

30 IX 2022

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Judyty Felicjancik
*„Eksperymentalno-numeryczna metoda modelowania zjawisk
hydroakustycznych w przepływie z kawitacją wokół śruby
okrętowej”*

Rozprawa doktorska mgr Judyty Felicjancik dotyczy metody prognozowania zjawisk hydroakustycznych w zastosowaniu do śrub okrętowych przy jednoczesnym występowaniu kawitacji. Oprócz zaprezentowanej metody podjęto próbę oceny możliwości praktycznego zastosowania tejże do modelowania i prognozowania hałasu powodowanego przez kawitację. Hałas wytwarzany przez kawitację uważany jest za istotny składnik hałasu generowanego przez statki handlowe. Zagadnienia wpływu hałasu generowanego przez transport na środowisko morskie pozostaje w obszarze zainteresowań między innymi Unii Europejskiej, która dyrektywami stara się ograniczyć jego niekorzystny wpływ na to środowisko. Oprócz istotnego oddziaływania na środowisko morskie umiejętność modelowania, prognozowania, jak i wykrywania hałasu ma duże znaczenia wojskowe. Poza oczywistymi zastosowaniami praktycznymi w pracy można doszukać się również aspektu poznawczego, który polega na poszukiwaniu metody poprawnego prognozowania omawianych zjawisk. W mojej ocenie tematyka pracy doktorskiej jest aktualna i ważna z punktu widzenia aplikacyjnego.

Praca podzielona jest na jedenaście rozdziałów (w tym dziewięć numerowanych). W rozdziale pierwszym (numerowanym) omawiane są pędniki okrętowe, w tym mechaniczne typu zespół dysza-śruba, choć nie można pośród nich znaleźć układów pędnik-kierownica, które to układy badane i rozwijane są CTO S.A., z którym Doktorantka współpracuje. Rozdział drugi zajmuje obszerną część pracy i poświęcony jest zagadnieniom kawitacji. Oprócz samego zjawiska i kryterium jego wystąpienia znaleźć tu można istotne dla pracy informacje o wpływie zjawiska kawitacji na pracę śruby okrętowej. Osobny paragraf poświęcony został modelom kawitacji, gdzie omawiane są równania Rayleigha i Rayleigha-Plesseta. Z lektury paragrafu 2.4.3 można odnieść wrażenie, że w użycie są wyłącznie dwa modele kawitacji, tj. pełen model Rayleigha-Plesseta i Schnerrla-Sauera. Wynika to prawdopodobnie z tego, że tylko te dwa modele są dostępne w oprogramowaniu komercyjnym, które było wykorzystywane do obliczeń. Tymczasem w powszechnym użytku tych modeli jest znacznie więcej, np. model Merkle'a, Kunza, Singhala czy Zwart.

Rozdział trzeci (numerowany) zawiera wprowadzenie do zagadnień hydroakustyki, w którym można znaleźć m.in. podstawowe definicje czy opis eksperymentalnego pomiaru hałasu z dyskusją wpływu skali podczas badań modelowych. W wielkim skrócie opisane jest podejście numeryczne do badania hałasu śrub z uwzględnieniem kluczowego dla pracy modelu Ffowcsa Williamsa-Hawkingsa. Znaleźć tu można sformułowania sugerujące, że „zastosowa-

wanie równań RANS pozwala również w rozsądnym czasie tworzyć i rozwiązywać równania równowagi dla każdej objętości kontrolnej”. Zapewne chodziło o rozwiązywanie dyskretnych wersji m.in. tych równań dla objętości kontrolnych w ramach metody objętości skończonych. W dalszej części rozdziału przywołane są pojęcia związane z polem hałasu hydroakustycznego, dyskretną transformacją Fouriera czy definicje związane z analizą poziomów dźwięku. Rozdział czwarty (numerowany) jest ostatnim rozdziałem wprowadzającym i dotyczy zaleceń i norm związanych z ograniczeniem emisji hałasu podwodnego, jak i różnych aspektów hałasu generowanego przez pędniki.

