



AGH

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

dr hab. inż. Paweł Madejski, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Systemów Energetycznych
i Urządzeń Ochrony Środowiska
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: pawel.madejski@agh.edu.pl

Kraków, 08.05.2022 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Sylwestra Trzebińskiego
zatytułowanej **“Optymalizacja efektywności energetycznej elektrowni
okrętowej z wykorzystaniem pompy ciepła”**

wykonanej pod opieką promotora kmdr dr hab. inż. Grzegorza Grzeczeki

1. Podstawa opracowania

Recenzja wykonana na zlecenie Koordynatora Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Federacji Akademii Wojskowych, Pana dr hab. inż. Andrzeja Komorka, prof. LAW.

2. Zasadność podjęcia tematu

Praca jest poświęcona problematyce wytwarzania energii w elektrowni okrętowej z wykorzystaniem sprężarkowej pompy ciepła, która wykorzystuje dostępną energię w wodach morskich oraz energię odpadową z układu chłodzenia silnika okrętu.

Od kilkadziesiąt lat, widoczny jest intensywny rozwój technologii bazujących na OZE. Układy energetyczne posiadają coraz wyższe sprawności, niższe koszty wytwarzania i są rozwiązaniami coraz bardziej konkurencyjnymi dla „klasycznych” technologii opartych o paliwa kopalne. Tak dzieje się w przypadku technologii stosowanych w jednostkach stacjonarnych (na lądzie). W przypadku jednostek mobilnych, w tym łodzi okrętowych, możliwość stosowania układów bazujących na OZE jest zagadnieniem względnie nowym. Wynika to z konieczności utrzymania pełnej niezawodności i dyspozycyjności układów energetycznych, co w przypadku stosowania „nieprzewidywalnych” źródeł energii OZE, nie

Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,

tel. +48 12 617 39 59

www.agh.edu.pl

Regon: 000001577 NIP: 6750001923

zawsze może być zapewnione. Obecnie obserwowany jest intensywny rozwój technologii sprężarkowych pomp ciepła, metod ich regulacji i wykorzystania w hybrydowych układach energetycznych gdzie występuje więcej niż jedno źródło energii. Zastosowanie pompy ciepła jest więc zagadnieniem rozpoznawanym w wielu branżach, natomiast wykorzystanie pomp ciepła w okrętowych układach wytwarzania energii nie jest powszechnie stosowane i ciągle wymaga dokładnego opisu oraz opracowania metod oceny i optymalizacji pracy tych układów. W literaturze przedmiotowej są to rozwiązania nowe, złożone i nie w pełni zbadane.

Wyniki pracy zdecydowanie mogą przysłużyć się do poszerzenia wiedzy na temat aplikacji nowoczesnych rozwiązań energetycznych na jednostkach okrętowych, oraz poprawy efektywności ich pracy, co wpłynie również na zmniejszenie energochłonności i obniżenie negatywnych skutków wykorzystywania paliw kopalnych na środowisko. Sprężarkowe pompy ciepła, do swojego poprawnego działania wymagają dostaw energii z dolnego źródła oraz energii elektrycznej. Biorąc pod uwagę możliwości wykorzystania wód morskich jako dolne źródło w pracy pompy ciepła, ciągła dostawa energii do układu jest zapewniona.

Zadanie badawcze podjęte przez Doktoranta wymaga wiedzy z zakresu budowy i eksploatacji jednostek pływających w tym układów energetycznych wykorzystywanych do pokrywania zapotrzebowania na ciepło i wytwarzania energii elektrycznej. Przedstawiony w rozprawie temat jest aktualny. Jest związany z wypełnieniem luki w dotychczasowych pracach badawczych, dlatego wybór poruszanej w rozprawie mgr inż. Sylwestra Trzebińskiego problematyki badawczej uznaje za trafny oraz interesujący z naukowego, a także z aplikacyjnego punktu widzenia.

