

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Szymona Grzeziaka pt. „Koncepcja modyfikacji złożonego obiegu parowego w turbinowym układzie napędowym zbiornikowca”

Podstawa prawna oceny: Zlecenie wykonania recenzji podpisane przez Dziekana Wydziału Mechanicznego Akademii Morskiej w Szczecinie z dnia 16. 03. 2022 r.

1. Wprowadzenie

Problematyka poprawy efektywności napędu transportu morskiego, w tym zwiększeniem jego sprawności i zmniejszeniem emisji spalin oraz innych mediów jest ciągle aktualna i istotna. Realizuje się to w oparciu o użycie ciepła odpadowego z silników głównych i też z pomocniczych. Dotyczy to nie tylko statków wyposażonych w silniki spalinowe tłokowe, które są powszechnie stosowane na statkach towarowych. Doktorant podjął próbę opracowania modyfikacji obiegu parowego siłowni statku do przewozu skroplonego gazu LNG. Literatura jak i osobiste doświadczenie zawodowe Doktoranta wskazuje, że siłownie parowe są w dalszym ciągu stosowane na statkach tego typu, szczególnie z uwagi na prosty i bezpieczny sposób wykorzystania par przewożonego skroplonego gazu do spalania w kotłach parowych. Biorąc pod uwagę stosunkowo niską sprawność ogólną siłowni parowej w stosunku do siłowni z tłokowymi silnikami spalinowymi wolnoobrotowymi Doktorant zaproponował sposób na zwiększenie sprawności takiej siłowni poprzez wykorzystanie ciepła skraplania zawartego w części strumienia pary odlotowej z turbiny, do podgrzewania wody zasilającej kocioł z wykorzystaniem inżektora parowego. W urządzeniu tym parą roboczą jest para zaczepowa pobierana z różnych stopni turbiny, zaś para odlotowa jest przez inżektor zasysana zza turbiny NC, sprężana i zmieszane strumienie pary zaczepowej z parą odlotową z turbin, służą jako czynnik grzewczy w regeneracyjnym układzie podgrzewania wody zasilającej kocioł.

2. Omówienie pracy

Praca liczy 157 stron oraz oddzielny załącznik na 108 str.

Praca składa się z części wstępnej oraz zasadniczej związanej z tytułem rozprawy. W części wstępnej zamieszczono wykaz ważniejszych oznaczeń, wstęp, analizę układów napędowych statków LNG, cel i zakres pracy, identyfikację źródeł energii odpadowej w siłowni parowej.

Część zasadnicza pracy zawiera 4 rozdziały merytoryczne i podsumowanie. W bibliografii Autor zamieścił 102 pozycje literaturowe, na które składają się głównie książki monograficzne i artykuły zamieszczone w czasopismach naukowych lub materiałach konferencyjnych. Ponadto bibliografia zawiera 15 odnośników do stron internetowych i 4 pozycje dotyczące dokumentacji technicznoruchowych siłowni statków. Bibliografia dobrana i wykorzystana była prawidłowo. W pracy znajduje się także streszczenie w języku polskim i angielskim oraz wykazy rys. i tabel. Załącznik do rozprawy doktorskiej obejmuje dobór parametrów inżyniera i wyniki badań numerycznych przedstawianego problemu.

Układ pracy jest przejrzysty i logiczny. Część wstępna pracy zaczyna się wykazem ważniejszych oznaczeń. W wykazie tym razi przedstawienie wydajności kotła w [T/h]. Jednostki stosowane w pracy powinny być zgodne z układem SI. Jednostka [T] jest nielegalna i dobrze, że w obliczeniach Doktorant stosuje właściwą jednostkę [kg/h] Gdyby nie to, to należałoby stosować ciepłne równoważniki pracy.

W krótkim wstępie, przedstawiono zagadnienia związane z zastosowaniem siłowni turbinowych parowych na statkach, szczególnie do przewozu LNG. Przeanalizowano różne rozwiązania napędu tego rodzaju statków w aspekcie ich sprawności jak i emisji związków toksycznych ze spalin. Analizowano siłownie parowe, spalinowe tłokowe i turbinowe, kombinowane, z przekładnią elektryczną itp.