Właściwa część pracy zaczyna się od rozdziału piątego (numerowanego), w którym podano podstawowe parametry analizowanej śruby okrętowej w skali modelowej, która odpowiada śrubie z badań w skali rzeczywistej. Rozdział szósty (numerowany) opisuje badania eksperymentalne w skali modelowej w tunelu kawitacyjnym z komorą akustyczną oraz tzw. symulatorem przestrzennym umożliwiającym uzyskanie prawidłowych rozkładów strumieni nadążających. Pole prędkości osiowej z tunelu kawitacyjnego (rysunek 22) nie przedstawia zbyt dużej wartości, gdyż brak jest legendy, niemniej zgodność pomiędzy pomiarami a obliczeniami CFD jest widoczna. Zestawy pomiarowe liczby kawitacyjnej z wykresu 24 nie są oznaczone i opisane w tekście. W całym rozdziale szóstym próżno szukać informacji o aparaturze pomiarowej i niepewnościach pomiarów poszczególnych wielkości. Wydaje się to być typowym podejściem reprezentowanym przez jednostki badawcze typu CTO S.A., ale nie do końca akceptowalnym z naukowego punktu widzenia.

Rozdział siódmy poświęcony jest obliczeniom numerycznym dla jednego współczynnika posuwu dla skali modelowej i rzeczywistej. Na podstawie podanych w tym rozdziale opisów nasuwają się następujące pytania:

- Co to znaczy „zoptymalizowana siatka dyskretyzująca”? Co było kryterium optymalizacji? Skąd wynikają maksymalne wartości y^+ na poziomie 40 dla modelu turbulencji $k-\omega$ SST? Co to znaczy „rozmiar siatki dostosowany do modelowania zjawisk kawitacyjnych”? Jak dostosowano siatkę?
- Na stronie 83 pada stwierdzenie, że „przeprowadzono badania wrażliwości siatki”. Jaki był wpływ i na co tych badań? Gdzie są wyniki tych badań?
- Jak inicjowano obliczenia niestacjonarne? Chodzi o warunek początkowy. Czy było to np. zerowe pole prędkości, czy być może punktem startowym były wyniki obliczeń stacjonarnych?
- Ile należało obliczyć pełnych obrotów śruby, aby uzyskać wyniki pseudoperiodyczne?
- Na stronie 82 podano rozmiar siatki na poziomie 4.5 miliona elementów, ale według tabeli 8 wynosił on 3 lub 3.5 miliona.
- Układ równań zachowania ze strony 87 jest oczywiście słuszny. Niemniej nie stanowi on domkniętego układu równań ani tym bardziej nie był rozwiązywany przez komercyjny program CFD. Co więcej, postać równania zachowania masy sugeruje traktowanie płynu jako ściśliwy, a obecność równania zachowania energii – wskazuje na konieczność uwzględnienia zjawisk związanych z wymianą ciepła. Brak jest natomiast równania transportu udziału objętościowego z metody VoF i dwóch równań transportu k i ω . Jaki był zatem układ równań i jakie były wszystkie warunki brzegowe? Czy była używana funkcja ścianki?
- Czy enigmatyczne stwierdzenia na stronie 89 „krok czasowy stosowany podczas obliczeń niestacjonarnych jest adekwatny do częstotliwości próbkowania...” oznacza, że nie badano wpływu dyskretyzacji czasowej na wyniki?

W dalszej części rozdziału opisane jest modelowanie pola prędkości w płaszczyźnie kręgu śruby za pomocą warunku brzegowego na wlocie. Uważam to za wkład Doktorantki, ale opis tej procedury jest dość lakoniczny dla przypadku rozkładu pola prędkości na całym wlocie.

Czy określenie „iteracyjne zadawanie pola prędkości” oznacza metodę prób i błędów, czy być może kryje się za tym jakiś algorytm np. minimalizacji błędu?

Rozdział siódmy kończy się graficzną prezentacją wyników z ubogim komentarzem słownym. Rysunki od 41 do 48 opisane są tylko jednym zdaniem. Nie wiadomo, dla jakiej wartości współczynnika α przygotowano wizualizację kawitacji. Rozkłady modułu wektora wirowości (rysunek 48) wyglądają efektownie, choć nie wiadomo w jakim celu są umieszczone. Być może chodzi o pokazanie komplikacji przepływu. Niemniej dla skali modelowej w przypadku kawitacji widać zgodność pomiędzy obliczeniami numerycznymi i eksperymentem.

