

prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda
Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Szymona Grzesiaka,
zatytułowanej: *Koncepcja modyfikacji złożonego obiegu parowego w
turbinowym układzie napędowym zbiornikowca*

1. Zasadność podjęcia tematu

Nacisk na redukcję emisji dwutlenku węgla, jako gazu cieplarnianego będącego produktem procesu spalania paliw kopalnych jest jednym z istotnych czynników stymulujących rozwój technologii energetycznych, także tych związanych z nowymi konstrukcjami układów napędowych statków morskich.

W ostatnich latach mamy do czynienia z dynamicznym rozwojem technologicznym tłokowych silników energetycznych stosowanych zarówno w instalacjach stacjonarnych jak i mobilnych, w rozważanym przypadku związanych z napędami statków. Podstawowym skutkiem jest istotny wzrost sprawności silników tłokowych i uzyskanie w tej kategorii zauważalnej przewagi nad siłowniami z turbinami parowymi, w zakresie mocy od kilku do nawet dziesiątek MW. Szczególnym obszarem konkurencji pomiędzy napędami opartymi o turbinowe siłownie parowe oraz tłokowe silniki spalinowe są statki przeznaczone do transportu gazu ziemnego w postaci skroplonej, gdzie napędy turbinowe miały przewagę mniej więcej do końca pierwszej dekady XXI wieku. Źródłem tej przewagi była możliwość wykorzystania odparowującego w trakcie transportu gazu do spalania w kotle stanowiącym źródło pary dla siłowni turbinowej. Istotnymi zaletami napędów parowych są: ich wysoka niezawodność oraz niski koszt eksploatacji. Utrzymanie siłowni parowych na rynku nowych zamówień w transporcie morskim, w tym transporcie LNG zależne jest w znacznej mierze od poprawy ich sprawności, a w konsekwencji również emisyjności z uwagi na CO₂. Sposobem poprawy sprawności tych siłowni leżącym poza głównym nurtem prowadzonych działań i analiz jest minimalizacja energii odpadowej poprzez odzysk w procesie podgrzewania wody zasilającej.

Autor rozprawy *Koncepcja modyfikacji złożonego obiegu parowego w turbinowym układzie napędowym zbiornikowca*, mgr inż. Szymon Grzesiak, jako cel pracy wybrał rozpoznanie możliwości poprawy sprawności cieplnej układu energetycznego zbiornikowca z parowym napędem turbinowym poprzez odzysk energii odpadowej, z zastosowaniem regeneracyjnego podgrzewu wody zasilającej. Tak postawione zagadnienie stanowi godzien rozważenia, interesujący problem badawczy. Tematyka rozprawy wybrana została, moim zdaniem w pełni trafnie.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Oceniana rozprawa podzielona została na 7 ponumerowanych rozdziałów uzupełnionych o wstęp, wykaz oznaczeń, podsumowanie, bibliografię oraz dwa obszerne załączniki

przygotowane w osobno oprawionym tomie. Praca jest obszerna, podstawowy tom liczy 157 stron, z tomem obejmującym załączniki jest ich łącznie 265. Bibliografia zawiera 122 cytowane pozycje, w tym źródła internetowe oraz dokumentacje techniczno-ruchowe statków. Sześć pozycji literatury stanowią prace współautorskie i autorskie Doktoranta. Jak należy w oparciu o powyższe podkreślić, mgr inż. Szymon Grzesiak dysponuje znaczącym, jak na doktoranta, doświadczeniem publikacyjnym. Czasopisma w których opublikowano Jego prace (*Rynek Energii*, *Archives of Thermodynamics*, *Applied Sciences*) są dobrze punktowane na liście ministerialnej.

