prof. ndzw dr hab. inż. Andrzej GRZĄDZIELA
Instytut Budowy i Eksploatacji Okrętów
Wydział Mechaniczno - Elektryczny
Akademia Marynarki Wojennej

Gdynia 03-06-2022 r.

OPINIA
pracy doktorskiej

mgr inż. Sebastian Drewinga

p.t.

ANALIZA PORÓWNAWCZA SKŁADOWYCH HARMONICZNYCH DRGAŃ SKRĘTNYCH OKRĘTOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO Z TŁOKOWYM SILNIKIEM SPALINOWYM

Podstawa prawna oceny: uchwała Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni z dnia 27 kwietnia 2022.

WPROWADZENIE

W ostatnich latach coraz bardziej widoczny wydaje się rozwój technologii diagnostycznych w przemyśle morskim. W zakresie diagnostyki drganiowej, pomiary drgań skrętnych w układach napędowych statków stały się obowiązkowe z punktu widzenia przepisów morskich towarzystw klasyfikacyjnych. Analizy te określane są jako Torsional Vibration Analysis – TVA.

Częstość drgań własnych jest zawsze obecna w silnikach okrętowych, a efekty jej obecności oraz powstającego zjawiska rezonansu mogą być niebezpieczne, gdy wartości drgań osiągną relatywnie wysoki poziom dla maszyn o różnej mocy. Zjawisko takie powstaje, gdy częstotliwość drgań z zewnętrznego źródła integruje się z drganiami własnymi silnika lub gdy wewnątrz silnika powstają niewyważone siły, które powodują prędkości krytyczne pierwszego i drugiego rzędu. Takie zjawiska mogą skutkować poważnymi uszkodzeniami wewnętrznych, ruchomych części silnika okrętowego, pęknięciami konstrukcji, poluzowaniem śrub lub uszkodzeniem łożysk. Drgania silników okrętowych są spowodowane głównie drganiami osiowymi i skrętnymi lub ich kombinacją.

Główne układy napędowe statków posiadają największe silniki tłokowe, jakie kiedykolwiek zbudowano w historii. Silniki okrętowe mają połączonych ze sobą kilka elementów, aby generować ogromną moc transmitowaną do pędnika. Drgania skrętne ze względu na charakter okresowego procesu spalania są naturalnym zjawiskiem w pracy silnika okrętowego. Z punktu widzenia układu napędowego lub zespołu spalinowo elektrycznego (ZSE) jest to zjawisko okresowego skręcania wału korbowego a następnie wałów pośrednich, które rozprzestrzenia się z jednego końca na drugi z powodu nierównomiernych impulsów momentu obrotowego pochodzących z kolejnych procesów spalania w cylindrach. Redukcję drgań skrętnych realizuje się na dwa sposoby tj. przez zastosowania sprzęgieł elastycznych lub hydrokinetycznych oraz przez zastosowanie tłumików drgań skrętnych w silniku.

Pracujący wielocylindrowy silnik spalinowy generuje drgania przez co niekorzystnie wpływa na żywotność części silnika i całego układu napędowego. Wał korbowy jest jedną z wielu części silnika, która jest narażona na działanie drgań. Szkodliwe skutki drgań skrętnych obejmują między innymi:

- wysokie naprężenia poprzeczne prowadzące do uszkodzeń zmęczeniowych wałów,
- zwiększenie naprężeń w elementach wału napędowego, szczególnie przy znacznym obciążeniu łożysk wału, co może skutkować skróceniem trwałości łożysk,
- poluzowanie fundamentu silnika, co może uszkodzić jego konstrukcję nośną,
- wzrost liczby nieplanowanych napraw lub wymiany uszkodzonych elementów napędowych,
- szkodliwość oddziaływania drgań na personel techniczny statku.

Pomimo, że podstawy teoretyczne powstawania i redukcji drgań skrętnych są powszechnie znane i opisane m.in. w przepisach towarzystw klasyfikacyjnych to nadal największymi problemami są prawidłowy pomiar drgań skrętnych oraz efektywna analiza wyników, w tym błędów pomiarowych. Każda z dostępnych metod pomiarowych drgań skrętnych ma swoje ograniczenia, procedury pomiarowe przyjmują pewne uproszczenia a wyniki badań zawsze obarczone są błędami.

Wydaje się, że tematyka dysertacji wypełnia znaczny zakres problemów z obszaru TVA. Praca zawiera kluczowe zadania pomiarowe, analityczne i badania walidacyjne na stanowisku ZSE. Istotnym elementem pracy jest jej aplikacyjność w postaci sprawdzenia metodami statystycznymi wrażliwości poszczególnych symptomów na symulowane uszkodzenia instalacji paliwowej oraz powietrza zasilającego.

STRUKTURA PRACY

Praca składa się z dziewięciu rozdziałów, bibliografii oraz załącznika tworzących razem logiczną całość zawartą na 185 stronach. Rozdział 1 jest wprowadzeniem, w którym Autor przedstawia tendencje rozwojowe napędów okrętowych oraz wskazuje na rolę transportu morskiego w światowej gospodarce. W podsumowaniu wskazuję na rolę diagnostyki technicznej w eksploatacji napędów okrętowych, w tym silników o zapłonie samoczynnym.

