Lublin, 23.02.2021

Dr hab. inż. Jacek Hunicz
Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
Katedra Zrównoważonego Transportu i Źródeł Napędu
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36

RECENZJA

rozprawy doktorskiej kmdr. ppor. mgr. inż. Artura Bogdanowicza pt.
Analiza emisji związków szkodliwych z silników okrętowych napędu głównego w dynamicznych stanach pracy

Podstawa opracowania: pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna dr. hab. inż. Ryszarda Zadrąga z dnia 23 grudnia 2020 roku.

1. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska kmdr. ppor. mgr. inż. Artura Bogdanowicza pt.: „*Analiza emisji związków szkodliwych z silników okrętowych napędu głównego w dynamicznych stanach pracy*" została wydana w formie maszynopisu na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej w 2020 roku. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Tomasz Kniaziewicz.

Praca jest obszerna, została zawarta na 157 stronach maszynopisu. Bibliografia składa się z 83 pozycji naukowych, a także aktów prawnych, materiałów o charakterze informacyjnym i technicznym oraz stron internetowych. Biorąc pod uwagę lata publikacji, do których odwołuje się Autor, tematyka szacowania emisji w portach i ich okolicach jest aktualna.

2. Ocena wyboru tematyki rozprawy

Statki morskie, podobnie jak inne środki transportu znalazły się pod ogromną presją oczekiwań społecznych dotyczących minimalizacji wpływu na środowisko. Oczekiwana te są sformalizowane w postaci norm emisji i procedur badawczych oraz regulacji w zakresie jakości paliw. Ponieważ w obszarach przybrzeżnych występuje największe natężenie ruchu, są one bardziej narażone z powodu emisji spalin. Ponadto na tych obszarach charakter pracy silników

napędowych jest inny niż na pełnym morzu. Mianowicie występują stany nieustalone, znacząco zwiększające emisję. Dlatego też modelowanie emisji w strefach przybrzeżnych musi uwzględniać stany nieustalone pracy zespołów napędowych.

Tytuł rozprawy jest poprawnie sformułowany, choć sugeruje, że w treści rozprawy czytelnik znajdzie ustalenie istoty zjawisk powodujących emisję w stanach dynamicznych. Tymczasem w pracy większy nacisk położony jest na proces badawczy, niż na same wyniki.

Doktorant podjął się zadania wyodrębnienia nieustalonych stanów pracy silnika i oceny emisji związków szkodliwych towarzyszącej tym stanom. W ramach pracy podjęto szereg działań zmierzających do opracowania metodyki pomiaru, a następnie, na podstawie zgromadzonych danych empirycznych, opracowania modelu emisji spalin. Model taki miałby być wykorzystywany do symulowania emisji w rzeczywistych warunkach eksploatacji na podstawie podstawowych parametrów pracy silników.

Temat rozprawy jest aktualny, a rezultaty mogą mieć duże znaczenie praktyczne.

3. Ocena metod badawczych

W ramach badań wykonano testy silnika na hamowni silnikowej w warunkach zmiennej prędkości i obciążenia. Testy te dostarczyły danych identyfikacyjnych w postaci przebiegów czasowych emisji poszczególnych składników spalin. Na tej podstawie obliczono także wskaźniki charakteryzujące dynamikę emisji. Trochę szkoda, że w badaniach nie uwzględniono cząstek stałych. Badania na hamowni silnikowej dostarczyły także informacji o tym, że w analizowanym zakresie pracy sprawność cieplna jest prawie niezmienna. Ta przesłanka pozwoliła na obliczanie chwilowych emisji spalin podczas testów na morzu, gdzie do oceny chwilowego zużycia paliwa wykorzystano pomiary średniego ciśnienia indykowanego. Co prawda na okręcie był większy silnik niż ten na hamowni, lecz z tej samej serii, więc można przypuszczać, że wskaźniki porównawcze są podobne. Z wyników uzyskanych na morzu wyodrębniono stany dynamiczne i określono wskaźniki dynamiki emisji podobne jak podczas testów na hamowni. Przebiegi emisji z dwóch serii badań zostały zasymulowane za pomocą sztucznych sieci neuronowych (SSN). Z pracy to jasno nie wynika, ale wygląda na to, że modele SSN były uczone i testowane za pomocą tych samych zestawów zmiennych. W związku z tym uniwersalność tych modeli stoi pod znakiem zapytania.