W rozdziale pierwszym, zatytułowanym *Stan rozwoju układów napędowych zbiornikowców LNG* Doktorant przedstawił w syntetyczny sposób stan oraz trendy rozwoju technologii w obszarze napędów statków, ze szczególnym uwzględnieniem zbiornikowców LNG. Jako istotna konkluzja padło tu stwierdzenie, że *we współczesnych badaniach praktycznie pomijane są możliwości odzysku ciepła skraplania, stanowiącego największe źródło dyssypacji energii w siłowni parowej*. Konsekwencją powyższego jest sformułowanie problemu badawczego oraz celu pracy przedstawione w rozdziale drugim, a oparte na podsumowaniu wniosków z rozdziału pierwszego. Jako cel główny wskazane zostało *rozpoznanie możliwości zwiększenia sprawności cieplnej układu energetycznego zbiornikowca z parowym napędem turbinowym, poprzez odzysk energii odpadowej, z zastosowaniem regeneracyjnego podgrzewania wody zasilającej*. Wskazany został również cel użytkowy: *opracowanie modelu regeneracyjnego podgrzewacza wykorzystującego inżektory parowe z zastosowaniem ich do wielostopniowego regeneracyjnego układu podgrzewania wody zasilającej kocioł, pracującego według obiegu Clausiusa-Rankinea*. Cel poznawczy rozprawy stanowi *identyfikacja i ocena źródeł energii odpadowej zbiornikowca LNG z konwencjonalnym turbinowym układem napędowym (CST Classical Steam Turbine) oraz możliwość użytecznego wykorzystania ciepła skraplania zawartego w parze odlotowej z turbin parowych układu napędowego statku, jako potencjalnego źródła ciepła odzyskowego*.

Rozdział trzeci *Identyfikacja źródeł energii odpadowej konwencjonalnego układu parowego* obejmuje rozważania dotyczące wybranego obiektu badań: parowego turbinowego układu napędowego zbiornikowca LNG o pojemności 138 000 m³, dla którego Doktorant przeprowadził pomiary w trakcie 18 miesięcy pracy na trzech statkach. Zbudowany został schemat bilansowy obiegu cieplnego siłowni oraz, w oparciu o eksperyment bierny, przygotowany został bilans energetyczny. Na podstawie analizy wyników bilansu dokonana została ocena jakościowa źródeł energii odpadowej. Jako główne pozycje trafnie wskazane zostały straty wynikające ze skraplania pary wylotowej w turbinach oraz straty kominowe.

W rozdziale czwartym, zatytułowanym *Obliczenia wstępne turbinowego obiegu parowego z zastosowaniem inżektora parowego* przeprowadzone zostały obliczenia porównawcze dla instalacji z jednym (mieszankowym) wymiennikiem regeneracyjnym w postaci odgazowycza w dwóch wariantach: z jego zasilaniem bezpośrednio z upustu oraz z zastosowaniem inżektora zasysającego parę wylotową z turbiny, a zasilanego parą upustową. Doktorant, według przedstawionego algorytmu przeprowadził obliczenia wariantowe. Zgodnie z przedstawioną wcześniej hipotezą zastosowanie inżektora parowego poskutkowało obniżeniem poboru pary upustowej i doprowadziło do zmniejszenia strumienia czynnika odprowadzanego do skraplacza, tym samym zmniejszył się strumień ciepła na potrzeby kondensacji pary wylotowej. Autor w podsumowaniu uznał za zasadne rozpoznanie zastosowania inżektorów parowych w bardziej złożonych układach.

Rozdział piąty zatytułowany *Dobór parametrów pracy inżektora parowego* poświęcony został analizom związanym z doбором parametrów pary umożliwiających uzyskanie żądanego ciśnienia pary na wylocie z urządzenia inżektorowego oraz zbioru możliwych do uzyskania parametrów pracy pary opuszczającej inżektory zasilające podgrzewacze regeneracyjne. Jako obiekt rozważań wybrany został parowy układ energetyczny CST zbiornikowca LNG o pojemności 138 tys. m³, wcześniej opisanego w rozprawie. Doktorant przeprowadził szczegółową analizę wchodzących w grę wariantów parametrów po stronie pary zasilającej oraz wylotowej za inżektorami, z uwzględnieniem konfiguracji jednostopniowej oraz dwustopniowej poszczególnych układów inżektorów. Wyniki zostały wykorzystane w kolejnym (szóstym) rozdziale dotyczącym badań numerycznych układów z regeneracji z zastosowaniem inżektorów jako dane wejściowe.

