Prof. dr hab. inż. Marek Orkisz, prof. zw. PRz
Katedra Samolotów i Silników Lotniczych
Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza

Rzeszów 06-10-2018

RECENZJA

rozprawy doktorskiej kmdr. por. mgr. inż. Pawła WIRKOWSKIEGO p.t.
„Ocena emisji związków szkodliwych w spalinach silników turbinowych układów napędowych jednostek pływających"
wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Jarosława Markowskiego, prof. PP

Podstawa prawna: Pismo Dziekana Wydziału Mechaniczno-Elektrycznego Akademii Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte z dnia 09-08-2018 r.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Wirkowskiego liczy 154 stron. Zawiera spis treści, streszczenie (w języku polskim i angielskim), wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń, 9 rozdziałów merytorycznych oraz wykaz literatury.

We wstępie pracy Autor uzasadnia potrzebę podjęcia badań dotyczących oceny emisji związków szkodliwych w spalinach wytwarzanych przez silniki turbinowe układów napędowych jednostek pływających. Wskazuje na uwarunkowania prawne ukierunkowane na zapobieganie zanieczyszczeniu akwenów wodnych skłaniające do stosowania przepisów Konwencji MARPOL, które w aspekcie emisji zanieczyszczeń spalin dotyczą tłokowych silników okrętowych. Podjęcie tematu Autor motywuje zwiększającym się wykorzystaniem silników turbinowych w systemach napędowych jednostek pływających oraz brakiem dostępnych prac dotyczących emisji zanieczyszczeń spalin z silników turbinowych eksploatowanych na militarnych jednostkach pływających.

W rozdziale 2 zatytułowanym „Zastosowania turbinowych silników spalinowych do napędu głównego jednostek pływających" Autor przybliża najważniejsze zagadnienia związane z układem napędowym jednostek pływających, wskazuje na istotne cechy funkcjonalne układów oraz przedstawia klasyfikację i charakterystyki podstawowych konstrukcji okrętowych silników turbinowych określając obszar swoich zainteresowań badawczych.

W rozdziale trzecim „Związki szkodliwe spalin, normy i sposoby badań turbinowych silników spalinowych stosowanych w okrętownictwie w aspekcie ochrony środowiska morskiego" Autor przedstawia podstawowe zagadnienia związane ze związkami szkodliwymi spalin emitowanymi przez silniki spalinowe, uwzględniając w szczególności charakterystykę fizyczną i chemiczną związków zawartych w spalinach silników turbinowych. W zakresie tego rozdziału pracy przedstawiono również obowiązujące normy emisji zanieczyszczeń spalin z silników okrętowych, z których wynika, że dotyczą one silników tłokowych i nie uwzględniają silników turbinowych wykorzystywanych w układach napędowych jednostek pływających.

W kolejnym rozdziale zatytułowanym "Cel, teza i zakres pracy" Autor zawarł konkluzję z przeprowadzonych analiz literaturowych dotychczasowych prac związanych z problematyką emisji zanieczyszczeń spalin z napędów jednostek pływających, oraz kierunku rozwoju wytycznych zawartych w obecnych normach związanych z ochroną środowiska morskiego. Autor wnioskuje, że w bliskiej przyszłości należy spodziewać się bieżącej oceny oddziaływania jednostek pływających na środowisko naturalne a taka bieżąca ocena wymaga informacji o chwilowym procesie eksploatacyjnym jednostki i skutkach ekologicznych tego procesu. W związku z powyższym Autor zdefiniował główny cel pracy, za który przyjął ocenę emisji związków szkodliwych zawartych w spalinach turbinowego silnika napędu głównego jednostki pływającej podczas jej eksploatacji. Postawił główną tezę pracy oraz tezy pomocnicze, a także koncepcję etapów prac przewidzianych do realizacji w ramach dążenia do uzyskania odpowiedzi na postawione tezy.