Dodatkowo Doktorant opracował model fizykalny okrętu, pozwalający na wyznaczenie parametrów pracy silnika napędowego w dowolnych warunkach pływania. Ten model został uzupełniony o podmodel SSN, który na podstawie parametrów pracy silnika może estymować emisję. Niestety w pracy zaprezentowano tylko model, bez wyników jego działania.

Pomijając ograniczenia wynikające z zakresu dostępnych danych, przyjęty sposób realizacji pracy oraz metody należy uznać za prawidłowe. Brak wykonanych obliczeń modelowych nie jest wielkim mankamentem, gdyż ten model jest dodatkowym elementem rozprawy.

Doktorant podczas realizacji pracy udowodnił, że potrafi planować i samodzielnie prowadzić badania naukowe zmierzające do rozwiązania postawionego problemu. Doktorant potrafi posługiwać się informatycznymi narzędziami inżynierskimi, co jest dodatkowym atutem i daje samodzielność badawczą w zakresie wykonywania pomiarów i zaawansowanych obliczeń.

4. Szczegółowa ocena treści rozprawy

Rozdział pierwszy pt.: „*Wprowadzenie*" przedstawia przegląd literatury i uzasadnienie podjęcia tematu. Przegląd stanu zagadnienia obejmuje kilka prac podejmujących problem emisji statków morskich i innych pojazdów w warunkach rzeczywistych. Następnie Autor wspomina o zastosowaniach SSN do modelowania emisji. Podrozdział 1.2 przedstawia uzasadnianie podjęcia tematu. Duże natężenie ruchu w okolicach portów oraz liczne manewry statków powodują, że występuje duża koncentracja spalin. Ponadto silniki napędowe pracują ze zmienną prędkością i obciążeniem. Zatem modelowanie emisji wymaga uwzględnienia stanów nieustalonych. W podrozdziale 1.2 przedstawione są wybrane charaktery pracy różnych jednostek. Szkoda, że Autor nie dokonał syntezy wiedzy i nie przedstawił ilościowo udziału różnych stanów pracy na podstawie większej ilości danych. Zamiast tego w jednym przypadku Autor pokazuje przebieg prędkości statku i obciążenie silników podczas jednego rejsu, a w innym przedstawiane są udziały czasu pracy silników w ciągu roku oraz przykładowa mapa z zarejestrowaną trasą. Można odnieść wrażenie, że Autor pokazał przypadkowe wyniki do których miał dostęp, a nie poszukiwał danych literaturowych w określonym celu. Zdjęcia ORP Piast niczego do pracy nie wnoszą.

Rozdział drugi zawiera cel, tezę i zakres pracy. Uważam, że pierwszy akapit tego rozdziału powinien znaleźć się we wstępie. Kolejny akapit przedstawia przesłankę podjęcia badań. W dalszej kolejności jest przedstawiony cel pracy, który został sprecyzowany jako „opracowanie metodyki pomiaru emisji". Moim zdaniem w pracy opracowano metodę modelowania, a nie pomiaru, emisji na podstawie parametrów pracy silnika. Następnie Autor prowadzi logiczny wywód, że zmiany zadanej dawki paliwa, czyli wskaźnika obciążenia, wywołują zmiany obciążenia silnika.

Sformułowana teza badawcza w zasadzie jest poprawna, choć wydaje się oczywista. Skoro emisja związków szkodliwych zależy od stanu pracy silnika, to na podstawie stanu pracy można oszacować emisję. Poza tym nie wiem do czego odnoszą się słowa „w dynamicznych stanach pracy", czy do stanów pracy silnika, czy też całej jednostki.