W rozdziałach szóstym i siódmym stanowiących łącznie kluczową część rozprawy przedstawiono szereg rozważanych wariantów obliczeń bilansowych układów siłowni, poczynając od najprostszyc wariantów określonych mianem referencyjnych, poprzez układy jednostopniowe oraz dwustopniowe, z uwzględnieniem różnej konfiguracji wymienników regeneracyjnych zasilanych przez układy inżektorowe. Rozdział szósty stanowi rozpoznanie, drogą badań numerycznych, zastosowania układów regeneracyjnych dla trzech rodzajów wymienników, w tym również z zastosowaniem dwustopniowego sprężania. W rozdziale siódmym przedstawiono szereg wariantów modyfikacji turbinowego układu parowego z zastosowaniem inżektorów. Uwzględniona została różna liczba wymienników regeneracyjnych - od trzech do pięciu oraz różna związanych z poszczególnymi wariantami liczba eżektorów - od jednego do czterech. Dla każdego z rozważanych wariantów przedstawione zostały modele bilansowe, zestawienia parametrów termodynamicznych czynnika roboczego w układach tabelarycznych, uzyskane wyniki dla stopnia eżekcji, sprawności poszczególnych układów oraz odpowiadających im stopni regeneracji. W kolejnych częściach rozdziału dokonano porównań wyników dla rozważanych wariantów, w jego części końcowej przedstawiono podsumowanie dla całości obliczeń. Doktorant wskazał, że w celu uzyskania maksimum sprawności możliwie największa część ciepła przekazywanego do układu regeneracyjnego powinna pochodzić ze źródła o możliwie najniższym poziomie energetycznym. W sposób przejrzysty przedstawiona została pula możliwych do rozważania wariantów wykorzystania eżektorów do zasilania wymienników regeneracyjnych oraz uwzględnione zostały wszystkie istotne ograniczenia wykluczające nieracjonalne kombinacje parametrów. Niektóre z uproszczeń przyjętych do obliczeń nie zostały wprost zasygnalizowane. Do takich należy na przykład pomijanie w analizach pracy pomp, co wiąże się z przyrostem entalpii czynnika roboczego. Doktorant posługiwał się w obliczeniach uproszczonymi modelami termodynamicznymi czynnika roboczego (dla pary oraz wody), co uzasadnia przyjęte podejście obliczeniowe. Należy zauważyć, że w najprostszym układzie referencyjnym, rozpatrywanym w rozdziale 6.2 (rys.6.2 oraz tabela 6.1) ciśnienie przed pompą jest równe 0,05 bar, za pompą 70 bar. Przy temperaturze dolotowej 32°C temperatura końcowa za pompą w procesie izentropowym sprężania będzie tylko nieznacznie (o około 0,2°C) wyższa od wejściowej, różnica temperatury jest praktycznie pomijalna, natomiast przyrost entalpii będącej wynikiem wzrostu ciśnienia na pompie wody zasilającej można oszacować na około 6 kJ/kg. Nie jest to wielkość znaczna w porównaniu z przyrostem entalpii wody w wymiennikach regeneracyjnych, więc nie wpływa w istotny sposób na wzajemne relacje osiągow wariantów pochodnych, nieco (na trzecim miejscu znaczącym) wpływa na obliczane wartości sprawności.

Rozprawę zamyka nie numerowany rozdział *Podsumowanie i wnioski końcowe*. Zawarto w nim szczegółowe podsumowanie wyników pracy oraz wnioski końcowe adresowane osobno

do wszystkich rozdziałów poprzedzających. Zgadzam się z podstawowymi wnioskami. Doktorant zwrócił uwagę, że przyrosty sprawności cieplnej w funkcji stopnia regeneracji rozpatrzonych układów mieszczą się w przedziale 1%, przy równoczesnym zwiększeniu złożoności obiegu. Warto jednak nadmienić, że układy eżektorowe są umiarkowanie materiałowchłonne i wymagają niewielkiej przestrzeni, co w warunkach siłowni ulokowanej na statku może mieć istotne znaczenie. Z tego względu zgadzam się z kolejnym wnioskiem Doktoranta dotyczącym celowości przeprowadzenia analizy ekonomicznej dla rozważanych rozwiązań (jako prac do realizacji w przyszłości).

Kompozycja pracy obejmuje sekwencję następujących po sobie w sposób logiczny części wprowadzających czytelnika systematycznie w poruszaną problematykę, opisanych w sposób czytelny i prowadzących do poprawnie uzasadnionych wniosków. Istotnym walorem jest charakter użyteczny części prac. Autor jest doświadczonym praktykiem, istotną część materiału wsadowego do analiz przygotował w oparciu o przeprowadzony w długim okresie przygotowawczym eksperyment bierny.