3. Zakres rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Sylwestra Trzebińskiego posiada 158 stron, 8 rozdziałów, które stanowią główną część pracy, streszczenie, wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń wykorzystywanych w pracy, oraz bibliografię składającą się z 92 pozycji literaturowych.

Na rozdział 1 zatytułowany „Wprowadzenie i geneza problemu badawczego” składa się 10 stron wprowadzenia dla uzasadnienia naukowego problemu przedstawionego w rozprawie, a w rozdziale zawarto 5 rysunków. W rozdziale autor wprowadza zagadnienia związane z opracowaniem pierwszych pomp ciepła oraz ich krótki rys historyczny. Przedstawia opis jednostki pływającej (okręt) oraz wprowadza możliwości wykorzystania

energii niskotemperaturowej wód morskich jako Odnawialne Źródło Energii. Przedstawione rozważania stanowiły inspirację dla przedstawionego tematu rozprawy oraz sformułowanie problemu badawczego i celu pracy przez doktoranta. Problem badawczy został sformułowany następująco:

Czy możliwe jest zastosowanie w układzie jednostki pływającej pompy ciepła mogącej wykorzystywać ciepło niskotemperaturowe wód morskich oraz ciepło odpadowe pochodzące z chłodzenia silników, aby zwiększyć efektywność energetyczną elektrowni okrętowej i zredukować jej wymaganą moc dysponowaną?

Autor stawia sobie za cel naukowy:

Opracowanie modelu matematycznego okrętowej pompy ciepła na potrzeby analizy efektywności energetycznej elektrowni okrętowej oraz jej optymalizacji.

Celem użytecznym jest natomiast:

Poprawa efektywności energetycznej elektrowni okrętowej poprzez zmniejszenie zapotrzebowania energii na cele grzewcze w systemie klimatyzacji okrętowej.

W rozdziale 2 autor dokonał analizy stanu wiedzy w zakresie bilansu energetycznego jednostek pływających. Scharakteryzował elektrownie okrętowe przedstawiając uogólnione struktury okrętowego układu energetycznego. W tym rozdziale omówił i scharakteryzował także ogólne przeznaczenie pomp ciepła, wskazując na sektory gdzie pompy ciepła znajdują obecnie częste zastosowanie. Omówił podstawy teoretyczne obiegu termodynamicznego pompy ciepła wraz metodami oceny efektywności pracy pompy ciepła dla przypadku gdy efektem energetycznym jest pobieranie energii z dolnego źródła (chłodnicza pompa ciepła) oraz oddawanie do górnego źródła (grzejna pompa ciepła). W tym rozdziale autor również odnosi się do dyrektyw i norm, które przedstawiają metody oraz wskaźniki oceny pracy pomp ciepła, takie jak wartość współczynnika efektywności COP, ocena chwilowej efektywności pracy pompy ciepła w warunkach ustalonych $SCOP_{maks}$. W dalszej części rozdziału autor identyfikuje możliwości zastosowania pomp ciepła na jednostce pływającej wraz ze wskazaniem potencjalnych dolnych źródeł dla zasilania obiegu. Ważnym aspektem poruszonym w tym rozdziale jest określenie bilansu energetycznego dla analizowanego układu termodynamicznego w celu oceny energetycznej wraz z możliwościami jej poprawy. W tej samej części doktorant przedstawił podstawy teoretyczne i metody optymalizacji wielokryterialnej.

W tym rozdziale zostały także sformułowane trzy pytania szczegółowe:

1. *Czy modyfikacja struktury systemu energetycznego okrętu po zastosowaniu pompy ciepła zapewni jego dalsze funkcjonowanie na racjonalnym poziomie?*

2. *Czy możliwe jest wykorzystanie wód morskich w okresie zimowym do stosowania jako dolne źródło temperaturowe dla pompy ciepła w procesach grzewczych (a w okresie letnim w procesach wytwarzania chłodu)?*
3. *Czy uzasadnione ekonomicznie jest stosowanie pompy ciepła w systemie energetycznym okrętu?*

Wraz z hipotezą rozprawy:

Możliwe jest zastosowanie pompy ciepła w systemie klimatyzacji okrętowej wykorzystującej energię niskotemperaturową wody morskiej oraz ciepło odpadowe w celu zwiększenia efektywności energetycznej elektrowni okrętowej.