Rozdział trzeci pt. „Skład spalin okrętowych silników tłokowych napędu głównego". Zawiera podręcznikowe informacje o składnikach spalin, normatywnym składzie paliwa oraz wymaganiach konwencji MARPOL. W tym miejscu, czyli po określeniu celu i zakresu pracy, czytelnik oczekiwałby opisu działań zmierzających do rozwiązania postawionego problemu naukowego. Uważam, że ten rozdział jest zbędny. Ewentualnie te informacje w skondensowanej formie mogłyby być przeniesione do wstępu.

W rozdziale czwartym Doktorant opisuje modelowanie układu napędowego. Przytoczone są wzory umożliwiające określenie oporów ruchu statku oraz sposób obliczania siły naporu i momentu śruby. Natomiast na rysunku 4.1 jako napęd główny oznaczono silnik. Ten rozdział nie zawiera opisu modelu silnika a jedynie model oporów ruchu, pozwalający na obliczenie zapotrzebowania na moc oraz model układu regulacji obciążenia silnika. Uzupełnienie przedstawionego modelu o zerowymiarowy termodynamiczno-przepływowy model silnika pozwoliłoby na pozyskanie informacji o procesach wewnątrzcylindrowych, a wtedy już dokładniej można modelować emisję. Biorąc pod uwagę tezę pracy, czytelnik ma wrażenie, że przedstawiony model będzie wykorzystany w dalszej części pracy do symulacji, ale tak nie jest.

Rozdział piąty rozpoczynają „rozważania wprowadzające", które nie są potrzebne w części badawczej pracy, więc podobnie jak wiele innych fragmentów, powinny znaleźć się we wstępie. W dalszej części podrozdziału 5.1 przedstawione są algorytmy wykonywania obliczeń. Moim zdaniem procedury obliczeniowe są zbyt proste, aby je obrazować za pomocą grafiki. Obliczanie emisji i sprawności cieplnej, błędnie nazwanej sprawnością indykowaną, są to standardowe procedury stosowane podczas badań silnikowych. Uważam, że nazwanie modelem sposobu przeliczania stężeń na emisje jest lekką przesadą.

Rozdział szósty jest najważniejszą częścią pracy, gdyż przedstawia metodykę i wyniki badań empirycznych oraz wyniki badań modelowych. Na początku Autor przedstawił aparaturę pomiarową, stanowisko do badań dynamometrycznych oraz silnik zainstalowany na stanowisku. Z punktu widzenia przedmiotu badań, tj. określenia emisji, dobrze by było zamieścić również informacje na temat systemu spalania. Podobnie skromne są informacje na temat silników zainstalowanych na okręcie. W programie badań stanowiskowych zabrakło uzasadnienia, dlaczego taki program przyjęto.

Badania stanowiskowe polegały na przeprowadzeniu jednej próby, podczas której zmieniano prędkość i obciążenie silnika według przyjętego planu. Stany dynamiczne zidentyfikowano na podstawie zmian mierzonych stężeń poszczególnych składników spalin. Oczywiście dla różnych składników spalin czasy początku i końca stanu dynamicznego były różne. Autor przyporządkował te różnice brakowi „możliwości precyzyjnego ustawienia hamulca", lecz to nie może mieć wpływu na omawiane różnice, gdyż wszystkie składniki spalin wylatują z silnika

w tym samym czasie. Różnica zapewne wynika z charakterystyk emisyjnych silnika i być może czasu odpowiedzi analizatora spalin. Gdyby Autor przedstawił przebiegi średniego ciśnienia indykowanego w stanach nieustalonych, łatwiej byłoby wyjaśnić różnice.

Na stronie 73 Autor przedstawia sposób obliczania „wskaźnika dynamiki okrętowej", który określono na podstawie badań wstępnych. Dobrze byłoby wyjaśnić czytelnikom, co ten wskaźnik wyraża. Nie wiadomo także jakie okresy odniesienia przyjęto do obliczania indeksów jednopodstawowych oraz jakie były wartości średnie z tych okresów. Ciekawe by było przedstawianie przebiegów czasowych tych indeksów dla poszczególnych prób jako funkcje względnego czasu stanu nieustalonego.