Strona redakcyjna rozprawy została oceniona w kolejnym rozdziale niniejszej opinii.

3. Uwagi do pracy, uwagi redakcyjne

Jak zostało wcześniej podkreślone, rozprawa mgr inż. Szymona Grzesiaka jest bardzo obszerna, wymagała też dużego wysiłku włożonego przez Doktoranta, związanego z przeprowadzeniem pomiarów. Redagując tak rozległy tekst bardzo trudno jest uniknąć usterek i pomyłek. Liczba zauważonych przeze mnie w trakcie lektury niedociągnięć o charakterze usterek redakcyjnych jest relatywnie niewielka i z reguły nie stanowi istotnego utrudnienia w lekturze. Charakterystyczne przykłady przedstawione zostały poniżej:

str. 6, skrót „CST” zamiast „CTS”;

str. 7, skrót „TFDF” zamiast „TFDE”;

str. 8, druga linia czwartego akapitu – „kontem” zamiast „kątem”;

str. 14, trzecia linia pierwszego akapitu – powinno być „z silnikiem o zapłonie” zamiast „z silnikiem zapłonie”;

str. 15, czwarta linia drugiego akapitu powinno być „dwoma” zamiast „dwoma”;

str. 18, trzecia linia ostatniego akapitu powinno być „50 t/h” zamiast „50 T/h”;

str. 18 i 19, opis rys. 1.9 nie w pełni odpowiada jego treści, na przykład na rysunku nie są widoczne podgrzewacze w liczbie pięciu, w szczególności brak jest podgrzewaczy wysokiego ciśnienia;

str. 22, druga linia w drugim akapicie, liczba 73 obr/min sugeruje, że nie chodzi o prędkość obrotową wirnika turbiny, może śruby napędowej?;

str. 67, zdanie nad wzorem (4.31), słowa „zmniejszenie zapotrzebowania pary upustowej” należałoby zamienić na „zmniejszenie zapotrzebowania na pobór pary upustowej”

str. 67, pierwsza linia ostatniego akapitu powinna się moim zdaniem zaczynać od słów „Uzyskanie żądanego” zamiast „W celu uzyskania żądanego”, co wynika z kontekstu;

str. 75, akapit pod rysunkiem, w trzeciej linii zamiast „barA” pojawia się „braA”;

str. 113, piąta linia od końca drugiego akapitu, wyrażenie $(\dot{q}_2 + \dot{q}_3) = 16,23$, zabrakło jednostek (kJ) za wartością liczbową.

Szczegółowy wykaz zauważonych usterek tego typu zostanie przekazany Doktorantowi w opiniowanym egzemplarzu rozprawy.

Wzór (4.22) na str. 65, po stronie prawej brak jest jako składnika iloczynu - wielkości m_7 , podobnie we wzorze (4.23) zamiast jedynki należałoby wpisać m_1 , Doktorant przyjął do analiz jednostkową wartość przepływu pary w punktach bilansowych 1, 7 oraz 8 w tabeli 4.3. Takie założenie nie prowadzi do zmiany wyniku, ale przyjęty zapis równań stanowi niepotrzebny skrót myślowy i może być dla czytelnika mylący (nieintuicyjny). Podobne uwagi dotyczą na przykład równań (4.24), (4.25) oraz (4.26). Wzór (7.14) na sprawność rozpatrywanego na stronie 106 układu z zastosowaniem jednego inżektora parowego (CR 3/1) nie zawiera w mianowniku wyrażenia m_1 . Przyczyna jest przypuszczalnie podobna jak w poprzednich przypadkach. Jest to jednak o tyle mylące, że w liczniku m_1 już występuje, poza tym przyjęta postać równania nie prowadzi po stronie prawej do wielkości bezwymiarowej jaką jest sprawność. Wszystkie analizy prowadzone w rozdziale 7 przeprowadzono dla układów o jednostkowym (1 kg/s) przepływie pary świeżej. To dobry pomysł. Tendencja do podkreślenia tego jednostkowego przepływu zaznaczana jest w niektórych innych miejscach rozprawy, na przykład w równaniu (7.38), w równaniu (7.45), (7.53) i w kilku innych. W niektórych miejscach poskutkowało to, jak widać, pominięciem w stosownych wielkości w równaniach.