Rozdział 5 „Metodyka realizacji celu pracy" zawiera identyfikację problemu naukowego oraz przedstawia koncepcję prac zmierzających do jego rozwiązania. W ramach pracy Autor przewidział konieczność przeprowadzenia badań wstępnych prowadzonych na stanowiskach laboratoryjnych oraz badania na obiekcie rzeczywistym podczas jego eksploatacji. Autor opisuje wykorzystane metody badań oraz stanowiska i aparaturę użytą do pomiarów. Rozdział ten ma charakter opisowy, wzbogacony licznymi zdjęciami i schematami. W pewnych fragmentach opisy te są zbyt obszerne i powinny być zastąpione np. danymi zamieszczonymi w tabeli. Ponadto, bardzo często opisy te są wzbogacone komentarzami lub dodatkowymi wyjaśnieniami, co w mojej ocenie może się wydawać zbyt obszerne w aspekcie pracy i opisywanych badań.

W rozdziale 6 przedstawiono szczegółowo sposób prowadzonych badań, zaprezentowano uzyskane wyniki i przeprowadzone analizy. Badania zaprezentowane w pracy składały się z dwóch etapów. Pierwszy to badania wstępne przeprowadzone na silnikach turbinowych GTM-120 – mikro-odrzutowy silnik turbinowy oraz GTD-350 - śmigłowcowy silnik turbinowy. Celem badań wstępnych prowadzonych przez Autora było wyznaczenie zależności parametrów ekologicznych spalin od parametrów eksploatacyjnych silnika turbinowego. Uzyskane przez Autora zależności stworzyły możliwość określenia swego rodzaju indywidualnej charakterystyki ekologicznej silnika. Opracowane algorytmy obliczeniowe zweryfikowano w drugiej części badań wstępnych przeprowadzonych na silniku GTD-350. Pozytywny wynik weryfikacji skłonił Autora do wykorzystania opracowanych algorytmów w analizach badań zasadniczych przeprowadzonych na jednostce pływającej podczas jej eksploatacji. Biorąc pod uwagę brak dostępności systemów pomiarowych na okręcie związanych z pomiarem zużycia paliwa, czujnika stężenia tlenu w spalinach, zużycia powietrza i innych przydatnych do określenia parametrów ekologicznych silnika, Autor opracował i zaproponował test eksploatacyjny wykonywany podczas rejsu okrętu. Na podstawie przeprowadzonego testu i uzyskanych podczas jego realizacji wyników rejestrowanych wartości dostępnych parametrów eksploatacyjnych i ekologicznych, Autor przeprowadził analizy i opracował algorytmy, na postawie których zaproponował wprowadzenie współczynnika obciążenia silnika a następnie wyznaczył względem niego zależności funkcyjne parametrów ekologicznych i eksploatacyjnych. Korelacje te stanowią swego rodzaju charakterystykę ekologiczną silnika LM2500 stosowanego w układzie napędowym danej jednostki pływającej.

Uzyskane zależności funkcyjne poszczególnych parametrów wraz z opracowanymi algorytmami pozwoliły Autorowi na uzyskanie procedury umożliwiającej ocenę emisji związków

szkodliwych w spalinach silników turbinowych układów napędowych jednostek pływających podczas rejsu jednostki, którą przedstawiono w rozdziale siódmym.

W rozdziale 8 "Modelowanie emisji związków szkodliwych spalin silnika turbinowego" Autor przedstawił założenia wstępne do opracowania modelu emisji związków szkodliwych spalin silnika turbinowego stosowanego w układzie napędowym jednostki pływającej oraz sam model służący do wyznaczania masy związków szkodliwych zawartych w spalinach wygenerowanych podczas eksploatacji danej jednostki pływającej. Opracowany model poddano weryfikacji na podstawie pomiarów rejestrowanych podczas badań przeprowadzonych w warunkach eksploatacji okrętu. Uzyskane wyniki potwierdziły dużą zgodność wyników modelowania z wynikami pomiarów uzyskanych w warunkach eksploatacji jednostki. Względna różnica dla wszystkich związków nie przekraczała 4% z wyjątkiem masy tlenków azotu dla której różnica względna wynosiła dla silnika LM 2500 1A –12%, a dla silnika LM 2500 1B – 8%. Uzyskane wyniki uważam za zadowalające.

Ostatni rozdział zatytułowany "Zakończenie" zawiera podsumowanie przeprowadzonych prac i uzyskane wnioski, w ramach których Autor odniósł się do przyjętego celu rozprawy i postawionych tez. Rozdział ten kończą sugestie dotyczące kierunków dalszych badań, które Autor zamierza podjąć w najbliższym czasie zmierzających do wdrożenia uzyskanych wyników niniejszej dysertacji.