W pierwszym zdaniu wstępu Doktorant pisze „Przedmiotem niniejszej rozprawy było poszukiwanie możliwości poprawy sprawności cieplnej turbinowych, parowych układów napędowych, powszechnie stosowanych w systemach energetycznych zbiornikowców do przewozu skroplonego gazu ziemnego.” Natomiast w zdaniu 3. pisze ”Jednak dla zastosowań transportu morskiego obserwować można znaczne zahamowanie wykorzystania turbinowych układów parowych do napędu statku.” Taki lapsus w rozprawie doktorskiej nie powinien mieć miejsca.

Następnie przedstawiono cel pracy. „Celem głównym było rozpoznanie możliwości zwiększenia sprawności cieplnej układu energetycznego zbiornikowca z parowym napędem turbinowym, poprzez odzysk energii odpadowej, z zastosowaniem regeneracyjnego

podgrzewania wody zasilającej”. Wg. mnie cel pracy nie odzwierciedla tego czym Doktorant się zajmował. Zagadnienie podgrzewu regeneracyjnego wody kotłowej w siłowni turbinowej jest dobrze rozpoznane.

Dopiero cel poznawczy, którym była identyfikacja i ocena źródeł energii odpadowej, w tym pary odlotowej w aspekcie jej użytecznego wykorzystania w siłowni zbiornikowca *LNG* oraz cel użyteczny – „opracowanie modelu regeneracyjnego podgrzewacza wykorzystującego inżektory parowe z zastosowaniem ich do wielostopniowego regeneracyjnego układu podgrzewania wody zasilającej kocioł” w pełni odzwierciedla zadania jakie Doktorant zaplanował do wykonania.

W rozdziale 3. Przedstawiono „Identyfikację źródeł energii odpadowej konwencjonalnego układu parowego.” Dokonano oceny jakościowej energii odpadowej spalin kotłowych oraz strat skraplania pary odlotowej. Wskazano na duży potencjał energetyczny strumienia spalin kotłowych ze względu na ich stosunkowo wysoką temperaturę oraz przedstawiono ograniczenia w wykorzystaniu spalin kotłowych do głębokiej utylizacji. wynikających z punktu rosy spalin.

Analiza wykazała wysoki potencjał energetyczny strumienia ciepła skraplania pary odlotowej, który jednak nie może być bezpośrednio wykorzystany w powierzchniowych wymiennikach ciepła ze względu na niską ich temperaturę oraz ciśnienie. Zaproponowano możliwość podwyższenia poziomu energetycznego strumienia pary przepracowanej na drodze mieszania się strumieni pary w urządzeniu inżektorowym zasilanym parą upustową z turbiny. W tabeli 3.5 przedstawiono porównanie wartości strumieni masy czynnika roboczego obliczonych i zmierzonych w różnych płaszczyznach kontrolnych obiegu. Zaskakująca jest wysoka dokładność mierzonych parametrów np. 103353,6 kg/h. Prosiłbym o wyjaśnienie tego zagadnienia tzn. metoda i przyrządy pomiarowe czy algorytm przeliczeniowy.

Rozdział 4. obejmuje „Obliczenia wstępne turbinowego obiegu parowego z zastosowaniem inżektora parowego”. Obliczenia oparto na hipotezie, że zastosowanie inżektora parowego spowoduje zmniejszenie zapotrzebowania na parę upustową, odzyskując tym samym większą ilość ciepła skraplania pary w procesie podgrzewania regeneracyjnego wody kotłowej. Wykonano bilans energetyczny dla układu referencyjnego oraz zmodyfikowanego. Wyznaczono wielkości sprawności obu układów oraz stopień regeneracji układu z zastosowanym inżektorem.

Obliczenia wykazały, że dla każdego dodatniego stopnia eżekcji przy zachowaniu tych samych parametrów obiegu tj. temperatury wody zasilającej kocioł, pary świeżej oraz pary

zaczepowej uzyskuje się poprawę sprawności cieplnej obiegu oraz wzrost mocy turbiny. Jednakże ten wzrost, szczególnie sprawności jest niewielki, wynoszący mniej niż 1%.