Tabela 6.1 na str.80 zawiera opis parametrów czynnika roboczego w prostym układzie referencyjnym. Ciśnienie w pkt 5 (za pompą) powinno być równe moim zdaniem 70 bar, a nie 0,05 bar. Parametry w punkcie 5 i 6 na rysunku 6.2 nie sugerują różnicy parametrów (ciśnienia). Przedstawiony pod tabelą wynik obliczeń sprawności tego układu został policzony dla wartości entalpii w punkcie 2 (2300 kJ/kg), a nie w punkcie 3 (2290 kJ/kg). Zamiast 0,35114 powinno, w tym przypadku, być 0,354142. Z drugiej strony nie mam pewności, czy różnica entalpii w rozważanym przypadku powinna wystąpić. Mam prośbę do Doktoranta o przedstawienie poprawnej treści tabeli 6.1, wyjaśnienie jaka jest różnica pomiędzy parametrami w punkcie 2 (za turbiną) i w punkcie 3 (w skraplaczu). Podobnie mam prośbę o skomentowanie treści rysunku 6.2, jakich elementów dotyczą poszczególne zaznaczone na nim punkty.

Pytania do Autora.

Obliczenia termodynamiczne przeprowadzone na potrzeby rozprawy realizowane były przez Doktoranta po części z wykorzystaniem uproszczonego modelu pary wodnej, po części z wykorzystaniem tablic wody oraz wykresu i-s dla pary wodnej. Od dłuższego czasu dostępne są do obliczeń termodynamicznych dla wody i pary wodnej pakiety bibliotek umożliwiających analizy numeryczne. Mam wrażenie, że przeprowadzenie obliczeń z ich wykorzystaniem umożliwiłoby rezygnację z części założeń upraszczających, przyspieszyłoby też niektóre z pracochłonnych procesów obliczeniowych. Mam prośbę o stanowisko Doktoranta w tej sprawie.

Czy rozważania dotyczące ograniczeń związanych z punktem rosy w spalinach przedstawione na stronie 56 rozprawy odnoszą się do skroplonego gazu ziemnego jako paliwa zdecydowanie niskosiarkowego? Kwasowy punkt rosy dla tego paliwa wydaje się znacząco niższy niż wskazane 155°C.

Wobec gwałtownej zmiany sytuacji politycznej można spodziewać się istotnego wzrostu obrotu skroplonym gazem ziemnym (przynajmniej w Europie), a tym samym rozrostem floty przeznaczonej do jego transportu. Czy w wyniku gwałtownego wzrostu cen gazu ziemnego można spodziewać się dalszego odchodzenia od napędu parowego, korzystającego ze strumienia odparowującego LNG?

4. Ostateczna ocena pracy

Do osiągnięć własnych Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie należy, według mojej oceny, zaliczyć:

- opracowanie kompleksowego podejścia do analizy możliwości zastosowania inżekcyjnego podgrzewania wody w układzie siłowni parowej, wypracowanie wieloetapowej procedury;
- przeprowadzenie wielowariantowej analizy obiegu siłowni parowej z układami inżekcyjnego podgrzewania wody, która umożliwiła rozpoznanie możliwości poprawy sprawności cieplnej siłowni. Stanowiło to główny cel rozprawy, odnoszący się do sprawności cieplnej układu energetycznego zbiornikowca wyposażonego w siłownię parową.

W podsumowaniu opinii informuję, że odnoszące się do rozprawy uwagi krytyczne nie mają wpływu na jej ocenę, Doktorant w pełni zrealizował postawione sobie cele. Uważam, że należy podkreślić raz jeszcze znaczącą pracowitość przeprowadzonych badań.

Autor rozprawy, mgr inż. Szymon Grzesiak, wykazał się wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to jednoznacznie z treści pracy.

Na podstawie przedstawionej do recenzji rozprawy stwierdzam, że jej Autor, mgr inż. Szymon Grzesiak wykazał opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, umiejętność formułowania zadania naukowego, znajomość stanu osiągnięć w obszarze wiedzy związanej z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

Będąca przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgr inż. Szymona Grzesiaka **pt.: *Koncepcja modyfikacji złożonego obiegu parowego w turbinowym układzie napędowym zbiornikowca*** spełnia wymogi określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki, także (nowej) w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