W rozdziale ósmym (numerowanym) przytoczono badania eksperymentalne przeprowadzone na morzu na obiekcie rzeczywistym. Wyniki badań obejmowały parametry pracy śruby, kawitację, hałas czy impulsy ciśnienia. Uzyskano dobrą zgodność tychże impulsów w porównaniu z modelowymi obliczeniami numerycznymi, które przeskalowano.

Ostatni rozdział numerowany (dziewiąty) zawiera porównanie charakterystyk hydroakustycznych w postaci rozkładów widmowych. Porównywano ze sobą obliczenia z eksperymentem w skali modelowej i rzeczywistej, w tym również ze skalowaniem. Wyniki opisano nieco dokładniej w porównaniu z poprzednimi rozdziałami. Na podstawie zaproponowanej metody możliwe było wskazanie przejścia do stanu kawitacji. Pewną niejasność budzi opis rysunków 60. Nie jest jasne, czy jest to porównanie skali modelowej i rzeczywistej, czy być może jednej z tych skal dla modelu Ffowcsa Williamsa–Hawkinga i bliżej nieokreślonego modelu „standardowego”. W przypadku skal modelowej i rzeczywistej osiągnięto dobrą zgodność dla poziomu dźwięku przy niskich częstotliwościach. Końcowa część rozdziału porównuje między innymi obliczenia z tunelu skalowane w górę z eksperymentem skalowanym w dół, choć z niejednoznacznie opisanego tekstu w pracy wynika co innego. Praca zakończona jest nienumerowanym podsumowaniem, gdzie Doktorantka przedstawia między innymi swoje osiągnięcia oraz dalsze perspektywy rozwoju badań.

Praca pod względem redakcyjnym mogłaby wyglądać lepiej. Znaleźć można w niej nieco błędów stylistycznych i interpunkcyjnych, których w recenzji nie wskazuję. Co dziwne, wzory w tekście nie są numerowane, a więc trudno się do nich bezpośrednio odnosić. Strony 22 i 23 pojawiają się w pracy dwukrotnie w identycznej postaci. Największym mankamentem są nieczytelne wykresy (11-14, 54, 56-67), z których trzeba się domyślać opisów osi i skal. Jeżeli Doktorantka rozważy pisemną odpowiedź na moje uwagi do pracy, to prosiłbym o umieszczenie czytelnych wersji tych rysunków. Do słabych stron pracy zaliczyłbym również brak rozdziału, który w usystematyzowany sposób przedstawiłby obecny przegląd literatury ze wskazaniem, w którym miejscu znajdują się dokonania Doktorantki. Kolejną słabą stroną pracy jest brak opisu algorytmów i ich parametrów, które wykorzystane zostały do cyfrowego przetwarzania sygnałów.

Oceniając pracę mgr Judyty Felicjancik, stwierdzam, że tematyka pracy mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Bez wątpienia jest istotna z aplikacyjnego punktu widzenia, gdyż pozwala myśleć o stworzeniu systemu zarówno diagnozującego, jak i w przyszłości projektującego. W pracy rozszerzono możliwości stosowania metod do prognozowania hałasu kawitujących śrub okrętowych – przynajmniej dla niektórych rodzajów kawitacji, co można uznać za oryginalny wkład Doktorantki. Zaproponowano poprawione sposoby obróbki danych, co dało lepsze rezultaty w porównaniu z poprzednimi tego typu badaniami prowadzonymi w CTO S.A. W moim odczuciu Doktorantka wykazuje się dostateczną wiedzą w swojej dziedzinie. Uważam ponadto, że spełnione są minimalne wymagania związane z samodzielnym prowadzeniem pracy naukowej. Wnioskuję o **dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr Judyty Felicjancik do publicznej obrony.**

Poniżej zamieszczony jest wykaz drobnych uwag, które nie wymagają dyskusji podczas publicznej obrony:

1. Na stronie 7 zapis współczynnika posuwu J oznacza, że prędkość obrotowa n znajduje się w liczniku zamiast w mianowniku.
2. Na stronie 7 we wzorach na współczynniki K_T i K_Q zamiast gęstości ρ w mianowniku znajduje się π .
3. Na stronie 8 współczynnik α i α_s oznaczają raczej udział objętościowy gazu niż „wartość gazu”.
4. Na stronie 16 powinno być „bezuderzeniowe” zamiast „bez uderzeniowe”, a na stronie 17 „śródlądowy” zamiast „śród lądowy”.
5. Str. 16: powinno być 90° lub „90 stopni” zamiast 90deg.
6. Funkcję zapisuje się czcionką prostą. Np. na stronie 19 we wzorze na skok śruby P powinno być $P = 2\pi r \operatorname{tg} \varphi$. Nie wiadomo po co w tym wzorze jest nawias.
7. Str. 19 i 68: zamiast „ilość skrzydeł” powinna być „liczba skrzydeł”.
8. Str. 79 i 80: zamiast „SST k-omega” powinno być „SST $k-\omega$ ”.
9. Na stronie 2 pojawia się dziwna odmiana nazwiska Fouriera w postaci „Fourier’a”. Na stronie 41 mamy „Stockes’a” zamiast Stokesa. Na stronach 41, 42 i 88 znaleźć można „Runge-Kuty” zamiast „Rungego-Kutty”. Na stronie 88 można przeczytać o równaniach „Rayleigh–Plesset’a” zamiast Rayleigha–Plesseta. Co oznacza (4) w sformułowaniu „Rayleigh–Plesset’a (4)”?
10. Str. 25: jest „duży” zamiast „duży”.
11. Str. 33: zamiast „sprzyjającymi powstaniu ów rodzajowi kawitacji” lepiej „sprzyjającymi powstaniu tego rodzaju kawitacji”.
12. Str. 39: nie R_{prim} tylko $\dot{R}$ lub R' , $\frac{dR}{dt}$.
13. Str. 131: nie „[62] Joel H., Peric M.F.” tylko „[62] Ferziger J.H., Peric M.”.
14. Str. 115: zamiast „widoczna na wynikach” lepiej „widoczne na wykresach”.
15. Str. 125 i 127: zamiast „metodologia CFD” powinno być „metodyka CFD”.
16. Na str. 47 i 48 powtarza się zdanie „Choć wpływ efektu skali...”.
17. Str. 51: co to jest „cząsteczkowy strumień pędu i energii”?
18. Str. 10: zamiast „w niemniejszej rozprawie” powinno chyba być „w niniejszej rozprawie”.
19. Str. 2: zamiast „korygowano tą prędkość” powinno być „korygowano tę prędkość”.
20. Na str. 52 można znaleźć sformułowania „przy niekorzystnych gradientach ciśnienia”, co rodzi pytanie o to, jak rozumieć niekorzystny gradient ciśnienia. A kiedy gradient ciśnienia jest korzystny?
21. Str. 89: fragment tekstu o modelu turbulencji $k-\omega$ SST jest powtórzeniem tekstu ze strony 51.
22. Str. 131: co oznacza zapis „(in polish)” w pozycji bibliograficznej [46]? Przecież praca doktorska, jak i ta pozycja są „in Polish”.

23. Str. 56: co to jest „rządzące pole akustyczne”?
24. Na stronie 82 pada stwierdzenie, że „kształt objętości kontrolnej może być dowolny”. A czy może być wklęsły?
25. Na stronie 88 można znaleźć zdanie „równanie zachowania masy i momentu”. O jaki tu moment chodzi? Być może chodzi po prostu o pęd (*momentum*).
26. Na stronie 88 „model uzupełniający Runge-Kuty” raczej nie jest żadnym modelem uzupełniającym – tylko metodą numeryczną całkowania równania Rayleigha–Plesseta.
27. Str. 90: co oznacza symbol „*” w jednostce współczynnika lepkości dynamicznej? Jednostki współczynników lepkości dynamicznej i kinematycznej są zamienione miejscami.
28. Str. 93: Na rysunkach 36 i 37 brak jest legendy.
29. Str. 124: Nie „stało-zakresowy” tylko „stałozakresowy”.

K. Tesch