W rozdziale 2 zaprezentowano rys historyczny pomiarów drgań skrętnych oraz przykłady uszkodzeń wałów korbowych spowodowane brakami analizy w procesie projektowania oraz odstąpieniem od diagnostyki pomiaru drgań skrętnych. Wskazując na potrzebę diagnostyki technicznej Autor przechodzi w dalszej części do prezentacji współczesnych metod pomiarowych wyliczając ich ograniczenia, zalety i wady.

Rozdział 3 to przegląd i analiza literatury wspomagającej realizacje pracy. Autor skupia się na analizie stanu wiedzy na temat badań diagnostycznych realizowanych w różnych ośrodkach badawczych. Przedstawione przykłady oraz wnioski syntetycznie wskazują na potrzebę realizacji tematu oraz wybór metody pomiarowej.

W rozdziale czwartym Autor prezentuje cel, tezy i hipotezy dysertacji. W podsumowaniu rozdziału przedstawia zwięźle zakres pracy oraz wskazuje na oryginalność zrealizowanych badań.

Charakterystyka obiektu badań oraz opis zastosowanej aparatury pomiarowej są zaprezentowane w rozdziale piątym. Autor przedstawia podstawowe dane techniczne ZSE, zwracając uwagę na tradycyjny system zasilania paliwem, co wiąże się z zaplanowanymi badaniami i symulacjami niesprawności elementów instalacji. W kolejnej części rozdziału przedstawiony został badawczy system pomiarowy oraz założenia struktury jego elementów dla potrzeb diagnostycznych.

Rozdział szósty jest syntetycznym opisem badań stanowiskowych. Autor prezentuje plan bierno-czynnego eksperymentu badawczego oraz charakteryzuje metody symulowania uszkodzeń w instalacji paliwowej oraz zasilania powietrzem dolotowym. W rozdziale przedstawiono wyniki badań walidacyjnych przeprowadzone metodą pomiaru ciśnień indykowanych w kolejnych cylindrach silnika spalinowego.

Rozdział siódmy przedstawia główne wyniki badań eksperymentalnych oraz analizę porównawczą składowych harmonicznych drgań skrętnych wału ZSE w stanach pełnej i częściowej zdatności. W pierwszym podrozdziale zaprezentowano metodę identyfikacji składowych harmonicznych dla potrzeb diagnozowania zaproponowanych stanów

niesprawności. Kolejny podrozdział przedstawia metodę określenia liczebności prób oraz propozycję zastosowania analizy statystycznej na podstawie klasycznego współczynnika zmienności. Podsumowaniem rozdziału są wyniki analiz statystycznych kolejnych składowych harmonicznych w różnych stanach zdatności eksploatacyjnej w formie tablic diagnostycznych wraz z przypisaniem im wartości logicznych. Rozdział podsumowują wnioski odnoszące się do uzyskanych analiz.

Rozdział ósmy to analiza statystyczna uzyskanych wyników pomiarów i analiz. W tej części zaprezentowano analizę rozproszenia wyników w formie histogramów otrzymanych w wyniku transformacji Fouriera splotów widm amplitudowo – częstotliwościowych. Przedstawiono wyniki wartości *p* testów normalności rozkładów Shapiro – Wilka składowych harmonicznych dla różnych stanów obciążeń ZSE oraz dla zmiennych stanów zdatności. W kolejnych podrozdziałach zaprezentowano zastosowane statystyki parametryczne ANOVA oraz nieparametryczne Wilcoxona widm ograniczonych do składowej harmonicznej12 rzędu, które podsumowano wnioskami z badań.

Ostatni rozdział 9 jest podsumowaniem pracy, który składa się z trzech podrozdziałów. Pierwszy z podrozdziałów prezentuje ogólną charakterystykę osiągniętych wyników badań. Kolejny przedstawia wyniki poznawcze, odnosząc się szczegółowo do wniosków zawartych w rozdziałach 7 i 8. Utylitarne wyniki badań oraz kierunki dalszych prac kończą podsumowanie.

Bibliografia dysertacji zawiera 142 pozycje literaturowe, aktualne i ściśle związane z obszarem naukowym pracy.

UWAGI KRYTYCZNE

Praca jest napisana dość starannie oraz logicznie. Układ pracy jest spójny i konsekwentny, jednak wprowadzenie w treść pracy wszystkich tabel z wynikami pomiarów i analiz można by było zastąpić przykładowymi wynikami a pozostałe przypisać do odpowiednich załączników. Taka operacja znacząco uatrakcyjniłaby zapoznanie się z dysertacją. Większość prezentowanych graficznie wyników badań jest wysokiej rozdzielczości i posiadają one czytelne opisy osi a podpisy pod rysunkami są wyczerpujące. Słabą jakość graficzną posiadają rysunki pomiaru ciśnień indykowanych 6.1, 6.3, 6.4, 6.6 i 6.10.

