)? Wtedy można dla tej częstotliwości skonstruować/dobrzeć źródło. Czy w analizowanym przypadku podobne wyniki uzyska się dla tej samej częstotliwości (i różnych mocy)? Przy zastosowanych modelach liniowych różnica pomiędzy temperaturą końcową i



początkową zależy od wartości mocy. Oczywiście, w funkcji częstotliwości odmienny będzie rozkład gęstości mocy. Czy efekt ten uwzględniano podczas analiz?

**5.10.** - Strona 57. Prezentowane są tu rysunki, które pokazują proces nagrzewania radiatora z- oraz bez śniegu. Zaznaczono, że obliczenia przerywano w chwili rozpoczęcia przemiany fazowej. Jak to możliwe, że radiator bez śniegu nagrzewał się wolniej niż z śniegiem? Czy śnieg stanowi jakąś warstwę izolacyjną? Przyjęto przewodność cieplną właściwą śniegu na poziomie  $0,2 \text{ W/(mK)}$ , co nie jest możliwe w temperaturach w okolicy  $273 \text{ K}$ .

**5.11.** - str. 73 – górny akapit – stwierdzono: „czas wytapiania jest znacznie dłuższy z powodu pobierania bardzo dużej energii cieplnej z grzejnika do szyny w celu jej ogrzania, a tym samym niewykorzystanie energii cieplnej w celu wytapiania ...”. Stwierdzenie to może być dość kontrowersyjne. Jeżeli, na przykład, lód przylegałby do szynki szyny bez kontaktu z grzejnikiem, w jaki sposób miałby być wytopiony? Dodatkowo porównuje się dwa odmiennie układy – układ indukcyjny w ogóle nie uwzględnia (podczas badań) występowania lodu na elementach szyny. Czy zatem takie porównanie jest miarodajne?

**5.12.** - Str. 75 - opis do rysunku 5.20 - według mnie nie odpowiada temu, co widzimy na rysunkach 5.14 - 5.16 (bardzo proszę o poprawę, jeżeli źle zinterpretowałem te dane). Po pierwsze opis osi na rys. 5.20 - według mnie nie chodzi o temperaturę [%] a o stosunek temperatur. Po drugie "Duży pik ... wynika z bardzo małych wartości temperatury" - chyba chodzi o temperatury bliskie.

**5.13.** - Str. 77 - podsumowanie rozdziału 5.1 - Szkoda, że nie dokonano podsumowania "w liczbach". Rzeczywiście, zastosowanie układu grzejnego, w którym nie grzejemy szyny jest słuszne. Natomiast nie świadczy o przewadze metody indukcyjnej - zbudowanie i badania (lub symulacja) grzejnika rezystancyjnego o geometrii zbliżonej do indukcyjnego dopiero umożliwiłoby takie stwierdzenie. Sądzę, że energochłonność byłaby zbliżona (o ile nie wyższa) - oczywiście przy odpowiedniej konstrukcji. Dyskusyjna jest też sprawa regulacji mocy poprzez zmianę częstotliwości i sugerowanie, że ta metoda jest lepsza niż układ rezystancyjny, który może być tylko załączany lub wyłączany. Jest to lekka "nadinterpretacja" - przecież możemy precyzyjnie regulować temperaturę grzałki oporowej. Dodatkowo nie omówiono konstrukcji nagrzewnicy indukcyjnej. Pozwoliło by to na potwierdzenie słuszności przyjętych rozwiązań - przede wszystkim związanych z parametrami typu charakter obciążenia. Autor wielokrotnie wspomina, że urządzenie jest obciążeniem rezystancyjno - pojemnościowym. To świadczy o pracy poniżej częstotliwości rezonansowej (jeżeli mówimy o układzie wzbudnik-wsad-kondensator rezonansowy). Sugeruje to rozwiązanie oparte o łączniki tyrystorowe. Jednak prezentowane wyniki mówią o odmiennym sytuacji - moc maleje wraz ze wzrostem częstotliwości (zarówno przy symulacjach jak i badaniach). Czy zatem kondensator rezonansowy został dobrany "w okolicach"  $40 \text{ kHz}$ ? A może w ogóle nie uwzględniano kondensatora?

**5.14.** - Str. 83 – uwaga dotyczy porównania efektów wytapiania śniegu przez IOR oraz układ klasyczny (EOR). Podane wnioski są prawdziwe i w pełni się z nimi zgadzam. Mam jednak pewne wątpliwości odnośnie przygotowania próbek. Z tego co widać, geometria próbek dostosowana jest do geometrii i rozmiarów IOR. Czy prowadzono badania dla przypadków, gdy śnieg zalegałby blisko podłoża i obejmował stopkę i częściowo szyjkę szyny?

**5.15.** - str. 89 - 92, szczególnie opis do rysunku 5.28. Według mnie tłumaczenie szybkiego spadku temperatury grzałki rezystancyjnej odmiennymi wartościami emisyjności śniegu, wody oraz płaszcza grzałki nie jest do końca prawidłowe. Tym bardziej, że dla IOR (rys. 5.46) mamy podobną sytuację, a tego efektu nie widać. Nie widać go też na termogramach (rys. 5.35) (notabene - prezentacja termogramów bez skali pozwala tylko na popatrzenie na nie jak na obrazki - o ile skala była taka sama dla wszystkich termogramów). Bardzo proszę o wyjaśnienie tej kwestii.

Podsumowując, pomimo pewnej liczby zastrzeżeń, praca jest wartościowa. Opracowane przez Autora założenia wykorzystania układu hybrydowego IOR + EOR uważam za poparte dowodami analitycznymi oraz pomiarowymi. Jest to Jego wkład w rozwój dyscypliny.

## **6. Podsumowanie**

Mgr inż. Robert Żelazny wykazał się dostateczną wiedzą w zakresie elektrotechniki, tworzenia autorskich modeli obliczeniowych, planowania i wykonywania eksperymentów fizycznych oraz trafnej interpretacji wyników. Wymienione w recenzji krytyczne uwagi nie mają charakteru negującego wartość Rozprawy oraz, w przypadku uwag merytorycznych, można i należy z nimi polemizować. Przedłożona rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 Ustawy o z dnia 14.03.2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2015 r. poz. 249) (zwanej dalej Ustawą), tj.:

- stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim jest poprawa efektywności energetycznej ogrzewania rozjazdów kolejowych w wykorzystaniem urządzeń indukcyjnych;
- wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika;
- potwierdza umiejętność Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, łącznie z budową stanowisk pomiarowych, planowaniem i realizacją eksperymentów.

Reasumując, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Roberta Żelaznego . spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie. Wnioskuje do Rady Dyscypliny Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki Politechniki Częstochowskiej o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

.....  