Po części merytorycznej jest spis cytowanej literatury, który zawiera 129 pozycji, w tym 31 obcojęzycznych. Wykaz źródeł literaturowych podzielony jest na publikacje naukowe, akty prawne, dokumentacje techniczne, materiały informacyjne oraz strony internetowe, na które powoływano się w treści pracy. W skład bibliografii wchodzi: 62 pozycji krajowych i 49 pozycji zagranicznych. Zamieszczono 18 źródeł elektronicznych, spośród których 16 jest zagranicznych. Bibliografia zawiera 2 pozycje autorskie oraz 12 pozycji współautorskich Doktoranta.

Podsumowując należy podkreślić, że konstrukcja pracy, podział treści na rozdziały i podrozdziały jest właściwy, logicznie poprawny i merytorycznie spójny. Zawiera wszystkie niezbędne elementy wymagane w pracach naukowych.

2. Tematyka rozprawy i problem badawczy

Współczesny transport i jego rozwój jest zdeterminowany dążeniem do poprawy sprawności procesu przewozowego na różnych płaszczyznach jego funkcjonowania w określonym środowisku i strukturze sieci transportowej. Niniejszy postulat, aby dążyć do poprawy bilansowania zmiennych uwzględnianych w działalności transportowej jest uzupełniany o coraz to nowe wymagania, których źródłem jest działalność przemysłowa i społeczeństwo. U podstaw tego działania jest uzyskanie optymalnego systemu przemieszczania osób lub ładunków dla zadanych kryteriów optymalizacji. Jednym z wymagań jakie determinują kształt obecnego transportu i jakie będzie miało wpływ na jego przyszłość jest dążenie do ograniczenia ich negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne. Z uwagi na powszechność stosowania silników spalinowych do napędu środków transportu, niezależnie od rodzaju gałęzi transportowej, dostrzeżono ich negatywne oddziaływanie środowiskowe wynikające ze sposobu przetwarzania energii uzyskanej z paliwa na pracę użyteczną w określonych warunkach użytkowania jednostki napędowej w każdym środku transportu. Proces spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku determinuje powstanie określonych produktów reakcji chemicznej, wśród których

są również związki szkodliwe w tym toksyczne. Źródłem ich powstawania jest nie tylko sam proces spalania i zastosowane paliwo, ale również konstrukcja układu napędowego i środka transportu, jego warunki eksploatacji, zmienne środowiskowe oraz pozostałe czynniki (np. antropogeniczne). Niewątpliwie istotną rolę pełni tutaj system transportowy i warunki jego eksploatacji. Współczesne kierunki rozwoju systemów transportowych wymuszają poznanie źródeł powstawania szkodliwych składników spalin i stopnia ich negatywnego oddziaływania, w wyniku czego można podjąć się określenia miarodajnych rozwiązań zmierzających do obniżenia poziomu emisji tychże składników w całym okresie eksploatacji silnika jako środka transportu. Szczególnego znaczenia nabiera w tym zakresie ocena takiego oddziaływania również w transporcie morskim. Niewątpliwą cechą tych dążeń jest chęć tworzenia nowych i udoskonalania już istniejących rozwiązań konstrukcyjnych jednostek pływających, zależnie od ich wymaganych cech i przeznaczenia. Ocena emisji gazowych składników szkodliwych z transportu morskiego w rzeczywistych warunkach ich użytkowania jest niezwykle istotna naukowo i może stanowić bazę do określonych rozwiązań praktycznych w obszarze konstrukcji i eksploatacji spalinowych jednostek napędowych stosowanych na jednostkach pływających o zastosowaniach cywilnych i wojskowych. W przypadku zastosowań wojskowych ocena takiego oddziaływania stanowi nadal nowość i wychodzi naprzeciw współczesnym wymaganiom dla okrętów, których charakterystyka pracy jest nieco inna niż cywilnych jednostek pływających. Takiego zadania podjęto się w opisywanej pracy, w której studia nad rozważaną problematyką stanowią zasadniczą część treści rozprawy doktorskiej. Temat rozprawy należy uznać za innowacyjny i oczekiwany naukowo.