Cały rozdział 2 (51 stron) zawiera 28 rysunków, oraz 1 tabelę.

Rozdział 3 zawiera opis programu badań przyjętego przez autora oraz opis metodyki przeprowadzonych badań własnych. Obiektem badań jest układ energetyczny elektrowni okrętowej kutra raketowego 660M, który został szczegółowo scharakteryzowany. Ocena i charakterystyka układu energetycznego pozwoliła na wskazanie mocy urządzeń grzewczych i chłodniczych w czasie postoju w porcie, jazdy w morzu oraz w warunkach bojowych. Doktorant przeprowadził analizę pracy pompy ciepła dla jednostki pływającej w celu doboru odpowiedniego układu umożliwiającego pokrycie zapotrzebowania na moc cieplną. Pompa ciepła z inwerterem została wybrana jako rozwiązanie pozwalające uzyskać regulację mocy w pełnym zakresie, w zależności od temperatury zewnętrznej. Pod koniec rozdziału przedstawiony i omówiony został model pompy ciepła, który został opracowany w programie Matlab/Simulink wraz z podstawowymi założeniami do jego budowy. Rozdział 3 zawiera 15 rysunków, składa się z 31 stron i 8 tabel.

W rozdziale 4 przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych dla oceny efektywności energetycznej elektrowni okrętowej. Na podstawie zmierzonych wartości natężenia prądu, doktorant scharakteryzował zapotrzebowanie na energię elektryczną kutra raketowego podczas zasilania go ze stacji brzegowej w okresie grzewczym i nie grzewczym. Zaobserwował także ciekawy efekt, że zapotrzebowanie na energię elektryczną przez instalację klimatyzacyjną w sezonie grzewczym jest dwukrotnie wyższe niż poza sezonem. Dalej dyplomant wykorzystał opracowany model do przeprowadzenia symulacji i wyznaczenia COP dla analizowanych wariantów pracy układu, zmiennej wartości temperatury zewnętrznej oraz doboru układu pomp ciepła. Wnioskiem z analiz przedstawionych w rozdziale jest fakt, że największe moce pompy ciepła powinny osiągać podczas postoju w porcie, w czasie w którym nie pracują pozostałe urządzenia i mechanizmy. Rozdział 4 składa się z 27 stron, zawiera 18 rysunków i 13 tabel.

Rozdział 5 zawiera wyniki optymalizacji modelu matematycznego pompy ciepła ze wskazaniem kryteriów optymalizacji takich jak: kryterium efektywności energetycznej wyrażonej poprzez SCOP w trakcie „postoju w porcie”; kryterium efektywności energetycznej wyrażonej poprzez SCOP w trakcie „funkcjonowania w morzu” przy wykorzystaniu wody morskiej; kryterium efektywności energetycznej wyrażonej poprzez SCOP w trakcie „funkcjonowania w morzu” przy wykorzystaniu wody odpadowej; kryterium efektywności energetycznej wyrażonej poprzez SCOP w trakcie „warunków bojowych” przy wykorzystaniu wody morskiej; kryterium efektywności energetycznej wyrażonej poprzez SCOP w trakcie „warunków bojowych” przy wykorzystaniu wody odpadowej; kryterium masy pompy ciepła; kryterium ilości energii cieplnej wytwarzanej przez dodatkową grzałkę elektryczną. Dla opracowanych kryteriów doktorant uzyskał zbliżone, jednak różniące się wartościami, wyniki rozwiązań optymalnych po zastosowaniu różnych metod optymalizacji. W celu wskazania jednej wartości przyjął wartości wag określając poszczególne kryteria. Rozdział 5 składa się z 17 stron, zawiera 9 rysunków i 2 tabele.