Obliczeń dokonano dla zaczepu pary o ciśnieniu 10 barA oraz dla trzech stopni eżekcji $\sigma=0,2$; $\sigma=0,167$; oraz $\sigma=0,143$. Pytanie dlaczego przyjęto akurat takie stopnie eżekcji, a nie np. 0,2; 0,17; 0,14? Na str. 57 napisano, że parę odlotową pobiera się z za turbiny, zaś na str. 59, że ze skraplacza. Skąd ta niekonsekwencja?

Rozdział 5. miał na celu „Dobór parametrów pracy inżektora parowego”. Przeprowadzono to w oparciu o parametry pary upustowej układu energetycznego zbiornikowca LNG o pojemności 138 tyś m³. W siłowni tej w dwukadłubowej turbinie napędu głównego zastosowano trzy upusty pary: wysokiego (19,5 barA), pośredniego (6,6 barA) oraz niskiego ciśnienia (1,5 barA). Dla takich ciśnień upustu pary przeprowadzono obliczenia inżektora. Z obliczeń wynika, że zwiększanie stopnia eżekcji dodatnio wpływa na stopień regeneracji układu ale powoduje obniżenie ciśnienia pary opuszczającej inżektor parowy, co skutkuje obniżeniem możliwej do uzyskania maksymalnej temperatury wody zasilającej kocioł.

Stosowanie pary zaczepowej o wyższym ciśnieniu umożliwi uzyskanie wyższych parametrów stanu pary opuszczającej inżektor parowy, zmniejsza jednak możliwą do uzyskania wartość pracy wewnętrznej turbiny, negatywnie wpływając na sprawność obiegu.

Rozdział 6. obejmował „Badania numeryczne układów z zastosowaniem inżektorów parowych do regeneracyjnego podgrzewania wody zasilającej kocioł parowy”. W celu zapewnienia warunków porównywalności, przeprowadzono obliczenia prostego układu referencyjnego oraz trzech układów regeneracyjnych. Kryterium oceny był stopień regeneracji w odniesieniu do układu podstawowego (bez podgrzewania regeneracyjnego) oraz układu z zastosowaniem tego samego typu podgrzewacza regeneracyjnego, przy zasilaniu z możliwie najniższego upustu pary. Analizie poddano układy z trzema rodzajami wymienników ciepła: powierzchniowe podciśnieniowe, mieszankowe i powierzchniowe nadciśnieniowe. Analizowano również układy wykorzystujące podgrzewcze wody oraz układy z wielostopniowym sprężaniem z wykorzystaniem inżektorów parowych (układy szeregowo i równoległe).

Na podstawie analizy wyników obliczeń wyznaczono zakresy użytecznego wykorzystania inżektorów parowych w układach regeneracyjnego podgrzewania wody. Podciśnieniowe wymienniki ciepła można stosować do temperatury 80°C, którą to uznać należy

za wartość graniczną. Najwyższy przyrost sprawności układu uzyskano dla temperatury podgrzania wody zasilającej 60 °C.

Badania wskazały na konieczność stosowania zbiornika mieszankowego w układzie regeneracyjnego podgrzewania wody z uwagi na głębszą utylizację ciepła w układzie poprzez kierowanie do niego skroplin pary grzewczej z podgrzewaczy powierzchniowych. Zakres temperatur użytecznego wykorzystania zbiornika mieszankowego określono na 80-110 °C.

Ze względu na możliwe do uzyskania ciśnienia pary grzewczej zastosowanie iniektorów parowych dla wymienników nadciśnieniowych jest znacznie ograniczone. Przy zastosowaniu układów jednostopniowego sprężania, wykorzystując dostępne zaczepty pary możliwe jest uzyskanie temperatury podgrzania wody kotłowej do 112 °C, a przy zastosowania sprężania dwustopniowego do 125 °C. Przy zastosowaniu zespołu iniektorowego zasilanego parą 3,0 oraz 10 barA możliwe jest podgrzewanie wody zasilającej kocioł do temperatury 130 °C.