Zajęcie się przez Autora pracy oceną emisji związków szkodliwych spalin z okrętowych turbinowych silników spalinowych uzupełnia wiedzę w zakresie oceny środowiskowej jednostek pływających w warunkach odzwierciedlających ich rzeczywistą charakterystykę eksploatacyjną i wychodzi naprzeciw współczesnym potrzebom naukowym w dziedzinie wiedzy dotyczącej poszukiwania źródeł ograniczenia ich negatywnego oddziaływania, zarówno po stronie konstrukcji jednostki pływającej i silnika spalinowego, jej układu napędowego jak i samego procesu eksploatacji danego okrętu bądź statku w zadanych warunkach środowiskowych.

3. Analiza i ocena merytoryczna rozprawy

Przedmiotem recenzowanej rozprawy jest problematyka naukowa dotycząca oceny emisji gazowych związków szkodliwych w spalinach silnika turbinowego jednostki pływającej. W wyniku studiów teoretycznych i oceny stanu wiedzy oraz praktyki inżynierskiej w obszarze sformułowanego problemu naukowego, Autor rozprawy, dostrzegając luki badawcze w rozważanym obszarze naukowym, sformułował tezę badawczą, w której założył, iż:

Istnieje możliwość oceny emisji związków szkodliwych spalin generowanych przez silniki turbinowe napędu głównego jednostek pływających z wykorzystaniem opracowanych modeli emisyjnych, odnoszących się do warunków eksploatacji jednostek pływających.

Dla tak określonej tezy sformułowano dodatkowe tezy pomocnicze:

– istnieją zależności funkcyjne pomiędzy parametrami ekologicznymi a warunkami eksploatacji jednostki pływającej,

– istnieje możliwość opracowania warunków testu emisyjnego dla turbinowego zespołu napędowego jednostki pływającej,

– istnieją możliwości standaryzacji testu badawczego dla turbinowych silników napędu głównego, który będzie wykorzystywany w ocenie emisji związków szkodliwych spalin jednostki pływającej.

Jako główny cel naukowy pracy Autor określił ocenę emisji związków szkodliwych zawartych w spalinach turbinowego silnika napędu głównego jednostki pływającej podczas jej eksploatacji. Uzyskanie zamierzonego celu pracy zrealizowano w następujących etapach:

– wyznaczenie zależności funkcyjnych parametrów ekologicznych i eksploatacyjnych dla silników turbinowych,

– wyznaczenie emisji składników gazowych spalin podczas eksploatacji silników turbinowych dostępnych okrętów podczas wykonywania zadań szkoleniowych,

– dokonanie analizy emisji spalin w warunkach rzeczywistej eksploatacji okrętu,

– opracowanie modelu emisji związków szkodliwych spalin silnika turbinowego układu napędowego jednostki pływającej.

Na podstawie analizy przedstawionej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

– Autor dokonał trafnego wyboru tematyki swoich badań, a jej zakres spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w dziedzinie nauk technicznych.

– rozprawa nawiązuje do aktualnej wiedzy i praktyki, wnosząc do niej nowe elementy o charakterze naukowym i aplikacyjnym.

– cel pracy, w zakresie przyjętym przez Doktoranta, został osiągnięty, gdyż zrealizowano założone zadania szczegółowe, a prezentowane wyniki są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych studiach i eksperymentach własnych,

– formalny układ pracy jest prawidłowy, a jej metodyczna strona jest opracowana zgodnie z wymogami metodologii nauk technicznych,

– w pracy widoczna jest poprawność analiz naukowo-badawczych i studiów teoretycznych nad rozpatrywanym problemem naukowym.

Powyższe fakty świadczą o osiągnięciu przez Doktoranta kompetencji w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę specjalistyczną i ogólną oraz umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „budowa i eksploatacja maszyn", w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

4. Uwagi krytyczne do pracy

Pomimo zauważalnej dużej staranności wykonanych badań i analiz kilka kwestii zapisanych w pracy ma charakter dyskusyjny i wymaga wyjaśnienia. Są to:

1. W zakresie metodologicznym.
   - Część pierwsza pracy obejmująca rozdziały od 1 do 3 zawiera dużo wiedzy literaturowej. Sądzę, że dla potrzeb dysertacji można byłoby ograniczyć tą część nie zaburzając tym samym proporcji pomiędzy poszczególnymi częściami pracy, które w sposób bardzo poprawny metodologicznie zostały przedstawione na str. 51.
   - Na str. 50 doktorant zaprezentował tezę naukową, która jest źródłem inspiracji do podjętych badań, a którą za Autorem przytoczyłem powyżej. Trudno się z tym stwierdzeniem nie zgodzić. Przypuszczam jednak, że jeżeli w tym miejscu pracy pojawiłaby się

hipoteza, dająca poczucie poszukiwania odpowiedzi na określone pytania wynikające z analizy problemu naukowego zamiast tez pomocniczych, praca bardziej stanowczo podkreślałaby swoją istotność poznawczą i utylitarną.