Rozdział 6 to analiza ekonomiczna i ekologiczna zastosowania pompy ciepła, której wynikiem było oszacowanie efektu ekonomicznego oraz prognozowanego zwrotu nakładów. Rozdział 6 zawiera 6 stron, 5 rysunków oraz 2 tabele.

Rozdział 7 przedstawia wnioski, na który składają się 2 strony. Główne wnioski dotyczą opracowanego modelu, który umożliwił rozwiązanie postawionego problemu, określenie wartości współczynnika COP w funkcji mocy i temperatury wody morskiej oraz wody odpadowej. Wyniki potwierdziły możliwość poprawy efektywności elektrowni okrętowej poprzez zmniejszenie zapotrzebowania energii na cele grzewcze w systemie klimatyzacji okrętowej.

Rozdział 8 (1 strona) wskazuje kierunki dalszych badań, głównie dalsze prace nad weryfikacją opracowanego modelu poprzez porównanie z wynikami obiektu rzeczywistego oraz optymalizację doboru pompy ciepła z wykorzystaniem zwiększonej liczby kryteriów takich jak stabilność energetyczna dolnego źródła, możliwość odzysku ciepła odpadowego na okręcie z kilku różnych źródeł czy możliwość maksymalizacji redukcji gazów cieplarnianych.

Podsumowując, omówiony powyżej podział rozprawy na poszczególne rozdziały jest właściwy, chronologicznie omawia prowadzone przez kandydata badania. Przedstawiony cel pracy jest zgodny z tematem rozprawy a wymieniony zakres wyczerpuje tematykę przedstawioną w tytule rozprawy.

4. Uwagi krytyczne i redakcyjne

Poniżej przedstawiam uwagi krytyczne:

- w zrealizowanym przeglądzie dotyczącym innowacyjnych układów energetycznych stosowanych na jednostkach pływających w mojej ocenie brak jest wskazania innych nowoczesnych metod bazujących na nisko lub zero-emisyjnych źródłach energii (wykorzystujących OZE lub wodór np. absorpcyjne, adsorpcyjne pompy ciepła, układy wykorzystujące energie słońca, wiatru, fal morskich itp., turbiny gazowe) w celu chociażby porównania możliwości zastosowania ich na okrętach. Dyplomant odniósł się tylko to możliwości poprawy efektywności klasycznych elektrowni okrętowych (kotły, nagrzewnice) poprzez zastosowanie pomp ciepła. Wskazanie innych możliwych wyborów nie umniejszyłoby pracy, a potwierdziło przygotowanie przez doktoranta właściwego rozpoznania aktualnych trendów w rozwoju układów energetycznych bazujących na OZE,
- modele matematyczne pomp ciepła zarówno dla pomp sprężarkowych, absorpcyjnych, adsorpcyjnych istnieją i są rozwijane od jakiegoś czasu. Doktorant w sposób zbyt uproszczony odniósł się do wyboru rodzaju modelu, wyboru środowiska w jakim wykonał model. Dotychczasowe prace z zakresu modelowania procesów energetycznych z wykorzystaniem pomp ciepła pozwalają dokładnie odwzorowywać prace takich układów i istnieją zaawansowane narzędzia do realizacji tych celów jak np. TRNSYS, Epsilon, EES. Należy jednak podkreślić, że zastosowanie w symulacjach opracowanego przez doktoranta modelu pompy ciepła dla jednostek pływających jest tematem bardzo aktualnym i znaczącym wkładem autora,
- w równaniu przedstawiającym bilans energetyczny rozpatrywanego układu (równanie 2.10 na stronie 51) doktorant wybrał zapis dla stanu ustalonego. W modelu opisanym zależnościami (3.16 – 3.17) pojawił się człon akumulacji ciepła związany z czasem (dt). Model powinien zostać jasno sprecyzowany ze wskazaniem, czy obliczenia są realizowane w stanie ustalonym, czy nieustalonym. Podobnie należy postąpić z opracowaniem warunków brzegowych i początkowych w modelu – powinny to być jasno zdefiniowane dane w postaci umożliwiającej rozwiązanie równania/układu równań - proszę zatem doktoranta o doprecyzowanie jakie rodzaju model został zastosowany, opisanie precyzyjnie warunków brzegowych oraz warunków początkowych jakie zostały wykorzystane w symulacji,