Rozdział 7. przedstawia „Proponowane rozwiązania złożonego turbinowego układu parowego z zastosowaniem iniektorów parowych odzyskujących ciepło skraplania pary wylotowej.” W celu przeanalizowania zastosowania poszczególnych rozwiązań w złożonym układzie regeneracyjnego podgrzewania wody opracowano modele matematyczne oraz obliczono bilanse energetyczne następujących układów:

- Układu referencyjny z trzema wymiennikami ciepła,
- Układy regeneracyjne z trzema wymiennikami ciepła oraz jednym i dwoma niezależnymi iniektorami parowymi,
- Układy regeneracyjne z czterema wymiennikami ciepła oraz trzema iniektorami parowymi (pracujące w układach: 3 niezależne, 1 zespół iniektorowy plus niezależny iniektor pierwszego stopnia, 1 zespół iniektorowy plus niezależny iniektor drugiego stopnia,
- Układy regeneracyjne z pięcioma wymiennikami ciepła oraz czterema iniektorami parowymi (układy z dodatkowym wymiennikiem w części niskociśnieniowej oraz wysokociśnieniowej)

W celu oceny efektywności zastosowanych modyfikacji układu opracowano model układu referencyjnego w oparciu o dostępne eksploatacyjne parametry rzeczywistego turbinowego układu napędowego zbiornikowca LNG.

Jako kryteria oceny efektywności zastosowano: sprawność obiegu, stopień regeneracji układu, przyrost pracy wewnętrznej turbiny napędu głównego, zmianę wartości zapotrzebowania ciepła pary upustowej, strumień ciepła odzyskanego pary odlotowej.

Przeprowadzone badania numeryczne potwierdziły możliwość podwyższenia sprawności realizowanego obiegu poprzez zastosowanie proponowanych rozwiązań.

Jednakże uzyskane wartości poprawy sprawności układu (z 0,373 do 0,376) i stopień regeneracji w stosunku do układu referencyjnego, który nie przekroczył wartości 1% należy uznać za mizerny. Zaznaczyć należy, że te wartości dotyczą najbardziej skomplikowanego układu.

Praca jest zredagowana poprawnie. Zamieszczone rysunki i tabele są na ogół czytelne, opatrzone poprawnymi i wyczerpującymi podpisami.

3. Uwagi krytyczne i zapytania

Rozprawa dotyczy ważnego, szczególnie w obecnych czasach, zagadnienia związanego z poszukiwaniem nowych rozwiązań utylizacji ciepła odpadowego w siłowni okrętowej. Jest to związane z obniżeniem kosztów przewozu ładunków, czyli wzrostem sprawności ogólnej napędu i siłowni jak i zmniejszeniem emisji spalin. Zagadnienie jest o tyle złożone, że dotyczy siłowni coraz rzadziej stosowanych czyli siłowni turbinowych parowych. Pomimo, że w zasadzie „era pary” na statkach towarowych się skończyła, to na statkach do przewozu LNG ten rodzaj siłowni, szczególnie z uwagi na łatwość wykorzystania par przewożonego skroplonego LNG do spalania w kotle, jest stosowany. Niektóre firmy, głównie japońskie udoskonalają ten rodzaj siłowni, głównie w aspekcie podniesienia sprawności poprzez odpowiedni dobór parametrów pary głównej, przegrzewu międzystopniowego i podgrzewu regeneracyjnego wody zasilającej kocioł.

Doktorant podjął się zadania ambitnego, a mianowicie wykorzystania do podgrzewu regeneracyjnego także ciepła zawartego w części pary odlotowej z turbiny niskiego ciśnienia, czyli pary o bardzo niskim poziomie energetycznym ($t=38^{\circ}\text{C}$, $p=0,006$ bar). Wg. Jego założeń możliwym to jest poprzez zastosowanie inżektorów parowych wykorzystujących jako parę roboczą parę zaczepową z turbin, która zasysa parę odlotową, miesza się z nią i po sprężeniu oddaje ciepło w wymiennikach powierzchniowych podciśnieniowych i nadciśnieniowych oraz w wymienniku mieszankowym.