2. W zakresie merytorycznym.
   - Znaczny stopień trudności badawczej i poznawczej związany jest z badaniami siłowni okrętów wojennych gdyż często ich wielozadaniowość, a tym samym zmienność obciążenia, znacznie przewyższa tą, która występuje np. na statkach morskich i oceanicznych mających zastosowanie cywilne. Ten fakt zauważa i podkreśla Doktorant w pierwszej części pracy (np. drugi akapit na str. 15, czy też drugi akapit na str.23), jednak nie ma on odzwierciedlenia w badaniach Doktoranta. Jak rozumiem wynika to z konieczności dostosowania całej procedury badawczej do aktualnie wykonywanego zadania szkoleniowego przez okręt wojenny, a ono nie przewidywało dynamicznego manewrowania jednostką pływającą.
   - Doktorant często posługuje się nazwami *„silnik turbinowy jedno-, dwu- lub trój-wałowy”* (np. str. 17 akapit drugi, czy też str. 55 akapit drugi)) ale już w innym miejscu (np. str. 23 pierwszy akapit od dołu) występuje nazwa *„turbinowy silnik spalinowy jedno-, dwu, trój-wirnikowy”*. Uważam, że pierwsza nazwa jest rusycyzmem a druga jest poprawną nazwą konstrukcji turbinowego silnika przepływowego. Przed ewentualną publikacją pracy należy powyższe skorygować.
   - Na str. 109 sformułowana jest myśl, z której może wynikać, że proces wewnątrzkomorowy w turbinowych silnikach przepływowych przebiega przy dużych wartościach współczynnika nadmiaru powietrza (u Autora w zakresie od 4,4 do 10,5). To stwierdzenie powinno odnieść się bardziej do sumarycznego współczynnika nadmiaru powietrza występującego w wypływających spalinach po połączeniu się wszystkich strumieni spalin i powietrza towarzyszących pracy silnika przepływowego.
   - Na str. 35 w drugim akapicie mowa jest o wymaganiach jakie powinna spełnić komora spalania współczesnego silnika przepływowego. Wśród wielu wymienionych jest też takie *„duża sprawność spalania (spalanie całkowite i zupełne)”*. Dużą sprawność spalania mieszanki paliwowo – powietrznej uzyskuje się gdy jej skład jest stechiometryczny. Jej spalenie całkowite lub zupełne są całkiem odrębnymi procesami i nie powinna występować tu koniunkcja (logiczna).
   - Na str. np. 6 (w dalszej części tekstu też) występuje pojęcie *„masowe natężenie przepływu... ”*. W obecnej termodynamice i teorii silników przepływowych stosuje się pojęcie *„strumień masy”*. Ta wcześniejsza nazwa traktowana jest jako określenie żargonowe.

5. Podsumowanie

Uważam, że praca *„Ocena emisji związków szkodliwych w spalinach silników turbinowych układów napędowych jednostek pływających”* stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy w zakresie eksploatacji silników turbinowych stosowanych w układach napędowych militarnych jednostek pływających i może się również odnosić do tego rodzaju napędów o zastosowaniu cywilnym. Należy podkreślić dobre przygotowanie merytoryczne i metodologiczne Pana

kmdr. por. mgr. inż. Pawła Wirkowskiego do pracy naukowej oraz dużą wiedzę i znajomość zagadnień w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

Reasumując uważam, że Pan kmdr. por. mgr inż. Paweł Wirkowski spełnił w stopniu wystarczającym wymagania ustawowe[1] i może być dopuszczony do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Marek Orkisz

[1] ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (dz. U. 2017 r. poz. 1789 tekst jednolity z dnia 15 września 2017 r.)