- dlaczego w analizie zostały wybrane tylko kombinacje pomp ciepła o takiej samej mocy, czyli 2x60, 2x40 i 2x30. Jakże istnieją przesłanki aby nie spróbować wziąć pod uwagę układów mieszanych np. 1x60 i 1x40, 160 i 1x30 itd.?,
- w tabeli 4.1 (strona 104) doktorant przedstawia COP jako sprawność pompy ciepła równą 4. Zgodnie z ogólnie przyjętymi zasadami, sprawność nie może przekraczać 1, a ta wartość powinna być nazwana współczynnikiem.

Wszystkie wymienione uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na wysoką ocenę przedstawionej rozprawy.

Poniżej uwagi o charakterze redakcyjnym:

- w pracy doktorant w wielu miejscach nie używa kursywy do opisu symboli (są miejsca gdzie kursywa się pojawia, głównie w przypadku stosowania edytora równań),
- w rozprawie można znaleźć kilka skrótów myślowych (co w przypadku prac technicznych i aplikacyjnych jest dosyć powszechne i trudne do uniknięcia, jednak powinno być używane jak najrzadziej). Używanie wyrażenia „woda odpadowa” (np. str. 127) sugeruje, że w układzie jest wykorzystywany czynnik (woda), która będąc odpadem jest wykorzystywana przez pompę ciepłą. Jak podejrzewam, chodzi o ciepło odpadowe w wodzie,
- jakość niektórych rysunków/tabel mogła być lepsza i poprawiłaby czytelność danych jak np. tabela 3.6 i rysunek 3.5,
- na stronie 95 w rozdziale 3.5 doktorant odwołuje się do rozdziału 3.5. „...oraz w rozdziale 3.5 gdzie przedstawiono założenia do budowy modelu matematycznego okrętowej pompy ciepła.”

Pomimo, iż poza powyższymi uwagami natknąłem się jeszcze na kilka literówek, warto nadmienić, że w ocenie recenzenta praca pod kątem redakcyjnym została przygotowana bardzo starannie.

5. Ocena rozprawy i wnioski końcowe

Jako osiągnięcia Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie należy, moim zdaniem, wskazać:

1. Budowę własnego modelu matematycznego okrętowej pompy ciepła, do przeprowadzenia symulacji pracy układu energetycznego okrętu.
2. Przeprowadzenie obliczeń i symulacji pracy dla zbadania efektywności energetycznej elektrowni okrętowej w wykorzystaniem opracowanego modelu.
3. Zrealizowanie obliczeń i prac dla poprawy efektywności układu na podstawie opracowanych kryteriów optymalizacyjnych wraz z analizą ekonomiczną i ekologiczną stosowania pompy ciepła na jednostce pływającej.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny całej rozprawy, a Doktorant zrealizował postawione sobie podstawowe cele, zarówno cel naukowy jak i cele użyteczne. Przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dla założonego celu **opracowania modelu matematycznego okrętowej pompy ciepła na potrzeby analizy efektywności energetycznej elektrowni okrętowej oraz jej optymalizacji.**

Rozprawa doktorska Sylwestra Trzebińskiego pt. *„Optymalizacja efektywności energetycznej elektrowni okrętowej z wykorzystaniem pompy ciepła”* będąca przedmiotem recenzji i oceny, **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną kandydata w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Mechaniczna wraz z umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.** Spełnia w całości warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w Art. 13 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.).

W oparciu o powyższe stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Federacji Akademii Wojskowych o dopuszczenie doktoranta do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