Doktorant przeanalizował w oparciu o złożony eksperyment numeryczny, dla którego dane wejściowe stanowiły dane jednostki rzeczywistej, szereg różnych konfiguracji układów wody zasilającej kocioł i doszedł do wniosku, że takie układy dają stosunkowo niskie efekty.

Niskie efekty zastosowanej metody ujawniły się już w badaniach wstępnych. Gdyby Doktorant wziął pod uwagę „metodykę planowania eksperymentu”, to mógłby w zdecydowany sposób uprościć eksperyment bez szkody dla wyników.

Mam uwagę formalną do nazewnictwa sprawności, które Doktorant używa w tekście rozprawy. Używa różnych nazw tj. sprawność cieplna, sprawność entalpową, sprawność obiegu. Ponadto na str. 52 pisze „sprawność napędowa opisanej siłowni wyniosła 29,2% (odniesiona do mocy na wale napędowym).” To jest nieporozumienie, ponieważ sprawność napędowa nie dotyczy siłowni, a śruby pracującej za kadłubem. To co nazwano sprawnością napędową w analizach porównawczych napędu z silnikami spalinowymi to jest sprawność silnika. Można byłoby nazwać ją jako sprawność siłowni odniesioną tylko do napędu głównego przyjmując, że pozostałe składowe energii (elektryczna i cieplna- „ogólnokrętowa” są stałe). Uważam, że w rozprawie należało przyjąć jedną definicję sprawności i ją konsekwentnie stosować. W pracy zamieszczono kilka skanów wziętych z prospektów, które nie spełniają polskich wymagań, a ponadto są przedstawione niemethodycznie. Np. tab. 3.1 podaje ogólną charakterystykę siłowni. Prędkość obrotowa podawana jest w RPM (ustawa o j. polskim) i to w sposób różny dla różnych urządzeń. W przypadku turbiny głównej 90 RPM jako prędkość obrotowa za przekładnią, dla turbiny zespołu prądotwórczego 8145 RPM (niepodzielne przez 60), a dla silnika spalinowego zespołu prądotwórczego 720 RPM. Nigdzie w pracy nie ma podanej wartości prędkości obrotowej ani turbiny niskiego czy wysokiego ciśnienia, ani przełożenia przekładni, która w takiej siłowni jest urządzeniem newralgicznym, rzutującym na sprawność, którą przyjęto jako 0,98 jak dla przekładni jednostopniowej. Może ktoś powiedzieć, że jest to bez znaczenia, bo w pracy to nie jest wykorzystywane. To po co zamieszczać?

Całość napisana jest na ogół poprawnym językiem. Jednak nierzadko występują błędy ortograficzne, np. str.8 „pod kontem”, str.22 „średnio obrotowe” itp.

4. Ocena pracy

Wymienione uwagi mają w znacznej mierze charakter formalny i nie zmieniają faktu, że Doktorant zaplanował i wykonał złożony eksperyment, którego celem było poszukiwanie

metody wykorzystania ciepła pary odlotowej dla poprawy sprawności siłowni parowej statku do przewozu LNG.

Temat jest aktualny w odniesieniu do tego rodzaju napędu statku, a zakres rozprawy i jej poziom merytoryczny zasługuje na uznanie wobec systematyczności rozważań, ich kompleksowości i rzetelności naukowej opracowania.

Za oryginalny wkład Autora w rozwój siłowni okrętowych można uznać:

- Identyfikację źródeł energii odpadowych w siłowni parowej rzeczywistego statku do przewozu LNG w aspekcie ich utylizacji;
- opracowaniu modelu matematycznego oraz metodyki określania wpływu zastosowania utylizacji ciepła pary odlotowej z turbiny głównego napędu statku z wykorzystaniem inżektorów zasilanych parą zaczepową, na sprawność siłowni;
- określenie wpływu konfiguracji układów utylizacyjnych (w tym układów podgrzewaczy powierzchniowych i mieszankowych oraz inżektorów parowych) dla podgrzewu wody zasilającej kocioł w siłowni parowej.

Tym samym uważam, że Pan mgr inż. Szymon Grzesiak wykazał się umiejętnością postawienia i rozwiązania zadania naukowego i zgodnie z wymogami Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym stawiam wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony.