Rozważania na temat badania pojemności informacyjnej brzmią naukowo. Niestety można odnieść wrażenie, że Autor z góry założył zestaw zmiennych wejściowych do modelu. Choć przeprowadzone badania nie wskazywały na słuszność tych założeń „autor zdecydował" arbitralnie o tym jaki będzie zestaw zmiennych wejściowych. Ponadto, dokładnie 50 stron wcześniej, na dole strony 49, ta decyzja została już podjęta. Mam na myśli decyzję Autora o trzech neuronach w warstwie wejściowej. W jakim więc celu przeprowadzono te badania?

Zamiast tego dobrze byłoby merytorycznie wyjaśnić, dlaczego te trzy wielkości wybrano, czyli prędkość (statku/silnika), wskaźnik obciążenia oraz temperaturę spalin. Ponadto, żadna wielkość wejściowa SSN nie wyraża dynamiki procesu.

Generalnie wyniki badań empirycznych uważam za wartościowe. Jako uzupełnienie przedstawionych przebiegów wartości emisji i wskaźnika obciążenia ciekawe byłoby przedstawienie korelacji tych wielkości. Autor nie przedstawia też przebiegów prędkości i temperatury spalin, które są wykorzystywane jako wielkości wejściowe modelu SSN.

Rozdział siódmy przedstawia porównanie wartości zmierzonych i obliczonych za pomocą SSN. Na uwagę zasługuje bardzo dobra zgodność wyników. Po zapoznaniu się z tymi wynikami można jedynie stwierdzić, że wreszcie opracowano doskonały model emisji silnika spalinowego. Niestety mam podejrzenie, że do nauki SSN i do weryfikacji użyto tych samych danych. Ciekawe jakby wyglądały wyniki, gdyby emisje podczas pływania zamodelowano za pomocą sieci nauczonej na podstawie danych z hamowni?

Rozdział ósmy ewidentnie świadczy o tym, że przedstawiona praca jest częścią większego projektu. Mianowicie w tym rozdziale zaprezentowano wreszcie zastosowanie fizykalnego modelu statku i jego układu napędowego opisanego w rozdziale czwartym. Ten model, uzupełniony o podmodel emisji typu SSN, może symulować emisję w stanach nieustalonych. Niestety na tym praca się kończy. Czytelnik chętnie zapoznałby się z wynikami symulacji.

Podsumowanie jest słabą częścią pracy. Stwierdzenia w punktach w większości są przypomnieniem tego, co Autor zrobił w ramach realizacji pracy.

Autor używa właściwego nazewnictwa inżynierskiego, poza naprawdę nielicznymi wyjątkami. Liczba błędów typograficznych jest mała. Gorzej jest z interpunkcją, szczególnie w tytułach rysunków tabel i podrozdziałów.

Pewnym mankamentem są zbyt rozbudowane wypowiedzi i częste, niepotrzebne powtarzanie niektórych określeń, np. „okrętowy tłokowy silnik spalinowy". Cała praca jest o okrętowych tłokowych silnikach spalinowych, więc nie ma potrzeby powtarzania tej frazy w kilku zdaniach po kolei. Wystarczyłby „silnik". To samo dotyczy zbyt częstego powtarzania nazwy producenta silnika i jego symbolu.

Doktorant poszedł trochę na łatwiznę prezentując przebiegi czasowe różnych wielkości. Mianowicie zamiast zapisać dane i opracować wykresy, wkleił do pracy tzw. zrzuty ekranowe z programów komputerowych. Nie było przez to możliwe odpowiednie pogrupowanie krzywych ułatwiające interpretację wyników.

5. Ocena końcowa

Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz pozwala stwierdzić, że kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W związku z powyższym rozprawa kmdr. ppor. mgr. inż. Artura Bogdanowicza pt. „*Analiza emisji związków szkodliwych z silników okrętowych napędu głównego w dynamicznych stanach pracy*" spełnia warunki określone w ustawie 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) w zw. z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2018 r. poz. 1669 z późn. zm). Rozprawa stanowi podstawę do dopuszczenia kmdr. ppor. mgr. inż. Artura Bogdanowicza do publicznej obrony oraz nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Jacek Hunicz