Na uwagę zasługuje konsekwencja walidacji badań drgań skrętnych w symulowanych uszkodzenie stanach eksploatacyjnych. Autor wykorzystał zaawansowane metody statystyczne

dla oceny wrażliwości symptomów drganiowych. Wskazuje to na duże doświadczenie Autora oraz analityczne umiejętności w zakresie przedmiotu badań. Należy również zwrócić uwagę na dość precyzyjne użycie języka technicznego, które pozwoliło Autorowi w większej części pracy uniknąć niejednoznaczności w opisie rezultatów badań. Wątpliwość budzi jedynie brak zdefiniowania pojęcia „średniej wartości międzyszczytowych drgań skrętnych", wprowadzenie na stronie 66 pojęcia „metoda pozoracji nieszczelności" oraz dwukrotne użycie żargonu inżynierskiego w terminologii technicznej, np. aparatura paliwowa.

Postęp w nauce jest wynikiem dyskusji i ścierania się odmiennych poglądów stąd też w każdej pracy dopatrzyć się można niedociągnięć czy dyskusyjnych założeń lub tez. W przypadku otrzymanej do recenzji rozprawy uwagi można podzielić na merytoryczne i redakcyjne. Odnośnie uwag merytorycznych to wątpliwości budzi fakt, że Autor dość swobodnie analizuje proponowane rozwiązanie pomiarowe bez krytycznego odniesienia się do złożonego układu zmiennych naprężeń jakim poddawany jest wał ZSE zarówno na stanowisku badawczym jak i w siłowni okrętowej. Umieszczenie dyskusji lub opis przyjętych uproszczeń w rozdziale szóstym na ten temat na pewno wzbogaciłoby pracę.

Kolejną kwestią oceny merytorycznej jest brak równomiernego zawarcia treści w kolejnych rozdziałach. Wydaję się, że bardziej stosownym byłoby połączenie treści rozdziałów 4 i 5, co nie wpłynęłoby na całościowy układ pracy i wyeliminowałoby wprowadzenie rozdziału czwartego o liczbie stron wynoszącej tylko dwa.

Szkoda, że Autor realizując badania statystyczne nie podjął się trudu kompleksowej analizy błędów pomiarowych, w tym parametrów drganiowych. Byłoby to interesujące zważywszy, że na stronie 52 wskazuję, że błąd odczytu obciążenia wynosi ±5kW dla obciążenia 50 kW.

W rozdziale 6, prawdopodobnie pomyłkowo, wprowadzono błędną kolejność wykresów zamieniając na rysunkach 6.4 wykresy a i b, dla 50 kW i 150 kW.

We wzorze (7.1) na stronie 70 Autor pomyłkowo wprowadził prędkość kątową wału korbowego [s^{-1}] zamiast w [rad/s].

Na stronie 78 Autor indukcyjnie przedstawia wzór (7.4) na maksymalną wartość międzyszczytowych drgań skrętnych w stopniach. Wątpliwości dotyczą zgodność przyjętych jednostek miar, uważam, że wzór ten powinien zostać zdefiniowany jako wynik zależności korelacji parametrów a nie zależność w postaci formuły matematycznej jednostek fizycznych.

Na stronie 137 prezentowane wnioski nr 1 i 2 brzmią sprzeczne tak jak treść w ostatnim akapicie na stronie 142. Prawdopodobnie są to tylko jednak błędy językowe odnoszące się do wniosków wcześniej prezentowanych wyników analiz.

Kolejną grupę uwag stanowią zagadnienia redakcyjne. Pierwszym problemem pracy są drobne błędy diaktryczne oraz językowe, które znaleźć można na stronnie 85. Nie jest to kwestia bardzo istotna, lecz wpływa na ogólną ocenę poprawności redakcyjnej i dbałości o estetykę. Ponadto, proponowałbym właściwe użycie pojęć „ilość" i „liczba", które błędnie zinterpretowane znaleźć można na stronach 22, 26, 71, 75 i 122.

Innym problemem są skany zdjęć i wykresów z opracowań źródłowych np. rysunki 1.10, 2.2 czy 2.10, które są nieostre, kontrast zbyt mały a jasność zbyt duża.

Przedstawione uwagi krytyczne mają w większości charakter dyskusyjny i w niewielkim stopniu wpływają na wysoki, merytoryczny poziom dysertacji.

PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Przedstawiona do recenzji praca " *ANALIZA PORÓWNAWCZA SKŁADOWYCH HARMONICZNYCH DRGAŃ SKRĘTNYCH OKRĘTOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO Z TŁOKOWYM SILNIKIEM SPALINOWYM*" niezależnie od przedstawionych uwag krytycznych na pewno spełnia warunki stawiane pracom doktorskim, świadczy o dużym i profesjonalnym wkładzie Autora w planowanie, realizację eksperymentów badawczych oraz umiejętność realizacji i wnioskowania z badań walidacyjnych.

Wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Sebastiana Drewinga do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A Gydnicka